

Amphithéâtre Becquerel, École Polytechnique, Palaiseau

ROC & ROM

Reduced Order of Complexity & Reduced Order of Model

La simplicité à toute épreuve

Judi 23 octobre 2014



Coordination scientifique :

- **Christophe Calvin** (CEA/DEN)
- **Thiên-Hiệp Lê** (ONERA/DSNA)
- **Christian Tenaud** (CNRS/LIMSI)
- **Philippe d'Anfray** (CEA)



Renseignements, programme ... <http://www.association-aristote.fr>

Sommaire

1	Programme de la journée	1
1.1	Introduction	1
1.2	Programme, 23 octobre 2014	2
1.3	Speakers, chairs, committee members and others	3
2	Compte-rendu de la journée	5
3	Résumés des interventions	13

Chapitre 1

Programme de la journée

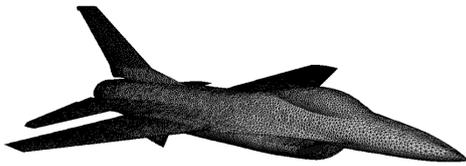
1.1 Introduction

La saison 2014 a été initialisée par une conférence sur les équations de Navier-Stokes, la première d'un cycle de trois conférences, qui se terminera par « Accréditation de la R&D », en interpolant par « Reduced Order of Complexity & Reduced Order of Model », ROC & ROM, objet du présent séminaire.

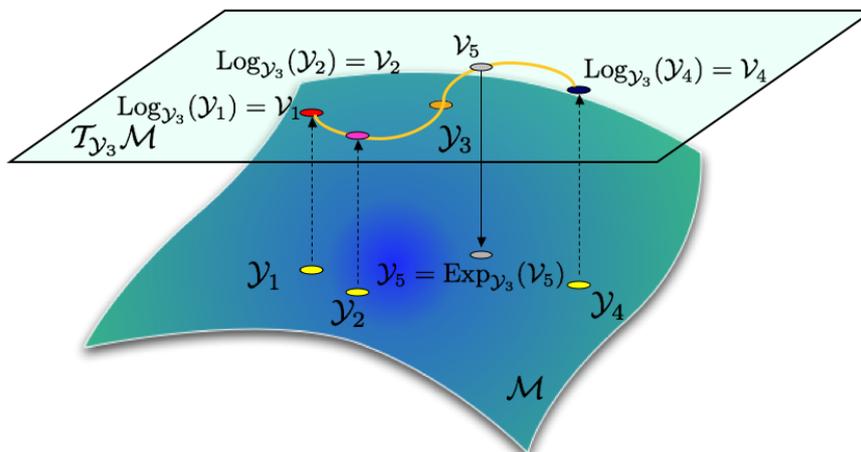
La résolution numérique des équations de Navier-Stokes est un exemple de complexité, et constitue à ce jour « du Lourd », et ce malgré les progrès exponentiels du HPC, mobilisant ainsi les ressources informatiques du monde entier, de GENCI et de PRACE, pour ce qui est des acteurs de proximité.

La complexité, abordée de manière réductionniste, selon Descartes, ou de manière holistique, selon Smuts, est présente dans la vraie vie et constitue un des défis sociétal, à l'horizon 2020.

Y a-t-il un pilote dans l'avion ?



Lors de ce séminaire, plusieurs regards éclaireront notre connaissance, avec la participation d'acteurs de divers horizons.



1.2 Programme, 23 octobre 2014

08:30–09:00	<i>Accueil café</i>
09:00–09:10	Thiên-Hiệp Lê (ONERA), Philippe d'Anfray (CEA), Aristote
09:10–09:30	Jean-Denis Muller (ONERA/DTIM), Présentation de la journée
Animateur de session : Christophe Calvin (CEA/DEN)	
09:30–10:00	Jean-Marc Martinez (CEA), Méthodes de krigeage et méthodes à noyaux utilisées pour la définition de méta-modèles
10:00–10:30	Manuel Dauchez (Univ. Reims Champagne-Ardenne), Simulations de protéines élastomères : que peut apporter le HPC dans la réduction de complexité
10:30–11:00	<i>Pause café</i>
Animateur de session : Christophe Calvin (CEA/DEN), <i>cont.</i>	
11:00–11:30	Olga Mula Hernandez (RWTH Aachen University) <i>et al.</i> , A coupled parareal reduced basis scheme
11:30–12:00	Christophe Prudhomme (Unistra/IRMA) <i>et al.</i> , Méthode des bases réduites pour des problèmes multi-physiques non-linéaires
12:00–13:20	<i>Buffet</i>
Animateur de session : Christian Tenaud (CNRS/LIMSI)	
13:20–13:50	Bern Noack (Institute PPRIME) <i>et al.</i> , Cluster-based reduced-order modelling of shear flows
13:50–14:20	Yohann Duguet (LIMSI-CNRS) <i>et al.</i> , Un modèle de couche limite transitionnelle basé sur un automate cellulaire probabiliste
14:20–14:50	Bérengère Podvin (LIMSI-CNRS), Modèles réduits et turbulence développée : turbulence de paroi et convection naturelle
14:50–15:50	Lionel Mathelin (CNRS/LIMSI), Une stratégie de réduction de modèle pour le contrôle d'écoulements expérimentaux en boucle fermée
15:20–15:30	<i>Pause</i>
Animateur de session : Thiên-Hiệp Lê (ONERA/DSNA, Aristote)	
15:30–16:00	Nicolas Vayatis (ENS Cachan), Optimisation séquentielle et application au design d'expériences
16:00–16:30	David Ryckelynck (CdM Mines ParisTech), Mécanique partielle des matériaux pour les structures
16:30–17:00	Dimitri Bettebghor (ONERA/DADS), Spectrally accurate approximation of eigenvalue functions through overlapping radial basis function interpolants for structural optimization
17:00–17:30	Vivien Mallet (INRIA), Réduction et émulation d'un modèle de qualité de l'air pour la quantification d'incertitude
17:30–18:00	Vuong Thuy-Thi-Thanh, Yves Tourbier (Renault), Réduction d'un modèle de crash
18:00	<i>Conclusions, fin du séminaire</i>

1.3 Speakers, chairs, committee members and others



Olga



Manuel



Jean-Marc



Christophe



René Descartes



Bernd



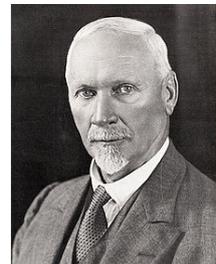
Yohann



Bérangère



Lionel



Jan Smuts



Nicolas



David



Dimitri



Vivien



Thuy-Thi-Thanh



Thiên-Hiệp



Philippe



Jean-Denis



Christophe



Christian

Chapitre 2

Compte-rendu de la journée

Ce compte-rendu a été réalisé par Jacques-Olivier Baruch pour l'agence Umaps, « Communication de la recherche et de l'innovation », <http://www.umaps.fr>.

ROC & ROM

Reduced Order of Complexity & Reduced Order of Model

La simplicité à toute épreuve

Avant l'entrée en lice des conférenciers, Thiên Hiệp Lê (Onera), membre de l'association Aristote, précise aux 43 présents que ce séminaire est le deuxième d'une série de trois, après « L'équation du millénaire » et avant « L'accréditation de la R&D » le 19 décembre 2014. Il signale que les orateurs ont été sélectionnés selon trois critères. Le premier est un critère naturel, comptant pour 50%, c'est le *Logos* (ceux qui savent). Il est à égalité avec l'*Ethos* (ceux qui présentent bien) et le *Pathos* (empathie avec les orateurs, même par courriel). Trois fois 50% font 150%... « pas si anormal que ça », déclare-t-il « c'est une approche holistique, c'est-à-dire que la somme fait plus que le tout. Descartes doit se retourner dans sa tombe ». Le titre de la journée « Roc&Rom » est une erreur. Cela aurait du être « Rom on the Roc », mais l'idée est la même. Comment simplifier la complexité ? La réponse est : en utilisant des modèles réduits (*Reduced Order of Models*) ou en réduisant la complexité (*Reduced Order of Complexity*).

Pierre Léonard (Inra) explique le fonctionnement d'Aristote. C'est une association avec des adhérents, un conseil d'administration, un bureau et un comité de programme de cinquante personnes dont une quinzaine se réunissent environ une fois par mois pour proposer le programme de l'année. Il en sort des thématiques dans l'air du temps mais avec une vision d'avance. Ce n'est pas la peine d'étudier ce qui se fait aujourd'hui, mais ce qui émerge. Le comité était piloté par Philippe d'Anfray (CEA) puis aujourd'hui par Pierre Léonard. Régine Lombard s'occupe de l'administration.

Jean-Denis Muller (Onera/DTIM) présente la journée. Il a créé à Saclay une équipe dont la question était d'étudier ces questions de réduction de modèles. Il a organisé une conférence européenne (plateforme Afia) à Chambéry en 2011, avec un discours inaugural de Jean Terme (CEA). Ce discours, préparé par une collaboratrice, n'était pas adapté. On a réduit le discours (le modèle) à deux ou trois mots. Le discours a été un succès. Ce qui prouve que la réduction de modèles peut améliorer la compréhension des choses.

Jean-Marc Martinez (CEA)

Apport des modèles de krigeage en simulation numérique

Jean-Marc Martinez explique que quand on fait de la simulation, on est confronté à des milliers de données. Le krigeage est une méthode développée en géostatistique par Danie Krige et Georges Matheron à partir d'études minières en vue de modélisations de puits. Mathématiquement, on fait de la prédiction par un estimateur linéaire de variance minimale. C'est un modèle probabiliste où les prédictions sont vues comme la réalisation d'un processus gaussien. On remplace le gros code de calcul par ce modèle et on donne un intervalle de confiance. Le méta-modèle est amélioré.

Le processus gaussien est caractérisé par sa fonction moyenne et sa fonction de covariance, afin de voir si deux expériences sont corrélées. On peut émuler, simuler des fonctions déterministes et les décrire, même pour des fonctions multi dimensionnelles, complexes, plus ou moins régulières. Exemple : avec 6 points d'observation, on va simuler des fonctions gaussiennes qui passent par ces points et on regarde la fonction la plus probable et la fonction de corrélation avec ses hyper-paramètres. Pour en savoir plus, Jean-Marc Martinez fait référence aux travaux de Chantal de Fouquet www.gdr-mascotnum.fr/chorusapr14.htm ou à la thèse de François Bachoc, soutenue à Paris en octobre 2013.

Avec l'algorithme EGO (Efficient Global Optimisation), on fait la moyenne sur l'intervalle et on rajoute un point calculé. Puis on recommence à trouver une courbe prédictive et on cherche à minimiser la différence entre courbe observée et courbe prédite. Il est important de converger vite.

Le krigeage s'intéresse entre écarts entre calcul et expériences. Il y a des incertitudes aléatoires et des incertitudes épistémiques sur la connaissance du modèle. Cette dernière est représentée par un processus gaussien. La première étape est la calibration bayésienne. C'est appliqué par exemple à la perte de pression due à la traversée d'un élément combustible dans un cœur de réacteur nucléaire. Le krigeage est donc une piste d'amélioration d'un code de calcul en le complétant par un modèle statistique inféré à partir de résultats expérimentaux. Il faut avoir assez de résultats expérimentaux et bien choisir la fonction de covariance et les critères d'analyse de la robustesse des prédictions afin de ne pas faire d'extrapolation abusives.

En ce qui concerne la validation des simulations, vu leur complexité, il faut contrôler les milliers de calculs. Avec la méthode de validation croisée Leave-One-Out sur 100 données, on en utilise 99 et on refait le calcul 100 fois. Un mauvais calcul va présenter probablement une erreur importante. La distribution statistique des erreurs standardisées doit être proche de la distribution normale centrée réduite. On fait un krigeage, on standardise les erreurs et on filtre les simulations pas très probables (3 sigma). Ça a été fait sur un code thermomécanique déterministe simulant le comportement d'un combustible. Le krigeage a fait apparaître un bruit de mesure non physique. Il a été expliqué par la méthode utilisée par le mailleur du préprocesseur.

En conclusion : la réduction de la complexité des codes par des méthodes de substitution ne se limite pas à la réduction des temps de calcul. Le krigeage complète une modélisation physique et détecte des erreurs de calcul.

Manuel Dauchez (Université de Reims Champagne-Ardenne)

Simulations de protéines élastomères : que peut apporter le HPC dans la réduction de complexité

Manuel Dauchez travaille avec des biologistes et des médecins sur le cancer ou le vieillissement des cellules. Il tente de comprendre comment cela se passe dans les protéines, des objets complexes contenant entre 10^4 et 10^5 atomes. Où sont les points d'intérêt dans ces objets qui interagissent entre eux et se déforment ?

Il y a des protéines fibreuses très intéressantes. Par exemple celle de la soie des araignées, le muscle des coquilles Saint-Jacques ou les protéines entre les cellules, qui sont une sorte de ciment. C'est un système où il y a de l'élastine, une macromolécule élastomérique qui possède des propriétés remarquables

mais n'est actuellement que peu étudiée dans sa totalité étant totalement hydrophobe et ne fonctionnant pas sans eau ! En réduisant l'objet on a fait des modèles qui représente bien l'élasticité. L'élastine a un précurseur, la tropoélastine (762 acides aminés).

Pour la décrire, Manuel Dauchez a utilisé une méthode de réduction de complexité, puisque de nombreux motifs sont répétés et imbriqués. Ces peptides fabriquent aussi de l'amyloïde. Pourquoi, dans différentes conditions de pH ou de pression, on passe de l'élastine à l'amyloïde ? En réduisant au maximum, on prend un peptide dans une forme donnée avec de l'eau autour et on analyse la production. Le groupe a montré que le peptide passe d'une forme repliée à une forme étendue. Le rôle de l'eau semble important dans la plasticité et l'élasticité. Avec plusieurs couches d'eau dans les simulations, il n'y a plus de liaisons hydrogène dans le peptide. Ces peptides peuvent donc changer suivant les paramètres. Reste à refaire le travail avec 1 000 peptides, mais on ne sait pas le faire. Si c'était le cas, on n'aurait plus besoin des biochimistes.

Christophe Prudhomme (IRMA, Université de Strasbourg)

Méthode des bases réduites pour des problèmes multi-physiques non-linéaires

Christophe Prudhomme travaille entre autres avec le laboratoire national des champs magnétiques intenses de Grenoble sur les méthodes des bases réduites.

Le groupe veut comprendre le refroidissement de composants thermiques et les écoulements dans le cas des champs magnétiques intenses. Le laboratoire de Grenoble fournit des champs au delà de 24 teslas. Il s'intéresse à des champs continus (36 teslas) fournis par des aimants constitués de 14 hélices en cuivre concentriques percées en leur milieu d'un trou où a lieu l'expérience.

Il faut modéliser cet aimant et son refroidissement à eau. La partie critique est la partie thermoélectrique. Cela induit des forces de dilatation sur la structure et des forces de type Lorentz dues au champ magnétique. On a ici un couplage de modèles multi-physiques non linéaires. Le modèle est complet sur une hélice et validé partout sauf sur la partie thermique, mais le maillage de la structure (14 hélices) est incomplet. La géométrie des isolants est complexe. Le code est prêt (quelques dizaines de millions de degrés de liberté). Il y a beaucoup d'incertitudes. On a besoin de méthode de réduction d'ordre et de quantifier les erreurs de résultats.

Le logiciel libre Free1++ permet de faire de gros calculs. Le laplacien est exprimé en C++. Certains paramètres dépendent des autres, alors que d'autres sont indépendants. On définit l'espace des phases et on trouve des solutions approchées par interactions de Newton ou de Picard. Mais on n'arrive pas à trouver des fonctions de bases réduites.

La concurrence avec les autres laboratoires de physique oblige à chercher des améliorations à la machine. Par exemple est-il possible d'augmenter le champ de 1 tesla en augmentant la température de 40°C à 60°C ? La méthode des bases réduites fonctionne avec l'analyse de la convergence (EIM, RB) sur une dizaine de bases. Reste à augmenter ce nombre. Pour finir, Christophe Prudhomme avertit que la méthode peut aussi être appliquée à l'aérothermie (équations de Navier-Stokes)

Olga Mula Hernandez (RWTH Aachen University)

A coupled parareal reduced basis scheme

L'algorithme pararéel en temps est une méthode qui permet d'accélérer les calculs. Il consiste à utiliser deux propagateurs qui à partir d'une valeur initiale à un temps t , prennent respectivement pour l'un, une approximation fine et pour l'autre une approximation grossière de la solution à un temps $t+x$. L'algorithme propose de combiner ces deux propagateurs de façon à construire une séquence qui converge vers la solution fine.

Durant sa thèse, Olga Mula a développé sur cette base un solveur neutronique de cinétique transport 3D en géométrie déstructurée avec une discrétisation spatiale par éléments finis (projet Minaret). Ce code permet de connaître de façon très précise l'état du cœur du réacteur nucléaire en cas d'accident grave.

Le schéma a consisté à limiter le nombre d'itérations internes pour chaque pas de temps du solveur fin et d'atteindre la convergence au cours des itérations parallèles.

Bernd Noack (institut PPRIME, Université de Poitiers)

Cluster-based reduced-order modelling of shear flows

Quand on regarde un fluide, on se demande quels sont les mécanismes physiques qui guident l'évolution du flux vers la turbulence ?

Le point de départ sont les équations de Navier-Stokes. Les solutions sont approchées par des modèles POD-Galerkin, car elles sont numériquement insolubles. De déterministe, le problème devient probabiliste. Les données sont organisées en amas (cluster-based reduced-order model ou CROM) afin qu'il y ait une similarité entre les données regroupées, puis on analyse les amas qui sont représentés par ce qu'on appelle un centroïde. On assigne alors aux différents objets l'amas qui leur correspond le plus. Ce qui fait bouger la position du centroïde et la forme de l'amas. On recommence jusqu'à ce que les amas aient convergé. Le nombre d'amas doit être défini par avance.

Les applications du CROM concernent l'identification systématique des mécanismes physiques des dynamiques complexes. Pour en savoir plus : <http://ClusterModelling.com>

Yoan Duguet (LIMSI, CNRS)

Un modèle de couche limite transitionnelle basé sur un automate cellulaire probabiliste

La compréhension et la prédiction de la transition vers la turbulence à proximité d'une paroi sont cruciales pour tous les phénomènes aéronautiques. Cependant les écarts entre les échelles mises en jeu rendent les simulations numériques et expériences difficiles, ce qui suggère le développement de modèles réduits permettant de valider rapidement certaines hypothèses physiques.

Le sujet est une collaboration internationale entre Stockholm, Marburg et Orsay. L'idée est d'étudier comment s'écoule l'air le long des ailes d'un avion afin qu'il y ait moins de *drag* ce qui diminue les performances ; et comment se passe la transition entre état laminaire et état turbulent.

Les fortes fluctuations statistiques observées lors de la transition reflètent en fait la coexistence spatiale entre état laminaire et état turbulent. Le modèle réduit adopté par Yoan Duguet et son équipe consiste donc en une réduction de la dynamique à un automate cellulaire bidimensionnel, dont les règles de couplage sont probabilistes et validées par comparaison à des simulations aux grandes échelles. A noter, le problème délicat de la modélisation des phénomènes de nucléation de poches turbulentes à la paroi, lorsque l'écoulement est soumis à une turbulence résiduelle en entrée.

Bérengère Podvin (LIMSI, CNRS)

Modèles réduits et turbulence développée : turbulence de paroi et convection naturelle

Les phénomènes turbulents sont caractérisés par des grandes disparités d'échelles qui interagissent selon des mécanismes intermittents dont l'origine est largement inexpliquée. Les modèles actuels sont limités. Ils reposent sur des approches linéaires. L'approche POD-Galerkin est intéressante. Elle consiste à extraire des structures par décomposition orthogonale (POD) et les analyser.

Sur la turbulence de paroi, par exemple, le nombre de Reynolds d'un avion de ligne est de 10^7 . La trainée est 50% visqueuse. 1% de réduction de trainée représente 400 000 L de kérozène/an en moins. Le modèle réduit POD montre des translations dans les directions horizontales et des réflexions dans le plan vertical. Il évite les simulations coûteuses de la zone de paroi.

Autre exemple, la convection naturelle des océans dont le nombre de Reynolds est de 10^{14} . La convection est le résultat de l'action concomitante de l'évaporation et du gain d'énergie due aux radiations solaires. Les simulations de la dynamique des panaches montrent que la circulation à grande échelle se renverse de façon intermittente à cause des panaches thermiques à petite échelle.

L'approche POD-Galerkin capture certains aspects essentiels des interactions entre les structures énergétiques et assure la conservation des symétries statistiques de l'écoulement.

Lionel Mathelin (LIMSI, CNRS)

Une stratégie de réduction de modèle pour le contrôle d'écoulements expérimentaux en boucle fermée

Lionel Mathelin présente une technique d'estimation pour le contrôle en boucle fermée compatible avec une implémentation expérimentale (K-SVD). La méthode repose sur une stratégie en ligne hors ligne où une base d'approximation est apprise hors ligne en utilisant d'une part la connaissance des champs de l'écoulement (PIV, simulations, etc.) et d'autre part l'information donnée par quelques capteurs montés en paroi. Cet apprentissage hors ligne fait appel à des techniques de promotion de la parcimonie et s'appuie sur des séquences d'apprentissage. En ligne, l'estimation du champ est assurée par reconstruction creuse à partir de la seule information des capteurs en paroi. Le nombre et la situation des capteurs sont fondamentaux.

La méthode est illustrée par l'estimation du champ de pression de l'écoulement 2-D autour d'un cylindre et ses performances sont comparées avec celles d'une approche par POD.

Nicolas Vayatis (ENS Cachan)

Stratégies bayésiennes efficaces pour l'optimisation séquentielle

C'est un travail jeune effectué pour accompagner la dynamique des fluides et la modélisation des vagues en cas de tsunami. Comment se propagent les vagues à la rencontre d'un obstacle comme une île ? Les experts en tsunami disaient qu'elle agissait comme une loupe. Les simulations reproduisaient-elles bien cette amplification ? Quelles topographies régissent ce phénomène maximal ? Au début, le travail demandait plusieurs heures de temps de calcul. L'équipe de Cachan a utilisé certaines stratégies, puis en a développé deux autres. Le principe est de mettre en entrée la fonction perturbée par un bruit. Puis, dans le cadre d'une optimisation bayésienne, de rechercher ce qui maximise la fonction. La base est que des observations voisines sont fortement corrélées. Ayant observé plusieurs points, on mesure *a posteriori* leur moyenne et la variance. Un tube de confiance est construit autour des points, ce qui met en évidence des zones d'incertitudes. Le gain maximal d'information dépend du bruit et du noyau.

Les deux nouvelles stratégies sont séquentielles. Dans la première, on détermine l'intervalle où se trouve le maximum de la fonction. Et on cherche par itération sa localisation exacte. L'autre stratégie est parallélisable par batchs d'évaluations. Elle s'appuie sur une modélisation de la fonction par processus gaussiens. Elle permet de faire la même requête en une série d'itérations. Le maximum est choisi en tenant compte du maximum de bruit.

Beaucoup d'expériences numériques ont été effectuées avec des optima locaux près du maximum réel ou avec des maxima très piqués. On voit que cette méthode converge plus vite que les autres. Ces méthodes sont aussi utilisées en recherche dans l'industrie automobile ou le design des éoliennes.

David Ryckelynck (Centres des matériaux, Mines ParisTech)

Mécanique partielle des matériaux pour les structures

Le but est de trouver un moyen de réduire la complexité induite par les lois du comportement. Dans un modèle éléments finis, on introduit une base réduite qui permet d'avoir une approximation dédiée au début de la simulation. La complexité du maillage est contournée par la formulation du principe des puissances virtuelles sur un sous-domaine. On réduit donc à la fois le nombre d'inconnues et le domaine où agissent les équations.

Les 3 cas d'application :

- durée de vie d'une aube de turbine dans un moteur d'avion pour savoir comment échelonner les visites de contrôle. On cherche quelles parties simuler pour réduire la durée des calculs. L'équipe les a réduit par 7 avec une erreur de 15% à température élevée ;
- une tête de cylindre d'un moteur thermique d'une voiture (une culasse en aluminium à comportement élastoviscoplastique) toujours pour calculer la durée de vie. Gain : division par 86 du temps de calcul ;
- en plasticité cristalline, le comportement de chaque grain dépend de son orientation cristallographique, ce qui donne des axes de glissement privilégiés. On cherche alors les facteurs communs ou comment réagissent les différents grains.

La mécanique partielle a pour objet de proposer des modèles, de sorte que les simulations aient une complexité indépendante du maillage. On commence par extraire des bases réduites avec la POD et par construire les domaines réduits. On formule alors les équations hyper-réduites qu'on résout. Puis on extrapole les résultats sur tout le domaine et on calcule les erreurs. Pour le calcul des cristaux, le gain de CPU est de 17,7.

Cela marche mais il faut une forte réduction des inconnues. Certains modèles sont trop complexes pour être simulés plus d'une fois. De même, ça ne marche pas avec un maillage qui évolue au cours du temps.

Dimitri Bettebghor (ONERA)

Spectrally accurate approximation of eigenvalue functions through overlapping radial basis function interpolants for structural optimization

À l'Onera, les ingénieurs cherchent à optimiser la résolution des systèmes complexes. Les systèmes aéronautiques forment un tout. Chaque partie influe sur les autres. Si on veut éviter des flottements, on va avoir des contraintes sur les autres parties d'une aile d'avion par exemple. Et si on met de la rotation, on perd la symétrie du système. Les simulations comportent souvent des milliers de variables, certaines discrètes et d'autres continues. Les valeurs propres telles les fréquences naturelles ou les points d'écrasement. Les évaluations de ces valeurs propres demandent beaucoup de temps de calcul.

La stratégie adoptée est d'abord de préciser les gradients de discontinuités des variables étudiées, puis de construire un modèle approché de ces variables. Ce modèle est alors utilisé dans un processus d'optimisation. Les cas de validation concernent la fréquence de coupure d'un système gyroscopique et le facteur de flambage critique de plaques composite.

L'ordre de convergence du méta-modèle à base de RBF est exceptionnel, bien meilleur que la convergence polynomiale.

Vivien Mallet (INRIA)

Réduction et émulation d'un modèle de qualité de l'air pour la quantification d'incertitude

Vivien Mallet est spécialiste des simulations en géophysique. Un modèle de qualité de l'air à l'échelle urbaine approche la solution stationnaire d'un système d'équations de transport réactif. Ces calculs dépendent de la météorologie, de la pollution de fond et des émissions, en particulier du trafic routier. Certains paramètres comme la vitesse du vent ne forment pas un champ mais sont considérés comme un scalaire, comme les précipitations, la direction du vent, la température, la nébulosité, le jour, l'heure, les émissions de fond d' ozone, ou d'oxydes d'azote.

Le calcul des concentrations de dioxyde d'azote et des particules fines, jusqu'à l'échelle de la rue, est suffisamment rapide pour effectuer en temps réel une simulation chaque heure. Il est cependant impossible d'effectuer beaucoup plus d'appels au modèle, ce qui entrave l'évaluation des fortes incertitudes. On procède alors à la réduction de dimension (au moins sur les sorties), puis à l'émulation statistique du modèle réduit en dimension. La réduction de dimension est effectuée classiquement par projection dans un sous-espace déterminé par une analyse en composantes principales. L'émulation statistique repose sur

une régression et une interpolation par krigeage ou par des fonctions de base radiales. Le modèle réduit n'a que 10 entrées et 8 sorties. Il est aussi gourmand en temps de calcul que le modèle complet. Mais il est beaucoup plus facile à manipuler et, comparé à des observations, il est aussi performant que le modèle original. On s'aperçoit que ce qu'on a perdu dans le méta-modèle sont des valeurs non significatives. Ce qui prouve que la course aux gros modèles n'est pas forcément efficace et justifiée.

La démarche d'évaluation des incertitudes est ensuite d'effectuer des simulations Monte Carlo et demande une calibration reposant sur les observations. L'étude des erreurs se fait par le diagramme de rang qui exprime, pour une observation donnée, le nombre de simulations qui prévoient une valeur inférieure à l'observation. Avec une erreur minimale, le diagramme rang/nombre d'observations sera plat.

Ce type de travail sert aussi pour la dispersion des radionucléides dans le cas de Fukushima, le risque incendie, le transport urbain.

Thuy-Thi-Thanh Vuong (Renault, École Normale Supérieure de Lyon)

Reduced model for the crash simulation

Le crash automobile est un phénomène violent dans lequel l'énergie cinétique est absorbée par les pièces métalliques et dans une moindre mesure, par un mannequin installé dans l'habitacle. La géométrie n'est pas linéaire, de même que la plasticité des matériaux. La simulation et l'analyse des résultats demandent un à deux jours, car toute la voiture (de 5 à 20 millions d'éléments) doit être modélisée. Le pas de temps doit être de 1 ms ou moins. Les simulations ne sont pas déterministes (plusieurs simulations ne donnent pas les mêmes résultats). Le modèle réduit doit prévoir la dispersion des résultats et doit être aussi précis que le modèle initial.

Il y a deux types de critères qui entrent en jeu : sur la structure ou sur le mannequin (exemple, l'effet de la décélération sur la tête du mannequin). Par exemple sur un longeron, on étudie des modèles très simples ou un peu plus compliqués. Avec la méthode SVD (Singular Value Decomposition, sorte de POD), on reconstitue le même type de crash que le modèle simple de longeron. Le plus difficile est de modéliser les premiers instants du crash. Les erreurs se situent surtout au niveau des plis de la pièce, ce qui n'est pas très grave, car cette partie n'est pas en contact avec les autres pièces.



Chapitre 3

Résumés des interventions

Jean-Marc Martinez (CEA)

Apport des modèles de krigeage en simulation numérique

Jean-Marc Martinez, François Bachoc, Karim Ammar (CEA Saclay, DEN, DM2S)

Nous présenterons le principe des méthodes de modélisation par les techniques de krigeage sous l'angle des processus gaussiens. Leur utilisation s'est largement développée dans le cadre de la simulation numérique et connue sous l'acronyme DACE, Design and Analysis of Computer Experiment [1]. Nous montrerons une première contribution du krigeage à la validation d'un modèle numérique de thermohydraulique [2] et une seconde application ayant permis de détecter des simulations numériques anormales. Au cours de cette journée, une autre présentation (par N. Vayatis du CMLA) illustrera l'intérêt du krigeage pour des stratégies adaptatives efficaces en optimisation séquentielle.

[1] Thomas. J. Santner, Brian. J. Williams, William I. Notz, "The Design and Analysis of Computer Experiment", Springer Series in Statistics, 2003

[2] F. Bachoc, G. Bois, J. Garnier, J.-M. Martinez, « Calibration and improved prediction of computer models by universal kriging », Nuclear Science and Engineering 176(1), (2014) 81-97.

Manuel Dauchez (CNRS UMR 7369 MEDyC, Université de Reims Champagne-Ardenne)

Simulations de protéines élastomères : que peut apporter le HPC dans la réduction de complexité

L'élastine est un constituant majeur de la peau, des poumons et du système vasculaire humain. Cette macromolécule élastomérique possède des propriétés remarquables mais n'est actuellement que peu étudiée dans sa totalité étant totalement hydrophobe et ne fonctionnant pas sans eau !. Les simulations numériques de dynamique moléculaire nous ont permis d'étudier les comportements structuraux lors d'une réduction de complexité à l'étude de ses peptides constitutifs et de leurs interactions par docking moléculaire à leur récepteur naturelle EBP (Elastin Binding Protein). Des applications sur les biomatériaux élastiques seront envisagés en fin de présentation.

Yvon Maday (UPMC, IUF, Brown University), Olga Mula Hernandez (RWTH Aachen University), Mohamed Kamel Riahi (Ecole Polytechnique)

Séminaire Aristote ROC & ROM 23 octobre 2014 Ecole Polytechnique (Palaiseau)

About the possibilities of reduced basis to couple data assimilation, interpolation and domain decomposition for the real-time simulation of experiments

Olga Mula Hernandez (UPMC/LJLL & CEA)

The parareal in time algorithm is a domain decomposition method for the time variable that allows to get additional speed-ups in the resolution of time-dependent PDE's when other efficient parallelization methods (like, e.g., spatial domain decomposition) reach saturation. The key ingredients of the algorithm are, first of all, the use of two propagators \mathcal{F} and \mathcal{G} that, taking an initial value at a given time t respectively provide a fine and coarse approximation to the solution at a later time $t + \tau$. Then, if the total interval of time $[0, T]$ is divided into N subintervals $[T_n, T_{n+1}]$ ($0 \leq n < N$) the algorithm proposes to combine these two propagators in a predictor-correction fashion in order to build a sequence X_k^n that converges to the fine solution X^n at time T_n as k tends to infinity (and for all $0 \leq n \leq N$).

In recent years, there has been a considerable effort to improve the performances of the method by reducing the cost of the fine propagator inside the parareal iterations. In [1] for example (see also [2]) it has been proposed to use a domain decomposition algorithm to compute the fine solver and to limit the number of (domain decomposition) iterations during each (parareal) iterations and to resume the iterations by using the previous state as an initial guess in the further domain decomposition iterations. In this spirit, we propose to adapt this strategy to the case where the fine solver presents internal iterations and, in this talk, we will present a scheme in which the internal iterations are truncated and the convergence is obtained across the parareal iterations. After a convergence analysis, we will show some numerical results dealing with the application of the scheme to accelerate the time-dependent neutron diffusion equation in a reactor core and we will show how the use of a reduced basis can alleviate the high memory storage demand that the proposed method requires.

References:

[1] Maday, Y. and Turinici, *The Parareal in Time Iterative Solver: a Further Direction to Parallel Implementation*, 2005, Domain Decomposition Methods in Science and Engineering, Springer Berlin Heidelberg, 441-448,

}

[2] Guetat, R., *Méthode de parallélisation en temps: Application aux méthodes de décomposition de domaine*, Thèse Paris VI, 2012

Christophe Prudhomme, Cécile Daversin (UNISTRA/IRMA), Loïc Girdi, Anthony Nouy (ECN), Christophe Trophime (CNRS/LNCMI), Stéphane Veys (CEA), Jean-Baptiste Wahl (UNISTRA /IRMA)

Séminaire Aristote ROC & ROM 23 octobre 2014 Ecole Polytechnique (Palaiseau)

Méthode des bases réduites pour des problèmes multi-physiques non-linéaires

Christophe Prud'homme (UDS/IRMA)
Cécile Daversin (UNISTA/IRMA)
Loïc Girdi (ECN)
Anthony Nouy (ECN)
Christophe Trophime (CNRS/LNCMI)
Stéphane Veys (CEA)
Jean-Baptiste Wahl (UNISTRA/IRMA)

We present an open-source framework for the reduced basis methods implemented in the library Feel++ [3,4] and we consider in particular multi-physics, possibly non-linear, applications [1,2] which require high performance computing. We present how the mathematical methodology and technology scale with respect to complexity and the gain obtained in industrial context [1]. We present also briefly our first developments on low-rank methods within our framework with our colleagues from ECN.

One of the main application presented is developed with the Laboratoire National des Champs Magnétique Intenses (LNCMI), a large french equipment, allowing researchers to do experiments with magnetic fields up to 35T provided by water cooled resistive electro-magnet. Existing technologies (material properties,...) are pushed to the limits and users require now specific magnetic field profiles or homogeneous fields. These constraints and the international race for higher magnetic fields demand conception tools which are reliable and robust. The reduced basis methodology is now part of this tool chain.

Another domain of application we will consider in the talk is fluid flows, both Stokes and Navier-Stokes.

[1] Cécile Daversin, Stéphane Veys, Christophe Trophime, Christophe Prud'Homme
{A Reduced Basis Framework: Application to large scale non-linear multi-physics problems}
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00786557>

[2] Elisa Schenone, Stéphane Veys, Christophe Prud'Homme
{High Performance Computing for the Reduced Basis Method. Application to Natural Convection}
<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00786560>

[3] <http://www.feelpp.org>

[4] C. Prudhomme, V. Chabannes, V. Doyeux, M. Ismail, A. Samake, G. Pena. {Feel++ : A Computational Framework for Galerkin Methods and Advanced Numerical Methods}, ESAIM Proc., Multiscale Coupling of Complex Models in Scientific Computing, 38 (2012), 429–455.

Eurika Kaiser, Bern Noack, Laurent Cordier, Andreas Spohn (Institute PPRIME), Marc Segond, Markus Abel (Ambrosys GmbH), Guillaume Daviller (CERFACS), Jan Östh (Chalmers University of Technology), Sinisa Krajnovic, Robert K. Niven (The University of New SouthWales)

Seminar Aristote: ROC & ROM CEA, October 2014

Cluster-based reduced-order modelling of shear flows

Eurika Kaiser¹ Bernd Noack¹, Laurent Cordier¹, Andreas Spohn¹, Marc Segond², Markus Abel², Guillaume Daviller³, Jan Östh⁴, Siniša Krajnović⁵, & Robert K. Niven⁵

(1) Institute PPRIME, Poitiers, France (2) Ambrosys GmbH, Potsdam, Germany (3) CERFACS, Toulouse, France (4) Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden (5) The University of New South Wales at ADFA, Canberra, Australia

We propose a novel cluster-based reduced-order modelling (CROM) strategy of unsteady flows [1, 2]. CROM builds on the pioneering works of Gunzburger's group in cluster analysis [3] and Eckhardt's group in transition matrix models [4] and constitutes a potential alternative to POD models. This strategy processes a time-resolved sequence of flow snapshots in two steps. First, the snapshot data is clustered into a small number of representative states, called centroids, in the state space. These centroids partition the state space in complementary non-overlapping regions (centroidal Voronoi cells). Secondly, the transitions between the states are dynamically modelled via a Markov process. Physical mechanisms are then distilled by a refined analysis of the Markov process, e.g. with the finite-time Lyapunov exponent and entropic methods. The resulting CROM is applied to the spatially evolving incompressible mixing layer, to the turbulent jet noise, and to the Ahmed body. For these examples, CROM is shown to distil non-trivial quasi-attractors and transition processes. CROM has numerous potential applications for the systematic identification of physical mechanisms of complex dynamics, for comparison of flow evolution models, for the identification of precursors to desirable and undesirable events, and for flow control design exploiting nonlinearities.

References:

[1] Kaiser, E. Noack, B.R., Cordier, L., Spohn, A., Segond, M., Abel, M., Daviller, G., Östh, J., Krajnovic, S., & Niven, R.K., *J. Fluid Mech.* 754, 365-414 (2014).

[2] See <http://ClusterModelling.com>.

[3] Burkardt, J., Gunzburger, M. & Lee, H.C., *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 196, 337355 (2006).

[4] Schneider, T. M. Eckhardt, B. & Vollmer, J. *Phys. Rev. E.* 75, 066313 (2007).

Yohann Duguet (LIMSI-CNRS), Tobias Kreilos, Bruno Eckhardt (Universität Philipps, Marburg), Taras Khapko, Philipp Schlatter, Dan S. Henningson (KTH)

"Un modèle de couche limite transitionnelle basé sur un automate cellulaire probabiliste"

speaker: Yohann Duguet (LIMSI-CNRS, Orsay, France)

co-auteurs: Tobias Kreilos et Bruno Eckhardt (Universität Philipps, Marburg, Allemagne), Taras Khapko, Philipp Schlatter et Dan S. Henningson (KTH Stockholm, Suède)

La compréhension et la prédiction de la transition vers la turbulence à proximité d'une paroi sont cruciales pour tous les phénomènes aéronautiques. Cependant les écarts entre les échelles mises en jeu rendent simulations numériques et expériences difficiles, ce qui suggère le développement de modèles réduits permettant de valider rapidement certaines hypothèses physiques. Les fortes fluctuations statistiques observées lors de la transition reflètent en fait la coexistence spatiale entre état laminaire et état turbulent. Le modèle réduit adopté ici consiste donc en une réduction de la dynamique à un automate cellulaire bidimensionnel, dont les règles de couplage sont probabilistes et sont validées par comparaison à des simulations aux grandes échelles. Je discuterai le problème délicat de la modélisation des phénomènes de nucléation de poches turbulentes à la paroi lorsque l'écoulement est soumis à une turbulence résiduelle en entrée.

Image: Simulation des grandes échelles d'une couche limite de Blasius soumise à une turbulence d'entrée résiduelle. Ecoulement vers la droite (blue/rouge: isosurfaces de vitesse axiale, vert : critère d'identification λ_2 pour les structures tourbillonnaires)

Bérengère Podvin (LIMSI-CNRS)

Modèles réduits et turbulence développé : turbulence de paroi et convection naturelle

La compréhension et le contrôle des phénomènes turbulents représentent un enjeu économique déterminant (transport, météorologie, processus industriels...). Ces phénomènes sont caractérisés par une large disparité d'échelles qui interagissent selon des mécanismes intermittents dont l'origine reste encore largement inexpliquée. Est-il possible dans ces conditions de capturer leur dynamique à l'aide d'un modèle de dimension réduite? Nous essaierons d'apporter quelques éléments de réponse à cette question à travers l'étude de deux configurations canoniques: l'écoulement de canal plan et la convection de Rayleigh-Bénard.

Lionel Mathelin (CNRS/LIMSI)

Séminaire Aristote ROC & ROM 23 octobre 2014 Ecole Polytechnique (Palaiseau)

Une stratégie de réduction de modèle pour le contrôle d'écoulements expérimentaux en boucle fermée

Lionel Mathelin (CNRS/LIMSI)

Nous présentons une technique d'estimation pour le contrôle en boucle fermée compatible avec une implémentation expérimentale. La méthode repose sur une stratégie en ligne / hors ligne où une base d'approximation est apprise hors ligne en utilisant la connaissance des champs de l'écoulement (PIV, simulations, etc.) d'une part et l'information donnée par quelques capteurs montés en paroi d'autre part. Cet apprentissage hors ligne fait appel à des techniques de promotion de la parcimonie et s'appuie sur des séquences d'apprentissage. En ligne, l'estimation du champ est assurée par reconstruction creuse à partir de la seule information des capteurs en paroi.

La méthode est illustrée par l'estimation du champ de pression de l'écoulement 2-D autour d'un cylindre et ses performances sont comparées avec celles d'une approche par POD.

Nicolas Vayatis (ENS Cachan)

Optimisation séquentielle et application au design d'expériences

Dans cet exposé, on aborde la question de l'optimisation d'une fonction inconnue dont les évaluations sont très coûteuses, comme c'est le cas dans l'utilisation d'un code numérique lourd en mécanique des fluides pour anticiper la maximisation de la sortie du code selon le réglage en amont des paramètres physiques régissant le phénomène. On présente deux stratégies séquentielles récemment développées, l'une directe et l'autre parallélisable par batchs d'évaluations, s'appuyant sur une modélisation de la fonction par processus gaussiens. Les deux stratégies s'efforcent de résoudre habilement le compromis entre exploration des zones inconnues et exploitation des zones autour des maxima observés. Le bien-fondé de nos deux méthodes est discuté à la fois sous l'angle théorique sous forme de résultats de convergence au sens du regret cumulé, comme à travers des expériences numériques où elles sont confrontées à l'état de l'art du domaine. Travail en collaboration avec : Emile Contal, Vianney Perchet, David Buffoni, Alexandre Robicquet et Themis Stefanakis.

David Ryckelynck (CdM Mines ParisTech)

Mécanique partielle des matériaux pour les structures
D. Ryckelynck,
Mines ParisTech

La mécanique non linéaire des matériaux intervient lors de la prévision de durée de vie de structures en condition sévère d'utilisation du type, fortes contraintes mécaniques, grandes déformations, hautes températures, transformations microstructurales... Les modèles développés et leur version réduite ont un fort contenu physique ainsi qu'un grand nombre de paramètres physiques que l'on souhaite conserver pour la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu.

Les résultats récents montrent qu'une réduction des inconnues d'un problème, c'est-à-dire l'ordre du modèle, ne suffit pas à réduire la complexité numérique des simulations fortement non linéaires. Or, en introduisant un domaine réduit d'intégration, ou une méthode de sélection des équations à résoudre autrement que par une projection de type Galerkin, il est possible d'améliorer de façon très significative (d'un facteur 3 à 100) la complexité numérique du modèle d'ordre réduit. Plusieurs méthodes proposées dans la littérature peuvent être regroupées sous le concept de mécanique partielle, où l'on réduit à la fois le nombre d'inconnues et l'étendu du domaine physique isolé. Le domaine physique et les variables qui lui sont rattachées ne sont considérés que partiellement lors des prévisions numériques. Au cours de l'exposé, nous montrerons en particulier des résultats numériques exploitant la méthode d'Hyper-réduction de modèle.

Nous pensons que les avancées récentes en réduction de modèles et en décomposition de tenseurs peuvent :

- changer la façon de conduire des calculs intensifs, en les factorisant à l'aide de bases réduites et de méthodes de mécanique partielle,
- permettre d'introduire de nouvelles méthodes de surface de réponse en construisant des représentations tensorielles approchées de plan factoriels complets,
- révolutionner les méthodes d'optimisation, en exploitant en temps réel des surfaces de réponse en grande dimension (de l'ordre de 20), issues d'une phase préliminaire de calculs intensifs en base réduite.

Nous proposons de discuter de la pertinence de ces méthodes pour des applications à l'aéronautique, en mécanique des matériaux mais aussi dans une moindre mesure en mécanique des fluides.

Dimitri Bettebghor (ONERA/DADS)

Spectrally accurate approximation of eigenvalue functions through overlapping radial basis function interpolants for structural optimization

Dimitri Bettebghor¹

¹ONERA - The French Aerospace Lab
29, Avenue de la Division Leclerc
dimitri.bettebghor@onera.fr

ABSTRACT

Many mechanical simulations involve eigenvalue computations: natural frequencies, buckling, stability of gyroscopic systems. Structural optimization and more generally engineering optimization require many evaluations of such eigenvalues leading to excessive computational times, especially for global optimization techniques. Accurate approximations of eigenvalues with respect to optimization variables that often are natural parameters of the mechanical systems are then required to alleviate the computational burden. Dependence of the critical eigenvalue with respect to these natural parameters (geometry, material, load case...) is often complex, part of the reason is that the critical eigenvalue is the minimum of several eigenvalues, resulting in a loss of differentiability for structural parameters where the critical eigenvalue becomes multiple [1]. This discontinuous derivative prevents from accurate approximation whenever the approximation model is smooth such as most of the standard approximation techniques (kriging, artificial neural network...[2]) Furthermore, such gradient discontinuities are known to degrade optimization algorithms convergence.

In this work, we present an original strategy that allows first to locate such gradient discontinuities of the quantity of interest (typically frequencies, buckling critical factor...) and next to build an accurate approximation model of this quantity. This approximation model is then used within an optimization process. Our original strategy assumes that the gradient of the eigenvalue functions is available and only needs a few sample points of the design space. Our strategy combines a classical approximation strategy (Radial Basis Function (RBF)) with advanced statistical techniques. More precisely, our strategy takes into account this discontinuous behavior of the response to approximate by dividing the input space through the clustering of the gradient space. Radial basis interpolants are then constructed over each region and a patch region is defined that encompasses the non differentiable region. Such patch regions are defined with the help of a classical statistical classifier known as Support Vector Machines (SVM). Such SVM define a margin that is used to define the patch regions. The final approximation model is defined as a combination of different radial basis interpolants over these patch regions.

This strategy is tested over two different test cases. First, critical buckling factor of composite plates is approximated and second, cut-off frequency of a gyroscopic system is approximated with this original strategy. The accuracy of the approximation is compared with other advanced approximation strategy. Our approximation strategy shows excellent convergence rates and numerical results demonstrate that it is even possible to achieve spectrally accurate approximations for relatively low dimensional approximation problems (below 4). An application to composite structure optimization is also given.

References

- [1] H. Rodrigues, JM Guedes, MP Bendsøe, Necessary conditions for optimal design of structures with a nonsmooth eigenvalue based criterion, *Structural optimization*, Vol9:1, 52—56, 1995, Springer
- [2] A. Forrester, A. Sobester, Andy Keane, Engineering design via surrogate modelling: a practical guide. *John Wiley & Sons*, 2008.

Vivien Mallet (INRIA)

Séminaire Aristote ROC & ROM 23 octobre 2014 Ecole Polytechnique (Palaiseau)

Réduction et émulation d'un modèle de qualité de l'air pour la quantification d'incertitude

Vivien Mallet (INRIA)

Un modèle de qualité de l'air à l'échelle urbaine approche la solution stationnaire d'un système d'équations de transport réactif. Ces calculs dépendent de la météorologie, de la pollution de fond et des émissions, en particulier du trafic routier. Le calcul des concentrations de dioxyde d'azote et des particules fines, jusqu'à l'échelle de la rue, est suffisamment rapide pour effectuer en temps réel une simulation chaque heure. Il est cependant impossible d'effectuer beaucoup plus d'appels au modèle, ce qui entrave l'évaluation des fortes incertitudes. On procède alors à la réduction de dimension (au moins sur les sorties) et puis à l'émulation statistique du modèle réduit en dimension. La réduction de dimension est effectuée classiquement par projection dans un sous-espace déterminé par une analyse en composantes principales. L'émulation statistique repose sur une régression et une interpolation par krigeage ou par des fonctions de base radiales. Comparé à des observations, le modèle réduit et émulé est aussi performant que le modèle original. La démarche d'évaluation des incertitudes est ensuite d'effectuer des simulations Monte Carlo et demande une calibration reposant sur les observations.

Vuong Thuy-Thi-Thanh, Yves Tourbier (Renault)

Seminar Reduced Order of Complexity & Reduced Order of Model,
Ecole Polytechnique, Palaiseau
October 2014

Reduced model for the crash simulation

Thuy Thi Thanh VUONGⁱ, Yves TOURBIERⁱⁱ

The car crash simulation contains of many complexities: the geometrical and material nonlinearities, the contact management and the dispersion. In order to represent well all local physical phenomenon (plasticity, spot-weld crack...), a crash model needs a fine mesh (from 5 to 20 M finite elements for a whole vehicle). The crash solver using explicit algorithm takes small time step because of the Courant's condition. Consequently, it takes time for the car crash simulation (till 24 hours), particularly in the context of design parameters change. We are interested in a reduced model which cuts back the total cost of an optimization study. More precisely, we hope a reduced model not only to reconstruct an already done simulation but to estimate a new simulation interpolating between existing simulation(s) in a Design Of Experiments. Recently, lot of teams have studied reduced models by Reduced Basis, POD (Chatterjee, 2000) or PGD (Amine *et al.*, 2012) but until now no one have achieved for a car crash model, both in intrusive and nonintrusive methods.

In this presentation, we would like to present:

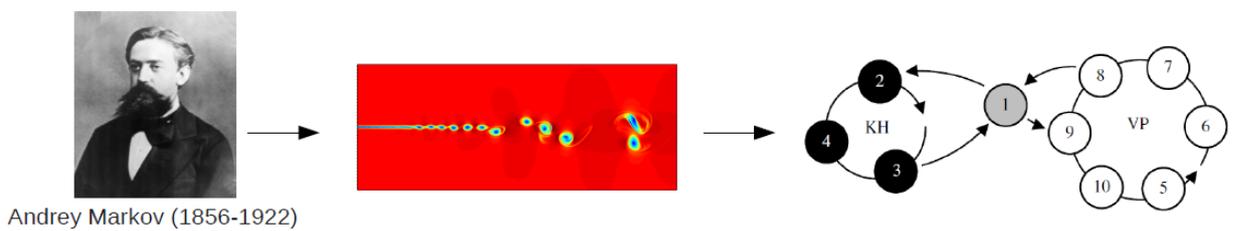
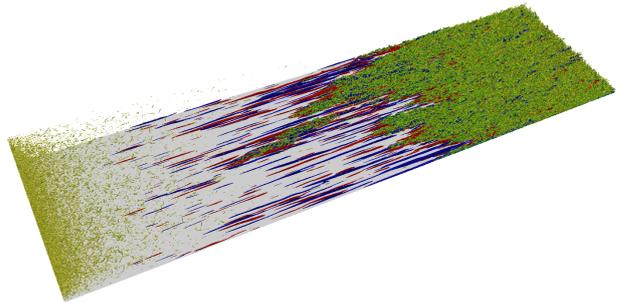
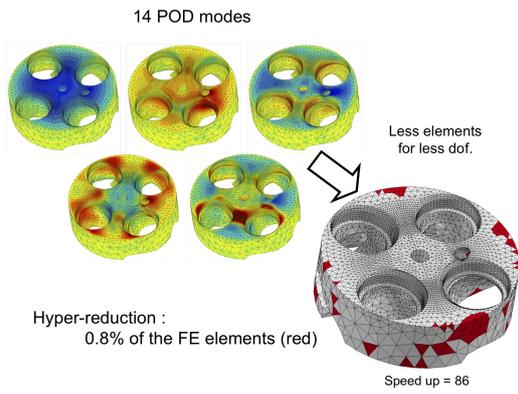
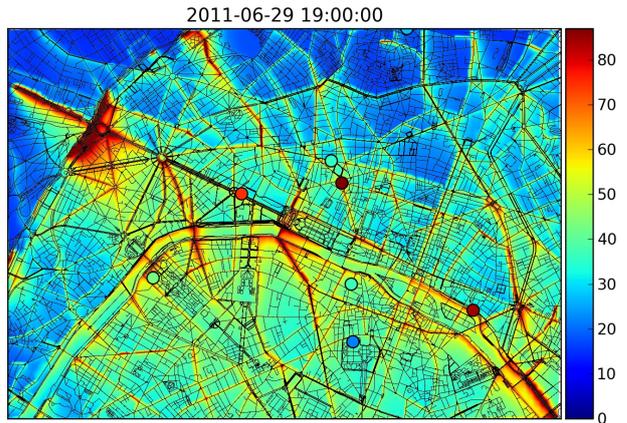
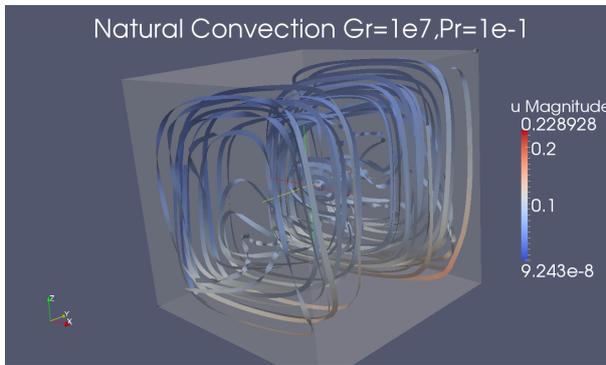
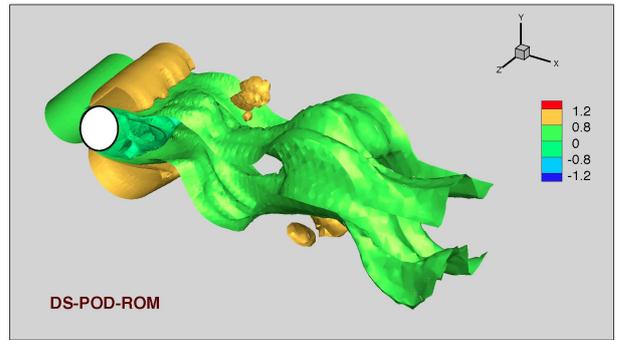
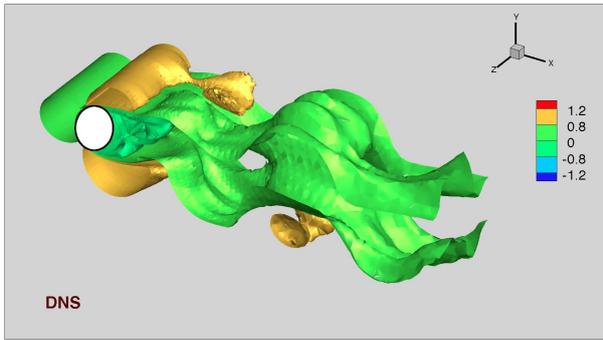
- the specifications of the crash simulation in a design space through two use-cases : a BoxBeam and a Tbeam which represent side member (the most important part for energy absorption) and the motor compartment;
- our context of reduction. The final aim is to divide at least by two the cost of an optimization study. The experimental design is essential;
- the use of the SVD (Singular Value Decomposition) to see if a reduced model can detect some particularities in our case, for example the symmetry when we change parameters.

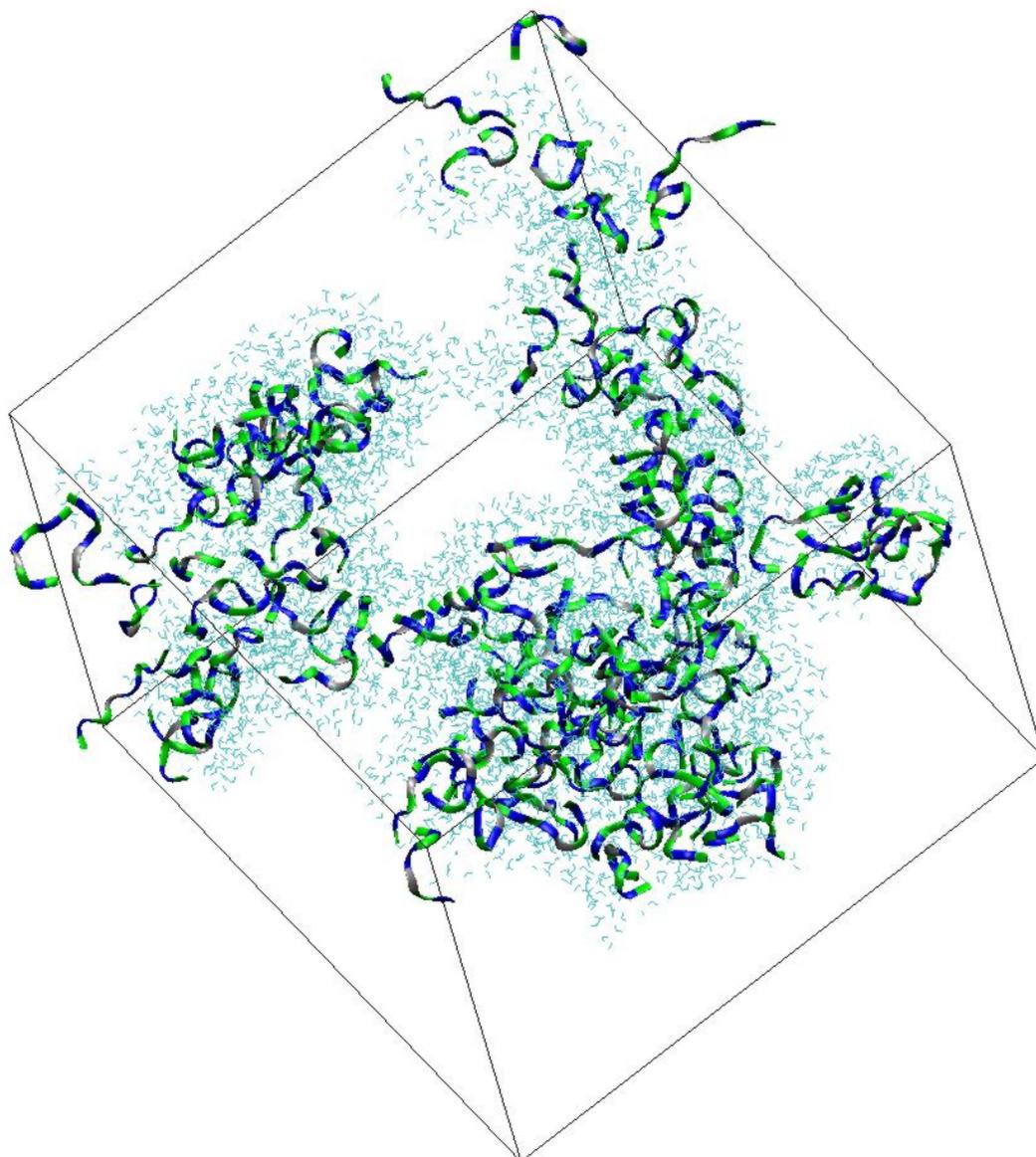
Amine et al. (2012). Proper generalized decomposition of time multiscale models. *International Journal For Numerical Methods In Engineering*.

Chatterjee, A. (2000, April). An introduction to the proper orthogonal decomposition. *Current Science*, 78(7), 808-817.

ⁱPhD Student (Renault S.A.S & Ecole Centrale de Lyon), France

ⁱⁱ Renault S.A.S





<http://www.association-aristote.fr>

info@association-aristote.fr