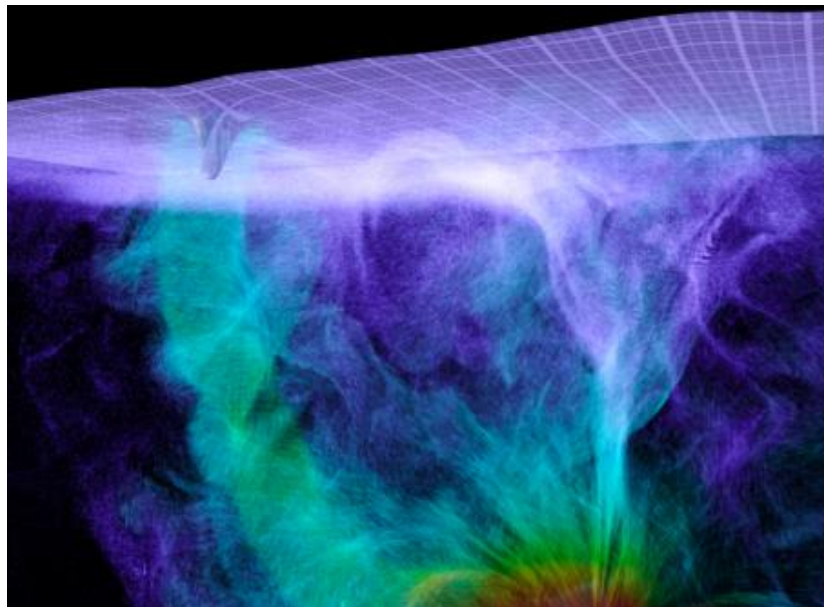


Vérification, Validation et Quantification des incertitudes en simulation numérique (VVUQ)

École Polytechnique- Palaiseau

Mardi 8 novembre 2016



Coordination Scientifique

Alain Forestier (CEA), Christophe Denis (ENS Cachan), Vincent Couaillier (ONERA),

Mario Ricchiuto (INRIA)



Editorial Board

Dr. Christophe Calvin (CEA)

Mr. Laurent Duploux (BnF)

Mr. Philippe Wlodyka (Polytechnique)

Mr. Pascal Pavel (CEA)

Dr. Thiên-Hiệp Lê (ONERA)

Ms. Régine Lombard (Polytechnique)

Vérification, Validation et Quantification des incertitudes en simulation numérique (VVUQ)

Séminaire Aristote, 08/11/2016 à l'École Polytechnique

Coordination scientifique

Alain Forestier (CEA), Christophe Denis (ENS Cachan), Vincent Couaillier (ONERA),

Mario Ricchiuto (INRIA)



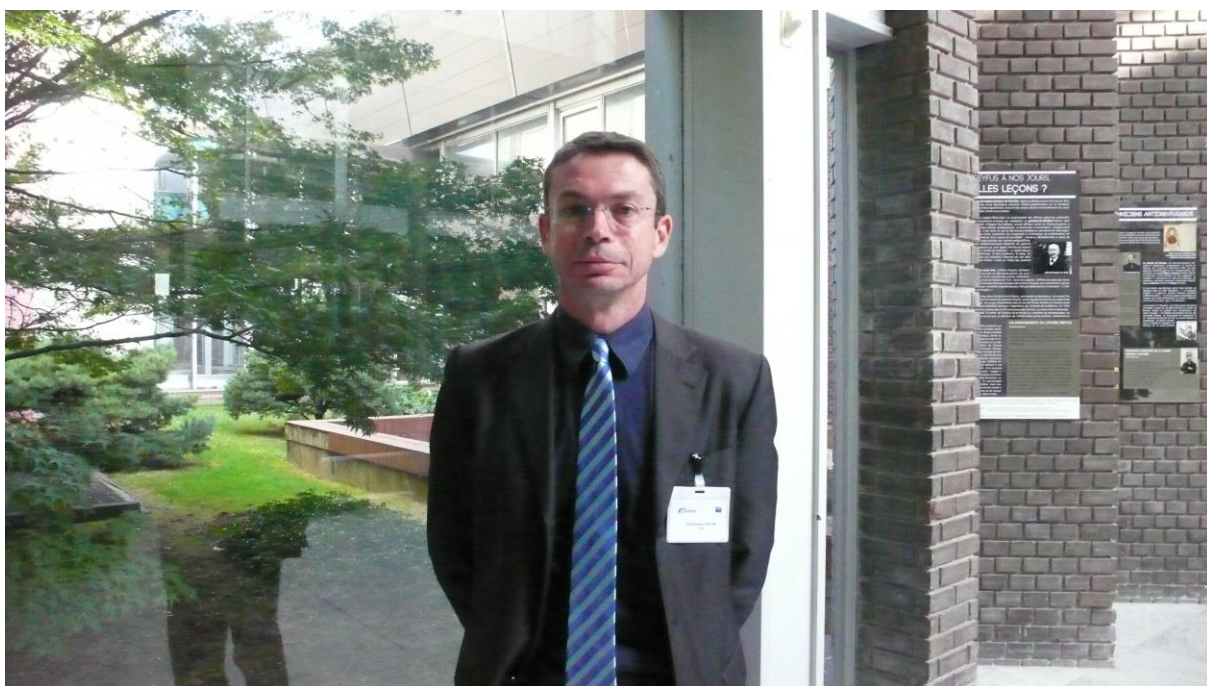
Table des matières

Compte-rendu des interventions	5
1. Préconisations vis-à-vis de la validation des logiciels utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire.....	6
2. Qualification of a CFD code for reactor applications	8
3. Prise en compte de l'incertitude de l'arithmétique flottante dans un processus de V&V en utilisant Verificarlo	10
4. CFD industrial approach for space systems design	12
5. Réduction de modèles pour des problèmes d'optimisation et d'identification en calcul des structures	14
6. Combining historical eyewitness accounts on tsunami-induced waves and numerical simulations for getting insights in uncertainty of source parameters	16
7. Les apports de l'écosystème Go pour les challenges de l'ingénierie d'architectures clou microservices	18
8. SICODYN research project : variability and uncertainty in structural dynamics	20

Compte-rendu des interventions

Introduction

Christophe Calvin (CEA) présente la journée. Pourquoi cette journée? Par ce que la vérification, la validation et la quantification des incertitudes sont indispensables dans de nombreux domaines. Elles sont mêmes vitales dans le nucléaire afin que les réacteurs soient le plus sûrs possible, ou dans l'aéronautique. Tous ces thèmes seront abordés. Christophe Calvin annonce par ailleurs que, dans le cadre de l'association Aristote, des groupes de travail doivent être mis en place afin de continuer à discuter sur les sujets des séminaires.



1. Préconisations vis-à-vis de la validation des logiciels utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire

Franck Dubois (IRSN)

Franck Dubois travaille au pôle sûreté nucléaire de l'IRSN, établissement expert sur les accidents des réacteurs en exploitation. L'IRSN est l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaires. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial sous la tutelle conjointe de la Défense, de l'Environnement, de l'Énergie, de la Recherche et de la Santé. Le siège est à Fontenay-aux-Roses. L'IRSN est le support technique de l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) qui rend compte au parlement.

Les domaines d'activité de l'IRSN sont la sûreté nucléaire, la sûreté des transports, la protection des travailleurs. Franck Dubois insiste sur le fait que, en France, les exploitants sont responsables de la démonstration de sûreté et s'appuient sur les concepteurs pour le faire.

Pour faire une démonstration de sûreté, l'exploitant étudie les accidents et utilise des logiciels, des OCS (Outils de Calcul Scientifique) qui doivent être qualifiés. L'IRSN étudie les dossiers de qualification de ces OCS. C'est là que les points durs sont identifiés. L'ASN a décidé de faire un guide dans ce sens.



En 2014, un groupe de travail avec l'ASN s'est réuni avec les exploitants EDF, Areva et CEA pour élaborer un guide applicable aux OCS utilisés pour la démonstration de sûreté pour la première barrière (gaine du combustible). Les préconisations demandent de se mettre d'accord sur les définitions. Franck Dubois en donne quelques-unes. Les OCS sont des logiciels qui effectuent la simulation des phénomènes physiques. Ils sont composés d'un ou plusieurs solveurs et de pré et post-processeurs. Le champ d'utilisation visé est

l'ensemble de situations ou scénarios qu'on vise à réaliser. La vérification s'assure que l'OCS fonctionne, que les phénomènes simulés sont bien réels. L'incertitude est la quantification du doute sur le résultat d'une mesure ou d'un calcul. La qualification est la reconnaissance par l'exploitant qu'un OCS est apte à fournir des résultats utilisables dans la démonstration de sûreté.

Franck Dubois insiste sur le fait que la version de l'OCS soit bien identifiée et figée. On choisit un code avec un choix de modèles. Contrairement aux Etats-Unis, l'OCS n'est pas qualifié en absolu mais sur des applications cibles. Il y a un lien entre la qualification d'un OCS et la méthode. Des biais peuvent avoir une influence sur la réponse des OCS. Il est donc difficile de séparer les OCS et les méthodes.

La démarche de validation d'un OCS est progressive : module par module, modèle par modèle, effet par effet. La complexité est croissante jusqu'à validation intégrale. Il n'y a donc pas de compensateurs d'erreurs.

La démarche préconisée comporte 5 étapes :

- 1 : validation comme Franck Dubois l'a expliqué ci-dessus
- 2 : réalisation d'un PIRT des applications cibles : identifier les phénomènes physiques et les classer selon les plus dominants afin de mettre plus d'efforts de vérification sur ces phénomènes
- 3 : validation qui a pour effet de séparer des modèles dominants identifiés à l'étape 2. A la sortie de cette étape, le schéma de calcul est défini, les incertitudes sont maîtrisées, les domaines de validation des modèles sont définis
- 4 : validation intégrale, même étape que 3 mais globalement
- 5 : dernière étape : la transposition au champ d'utilisation visé. C'est le passage des cas tests expérimentaux aux cas réels (effet d'échelle, conditions expérimentales,...)

On oublie souvent de vérifier les outils de pré et post-traitements. Des erreurs peuvent apparaître. Il faut prévoir une vérification spécifique de ces outils. De même les couplages peuvent faire apparaître de nouveaux phénomènes physiques qu'il faut aussi vérifier.

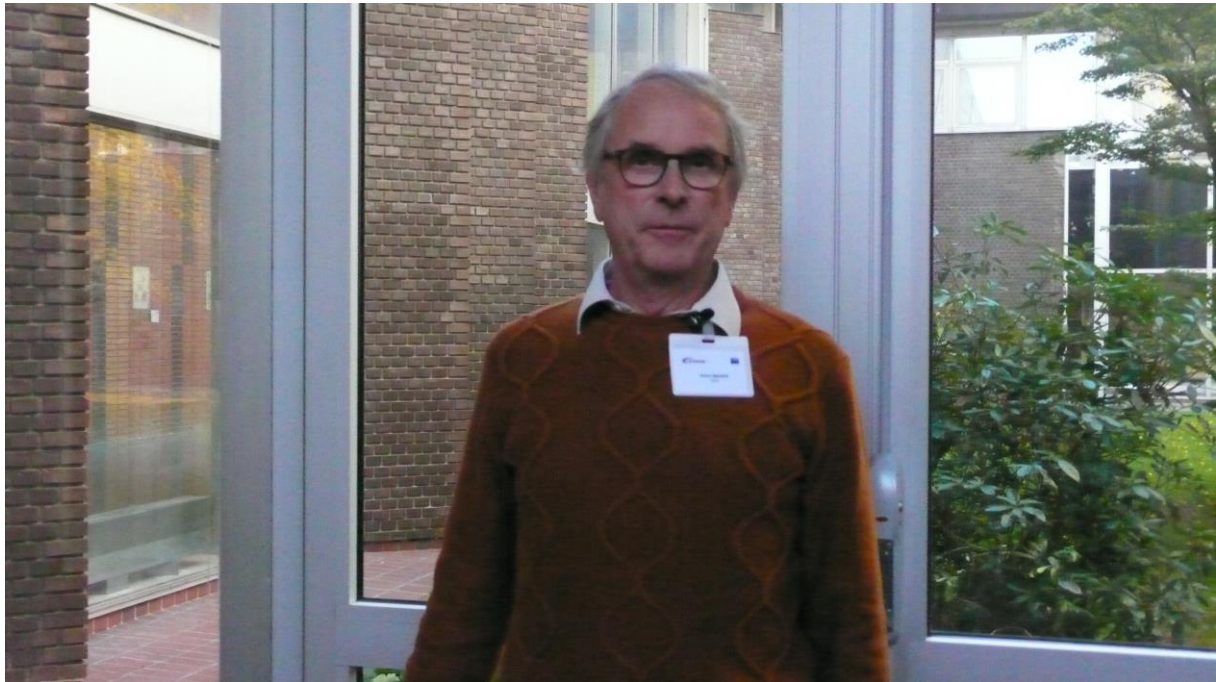
C'est une démarche idéale, pas forcément possible s'il y a par exemple des verrous expérimentaux. Interviennent alors le jugement d'experts, les études de sensibilité, la comparaison avec d'autres OCS, qu'il faut exploiter avec précaution. La démarche conservatrice vise à identifier les manques par des pénalités dans les codes de calculs. Un des derniers points abordés dans le guide est la réactualisation de la qualification. Pour une nouvelle version, l'analyse de non régression peut suffire. S'il s'agit d'une extension du champ d'utilisation, il faut vérifier que le domaine de validation contient ce nouveau domaine.

Le projet de guide a été terminé mi-2016. Il sera soumis à l'ASN avant fin 2016, la consultation du public se déroulera début 2017, pour une finalisation mi-2017.

2. Qualification of a CFD code for reactor applications

Ulrich Bieder (CEA)

Ulrich Bieder et son groupe travaillent au Commissariat à l'énergie atomique à Saclay. Après la présentation théorique de Franck Dubois, Ulrich va aborder un cas réel.



Il présente Trio, le code de calcul des accidents. D'abord, le groupe a analysé les scénarios Main Stream Line Break (MSLB). Une fuite existe sur le générateur de vapeur qui est isolé par une valve, mais l'eau sort par la fuite. Il y a une dépressurisation très rapide et un refroidissement. Tout le circuit est impacté. La réaction en chaîne peut devenir critique. Normalement ce type d'accidents est maîtrisé mais il faut vérifier que tout va bien. Sur l'unité 6 de la centrale bulgare de Kozloduy, il y a eu des expériences durant les tests de démarrage. Ils ont été utilisés pour valider les modèles. Il est aussi possible de vérifier ce qu'on a fait il y a dix ans. Toutes les données géométriques du réacteur ont été fournies, ce qui est rare. Le circuit de l'écoulement est formé de 4 boucles, de barres perforées de 1344 trous, de colonnes. Le test s'est déroulé en 3 étapes. 1/ toutes les pompes étaient en plein régime à 9,36% de la puissance nominale. 2/ on a isolé le générateur de vapeur, mais sans refroidissement. 3/ après 1800 sec, recalcul de la distribution de température à la sortie du cœur. Ils ont calculé le stress de Reynolds par l'hypothèse de Boussinesq. Pour les 4 boucles, ils connaissaient les vitesses à l'entrée et à la sortie ainsi que les températures. Cela avait été mesuré sur d'autres réacteurs. Les conditions étaient ainsi connues.

Quels sont les effets importants et quelle finesse de maillage ? L'important est l'écoulement. Les nombres de Reynolds sont énormes (31 millions pour le flux, 70 millions pour l'impact du flot sur la paroi). Le maillage a été affiné près des bords en regardant ce que cela changeait sur le calcul. L'erreur restait inférieure à 10%. Le même

calcul a été effectué avec différents trous. Le meilleur était des trous de 4 mm pour avoir des erreurs de 10%. Enfin, l'impact de l'écoulement sur la paroi a été simulé, mais l'erreur restait toujours supérieure à 50%, du fait de la turbulence.

L'objectif du travail d'Ulrich Bieder est de qualifier le code pour tous les réacteurs. Il indique qu'il faut faire des tests séparés pour différents cas et aussi des tests intégraux et des tests à des échelles réduites comme le réacteur Konvoi (circuit primaire à 1/5). Avec un maillage initial de 50 000 le groupe a augmenté jusqu'aux 350 000 cellules de TrioCFD. Le code tourne en 2 à 3 jours sur les ordinateurs. Cela a donné la distribution de températures avec des parties plus ou moins chaudes. Et a été comparé aux mesures. L'erreur globale est inférieure à 1°C, le maximum de température à moins de 2°C. Les coefficients de mélange sont aussi calculables. Les calculs sont très proches des mesures expérimentales. Dernières comparaisons, la distribution des vitesses dans le cœur et les pertes de pression. Là il y a une surestimation des calculs (6 bars au lieu de 3,8).

Le modèle CFD est donc valable pour la distribution des températures et des vitesses, mais pas pour les pressions. Il faut donc améliorer tout ça.

3. Prise en compte de l'incertitude de l'arithmétique flottante dans un processus de V&V en utilisant Verificarlo

Christophe Denis (ENS - Cachan)

Christophe Denis, de l'école Normale Supérieure de Cachan, présente des cas d'usage de VVUQ et, entre autre, l'outil Verificarlo, supporté par les Investissements d'Avenir.



Lorsqu'on fait une simulation numérique, il y a plusieurs sources d'erreurs, comme l'utilisation de l'arithmétique flottante, les algorithmes numériques, les modèles mathématiques. Il prévient qu'un colloque « modélisation : succès et limites » aura lieu au CNRS le 6 décembre sur différents sujets abordés lors de ce séminaire.

L'arithmétique flottante revient au goût du jour pour les codes HPC. On peut donc avoir des codes avec les mêmes données d'entrée et des résultats différents. Si un code sensible est en Fortran et doit devenir en C++, cela va poser des problèmes. Les architectures de plus en plus complexes vont aussi intervenir, même si il n'y a pas de bugs. Dans une thèse que Christophe Denis dirige, il s'agit de voir tous les éléments qui interviennent dans les sources d'erreurs et quelle est la source majeure d'approximation. Une des sources est l'arithmétique flottante, qui est le meilleur compromis entre la grandeur des nombre et la précision. L'arithmétique flottante a été utilisée pour un système de guidage de missiles Patriot : l'interception n'a pas eu lieu. En HPC, on perd des propriétés arithmétiques car on passe de l'ensemble \mathbb{R} des nombres réels à une quantité discrète de nombres flottants.

Il faut pouvoir reproduire des résultats surtout pour éviter les bugs. Dans le logiciel de mécanique des fluides à surface libre Telemac, certains bugs trainaient ainsi depuis 15 ans. Le nombre de signes significatifs est important mais moins que la dispersion du résultat. Il faut trouver un bon compromis entre la performance et la précision. C'est

pour ça qu'a été lancé Verificarlo afin de démocratiser la vérification de la précision numérique sans l'aide d'experts.

L'arithmétique de Monte-Carlo utilise le fait d'ajouter un bruit uniforme à une valeur. On passe d'une approche déterministe à une approche probabiliste. En lançant plusieurs fois le code, on estime la dispersion et le nombre de chiffres significatifs. Verificarlo est basé sur LLVM qui prend le code source, le compile et obtient un exécutable qui donne l'estimation de la précision numérique. Il y a une semaine, la cellule de valorisation du CNRS a fourni un ingénieur pour valoriser le produit.

Un exemple du concept est fourni par W. Kahan en 1966. Comme on n'a pas la solution exacte, Verificarlo prend 1000 exemples et calcule la dispersion. Le code de calcul industriel Telemac a ainsi été utilisé pour modéliser les écoulements. Une collaboration va être initiée avec la météorologie suisse. Avec Verificarlo, on peut diminuer d'un facteur 2 le stockage de résultats météorologiques. Une autre collaboration est lancée avec EDF R&D et CMLA sur le code Aster écrit en fortran, C et Python. Il y a 1 500 000 lignes de code et 2000 lignes de tests. Dernière activité du groupe, regarder la non-reproductibilité d'Europlexus, développé par le CEA pour de la simulation dynamique. Exemple, avec le flambage d'une poutre fragilisée ou non. Verificarlo montre que les trajectoires peuvent être différentes. La direction du flambage est dominée par la précision numérique.

En conclusion, le contrôle de la précision numérique devient important en utilisant des ressources HPC pour expliquer la non-reproductibilité numérique. Les futurs travaux du groupe concernent l'ajout d'intervalles de confiance, mais aussi de mieux comprendre comment exploiter les données de Verificarlo. Il faut aussi développer une méthodologie pour voir comment identifier les opérations.

4. CFD industrial approach for space systems design

Pierre Brenner (Airbus Safran Launchers)

Pierre Brenner, d'Airbus Safran Launchers, travaille dans le domaine astronautique. Avec leur outil, il traite de l'allumage des moteurs, la séparation des étages, la réentrée atmosphérique. Ariane 5 a été dimensionnée par tests ou par des modèles réduits sur des précédents lanceurs ; La sonde Huygens conçue entre 1991 et 1997 a bénéficié de tests en soufflerie et de tests d'artillerie. Pour Ariane 6, qui sera lancée à partir de 2020, le groupe espère diminuer les tests en soufflerie d'un facteur 3. Il faut donc des algorithmes stables, physiques, vérifiés et validés. Pour l'industriel, il faut que le code soit facile à utiliser, efficace et qu'il dure longtemps.



La vérification, qui consiste en la convergence en maillage. Doit rendre compte du bon fonctionnement des modèles (convection, diffusion, production, couplages). L'arithmétique flottante est à prendre en compte comme la non-régression quand on fait évoluer le code. Par exemple, le groupe vérifie que le modèle fonctionne toujours même si la grille est tordue ou si les vortex sont en mouvement. Des tests plus complexes comme la cuillère d'Astier sont lancés.

La vérification utilise depuis 2000 la bibliothèque CADNA. L'arithmétique flottante fournit des résultats différents sur différents nœuds même si le maillage réduit converge.

La validation industrielle prend du temps de calcul. Tout dépend des phénomènes. S'ils sont stationnaires, cela prend de 15 mn à 1 jour. S'ils sont non-stationnaires, la VLES prend entre une semaine et un an. Le LES prendrait toute la vie. Les flux aéronautiques sont comparés à des résultats bien documentés de la Nasa. Cela devient plus complexe pour Ariane 5. Lors des séparations, les interactions des propulseurs avec le corps

central sont encore plus complexes car ce sont des phénomènes non stationnaires. Il faut des mailles très fines. En 1995 Euler contenait 90 000 cellules. En 2016, Urans en contient 14,5 millions. Le dimensionnement du pas de tir d'Ariane 5 a été effectué par comparaison avec des modèles réduits. C'est la même chose pour les militaires pour des tirs de missiles.

Ces simulations sont prédictives. L'équipe a ainsi pu mettre en évidence un bruit caractéristique des souffleries.

Pierre Brenner conclut sur le travail à faire. En ce qui concerne la vérification, tout va bien pour le calcul séquentiel, mais le calcul parallèle pose encore des problèmes. Pour la validation, le Very Large Eddy (LES) est un travail de titan.

5. Réduction de modèles pour des problèmes d'optimisation et d'identification en calcul des structures

Piotr Breitkopf (UTC)

Piotr Breitkopf, du laboratoire Roberval de l'université technologique de Compiègne (UTC), intervient sur la réduction des modèles pour des questions d'optimisation en calcul de structures.



Il s'intéresse au paramétrage des modèles. Par exemple, pour une famille d'avions, comment trouver le plus petit nombre de paramètres pour décrire toutes les formes. Il y a deux sortes de problèmes : soit l'identification d'un modèle existant, soit l'interpolation pour trouver l'intermédiaire entre deux types d'avions de la famille. Avec la CAO, on aura des milliers de variables non indépendantes. Ce n'est pas possible. Avec un exemple dans l'automobile, mais Piotr Breitkopf s'intéresse aussi à des formes naturelles comme le foie humain, l'analyse des sensibilités montre que des formes ne sont pas possibles dans 97% des cas. Il faut définir un espace des formes admissibles. Mais la taille de cet espace est très élevée. Il faut la réduire. Le postulat est que toutes les formes admissibles appartiennent à un espace réduit dont les géodésiques donnent les bons résultats. Pour identifier une forme, on va mesurer la distance dans cet espace de formes de l'avion à identifier avec les formes réelles. Cela existe déjà en robotique ou en vision. Cela a servi au groupe.

Les outils utilisés sont la représentation de surface par la méthode de réglage de niveau (level set), qui donne des surfaces approchées. Chacune des formes fait partie d'un ensemble représenté par des vecteurs colonnes qui correspondent à des valeurs du level set. C'est la méthode POD (Proper Orthogonal Decomposition). Chaque objet correspond à un point de l'espace des formes. Cela donne un nuage de points à travers lequel on fait

passer une surface. Pour obtenir une forme cible, pas besoin de construire plusieurs formes mais un petit ensemble qui éloigné d'une certaine distance de la forme choisie. Cela a été fait sur un emboutissage de pièces automobiles. Il s'avère qu'un seul paramètre, inconnu car composé, permet de trouver toutes les formes admissibles. Sur des empreintes d'une pièce scannée, on peut trouver l'ensemble des formes pour identifier les bonnes formes. A chaque point de l'espace de conception correspond un point dans l'espace des formes. On s'aperçoit que le simulateur sert de lisseur des formes pour converger vers la bonne forme.

6. Combining historical eyewitness accounts on tsunami-induced waves and numerical simulations for getting insights in uncertainty of source parameters

Jérémy Rohmer (BRGM)

Jérémy Rohmer, du BRGM, aborde la question de la gestion des incertitudes dans la simulation des tsunamis.



Ce phénomène peut être de nature sismique comme celui de Fukushima en 2011, mais aussi une conséquence de mouvements de terrain comme à Nice en 1979 ou volcanique. Un séisme est la rupture brutale d'une faille tectonique. Cette action agit sur le plan d'eau. La vague va se propager. Lors de l'approche aux côtes, il y a amplification de l'onde. Une rupture à 4000 m de profondeur crée une vague de 213 km de longueur d'onde. Un séisme de 9,4 au Chili en 1960 a provoqué 10 heures plus tard un tsunami à 1000 km de là. La source majeure d'incertitudes est formée des paramètres de la source. L'observation d'événements passés donne des indications. Exemple, en 1887, en Italie, dans la mer ligurienne, non loin de Nice s'est produit un séisme. Selon l'emplacement de l'épicentre (localisation, profondeur), les simulations donnent une taille de faille cassée différente et des mouvements d'eau différents. Le modèle a une maille de 2 650 000 cellules. 300 simulations différentes de 30 minutes sont comparées aux observations historiques (marégraphes, dégâts), mais certaines de ces observations sont indirectes (journaux, lettres). Il apparaît que les simulations surestiment la vague à Marseille et la sous-estiment en Italie. Comment améliorer les résultats ? Avec les 300 simulations générées, l'équipe de Jérémy Rohmer construit un méta-modèle de type krigeage. Cela donne des indicateurs de qualité pour valider la méthode. Dans cette démarche d'inférence bayésienne des lois de probabilités, ils considèrent que la hauteur observée

est égale à la hauteur simulée à laquelle ils ajoutent un biais. Il est difficile d'estimer la vraisemblance bayésienne. Les 1 000 000 résultats seront filtrés pour ne garder que les plus proches des observations. 1000 sont ainsi enlevés. La proximité de ces résultats est donnée par une approche statistique pour donner une loi uniforme. Cela donne de meilleurs résultats sur Marseille, un peu moins sur Gènes. Mais on passe d'un ensemble de résultats très divers à un pic centré sur des valeurs précises. Sur la magnitude du séisme généré, cela marche pas mal. Mais il apparaît que le paramètre de biais a une influence certaine près de la source, moins au-delà.

Reste à travailler sur les incertitudes générées par l'utilisation d'un méta-modèle.

7. Les apports de l'écosystème Go pour les challenges de l'ingénierie d'architectures clou microservices

Eric Savin (ONERA)

Eric Savin, de l'ONERA, continue sur les méta-modèles, mais polynomiaux. Comment se propagent les incertitudes dans un code de CFD ?



En mécanique des fluides, Eric Savin privilégie le non intrusif. Il n'entre pas dans les modèles mais construit par-dessus des méta-modèles. Le méta-modèle polynomial est celui qui s'approche le plus de l'ensemble des paramètres considérés comme incertains. Il faut discrétiser le problème en utilisant une règle de quadrature de Gauss, afin d'obtenir un problème de moindres carrés classique. En connaissant une base orthonormée, on peut construire le chaos polynomial. Et avoir des moyennes, des écarts-types, d'autres probabilités. Il faut donc une quadrature et une évaluation du modèle en ces points de quadrature. Mais si le nombre de paramètres incertains est grand, le temps de calcul devient exorbitant. Il faut chercher des valeurs qui minimisent la plupart de ces paramètres. C'est la technique du *compressed sensing*. Il faut choisir des valeurs de façon aléatoire afin de garantir une plus grande précision. Cela fait intervenir un paramètre de cohérence et un paramètre de parcimonie. Eric Savin note que cela marche pour des solutions exactes, mais pas avec du bruit. Mais il existe des solutions par des techniques de *sparse reconstruction*. Cela a été appliqué à des trainées aérodynamiques d'un profil avec un modèle de turbulence empirique. Le calcul des coefficients de trainées donne bien les résultats des observations. La règle de quadrature a été faite de 3 façons : avec 1000 points de calcul pour 8 paramètres (165 polynômes), 200 points pour 6 paramètres et 80 points pris au hasard. On retrouve bien le même type de résultats. Cela veut dire qu'il n'y a pas beaucoup d'interactions entre les paramètres. C'est logique.

Un autre cas traité est en 3D. 10 paramètres incertains dont le nombre de Mach, le coefficient de portée et 8 paramètres structuraux (flexion, torsion). En sortie, les coefficients de trainées et les déformations des ailes. Les paramètres sélectionnés aléatoirement suivaient une loi uniforme. Là encore on se rend compte que prendre 10 paramètres n'est pas justifié et dispendieux en temps. Il suffit de 3 paramètres pour retrouver les mêmes résultats.

8. SICODYN research project: variability and uncertainty in structural dynamics

Sylvie Audebert (EDF)

Sylvie Audebert travaille à EDF lab Paris-Saclay. Elle présente le projet Sicodyn (pour des SIMulations crédibles via la CORRélation calculs-essais et l'estimation d'incertitudes en DYNAMique des structures) qui réunit des institutions académiques et des industriels (PME, PMI, grands groupes).



Le projet est structuré en lots (1 : état de l'art ; 2 : observation de la variabilité expérimentale, 3 : observation de la variabilité numérique totale. Puis 4 : corrélation tests-analyse. Cela va de la modélisation à grande échelle, à une estimation des incertitudes, et aux mesures. C'est appliqué à un cas industriel : une pompe Sulzer installée dans une centrale thermique. Le groupe s'intéresse aux modes propres. La pompe est décomposée en 8 composants assemblés (arbre, corps de palier, support de palier, etc.). Le tout repose sur un support métallique. En 2013, des Américains de Los Alamos ont étudié une structure plus simple. Avec différents essais pour le boulonnage et la partie numérique, 7 groupes d'étudiants ont développé des modèles. La différence entre les essais et les calculs était grande. Les moyennes des modèles et des essais sont aussi très différentes. Le biais est essentiellement lié à la condition limite. Avec une nouvelle structure et deux façons de représenter les objets boulonnés, la variation numérique est supérieure à celle des expériences. Le groupe Sicodyn n'a pas commencé par la structure complète. Cela s'est fait progressivement. D'abord, les benchmarks ont été réalisés en aveugle. Les participants ont calculé la représentation des composants en condition libre-libre, puis avec les composants connectés, mais pas la pompe entière et enfin la pompe connectée à ses tuyauteries. La variabilité des composants seuls libre-libre dépend du nombre de modes propres. Pour la pompe assemblée mais déconnectée, la variabilité est plus grande. 4 partenaires sur 6 ont calculé des modes non identifiés expérimentalement. Il est donc difficile d'obtenir des calculs prédictifs. Au sujet de la

corrélation calculs-expériences, il s'est avéré que des modes calculés n'avaient pas été trouvés par les expériences, mais retrouvés après indication. Plus la structure est complexe, plus l'écart calculs-essai est grand.

Sylvie Auberge revient ensuite sur l'incertitude numérique totale que le projet a tenté de prendre en compte. Sa quantification provient des paramètres (méthodes probabilistes coûteuses en temps de calcul car ce sont des simulations de Monte-Carlo sur un méta-modèle et théorie arithmétique des intervalles) et du modèle (référence bibliographique). La méthode des intervalles semble meilleure et les incertitudes sur les paramètres du modèle semblent prépondérantes.

Dernière méthode testée, la théorie de la méconnaissance de l'ENS Cachan. C'est une théorie des intervalles dont les bornes sont probabilisées. Cela a été testé sur 3 sous-ensembles.

Pour aller plus loin, Sylvie Auberge insiste sur la démarche couplée numérique-expérimental, la prise en compte simultanée de la fidélité aux données expérimentales et de la robustesse des incertitudes. Elle finit par un vœu pieux : l'élaboration de méthodes simplifiées d'estimation a priori des incertitudes.