

## AAAF - COMMISSION STRUCTURE

### Synthèse de la journée scientifique

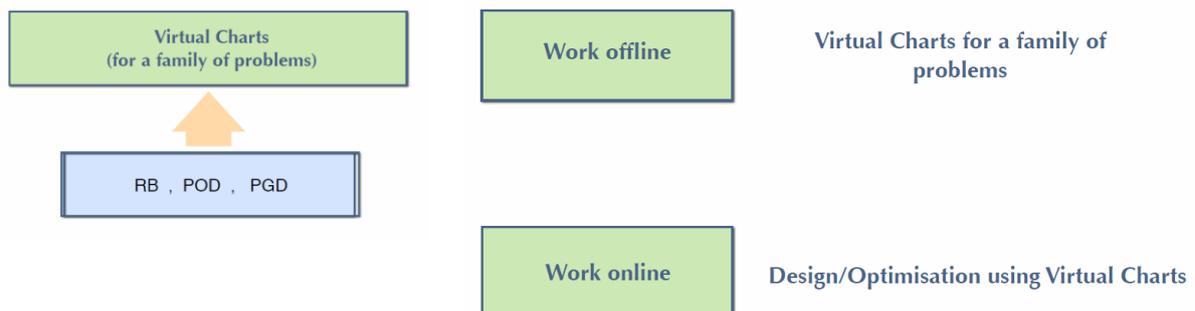
#### «La réduction de modèles : pratiques et perspectives»

ONERA, Châtillon, 31 Mai 2016

Dans un monde où les modèles physiques sont de plus en plus complexes, et, ont donc un nombre de degrés de liberté important, les techniques de réduction de modèles ont un intérêt grandissant. La réduction de modèles ROM repose sur l'élaboration d'un espace de dimension réduit sur lequel sont projetées les équations physiques du problème d'intérêt. Aussi l'Analyse Modale Classique en dynamique des structures ou les techniques classiques de CMS (Component Mode Synthesis) de type Craig-Bampton, connues depuis plusieurs décennies, relèvent de la réduction de modèles. Cependant, il se développe aujourd'hui une nouvelle génération de méthodes, dont la Proper Orthogonal Decomposition POD, utilisée notamment en mécanique des fluides, la Proper Generalized Decomposition PGD, ..., qui offrent un énorme potentiel pour la résolution de problèmes hors de portée des codes industriels. Des métamodèles, qui sont fondés sur des approches statistiques/probabilistes pour l'analyse de données, peuvent être élaborés à partir de données d'essais et de calculs, et une fois constitués, conduire à des réductions de coûts importantes.

Cette journée scientifique, organisée par la commission structures de la 3AF, a pour objectif de présenter l'Etat de l'Art sur les techniques de réduction de modèles et de faire un état des lieux des pratiques industrielles. Elle se compose de 10 présentations et d'une table ronde, où le monde académique et les laboratoires (école normale supérieure Paris-Saclay, Mines ParisTech, Ecole Centrale de Lyon, Cenero, ONERA) et industriel (ANSYS, AIRBUS Defence and Space, Turbomeca, Snecma, SAFRAN, ESI Group) sont représentés. Cette journée a réuni 100 personnes environ.

Le premier exposé (Prof. P. Ladevèze de l'école normale supérieure Paris-Saclay) porte sur la nouvelle génération de modèles réduits, discute de leur maturité et présente les perspectives. Les défis industriels actuels sont de réduire les essais structuraux et de les remplacer par des démarches virtuelles au niveau de la conception, du dimensionnement et de la qualification des structures, ce qui permet de réduire les coûts et les durées de développement. On distingue différentes approches de réduction de modèles : 'Reduced Basis' RB, 'Proper Orthogonal Decomposition POD', 'Proper Generalized Decomposition PGD'. La motivation principale est d'établir des abaques virtuels 'offline' utilisés ensuite pour la conception et l'optimisation.



Les principes de ces approches sont ensuite présentés. Dans les approches dont il est question lors de cette journée, on cherche à séparer les variables (temps/espace par exemple), à développer des techniques spécifiques de résolution des équations et à se donner la possibilité d'introduire des paramètres (géométrie, matériau,...). L'idée sous-jacente est de décomposer les variables et d'exprimer la solution via des fonctions de forme ou 'modes' en nombre réduit avec une erreur raisonnable, ce qui réduira les coûts de calcul. Ainsi, Prof. P. Ladevèze présente la PGD, développée par l'école normale supérieure Paris-Saclay, qui travaille dans le cadre d'une approximation espace/temps sur l'équation différentielle du phénomène physique étudié. Des travaux sont également effectués à l'Ecole Centrale de Nantes sur cette approche PGD (Prof. F. Chinesta). D'autres approches, comme la RB et la POD (employée notamment en dynamique des fluides) ont été développées. Enfin des exemples d'applications académiques et industriels sont présentés.

En conclusion concernant la construction offline de modèles réduits pour les problèmes linéaires, ce qui est mature :

- Les problèmes linéaires elliptiques et paraboliques avec paramètres,
- Les problèmes dynamiques linéaires 'lents' avec paramètres.

Les problèmes dynamiques transitoires restent une question ouverte (problème espace/temps).

Dans le cas des problèmes non linéaires, ce qui est mature (offline):

- Les problèmes viscoélastiques avec endommagement modéré et paramètres (moins de 6),
- Les problèmes dynamiques 'lents avec paramètres.

Par contre les problèmes avec grands déplacements et instabilités ne sont pas matures. En conception et optimisation, les problèmes difficiles inhérents aux techniques de réduction de modèles restent le traitement de l'endommagement et des fissures et la prise en compte de nombreux paramètres.

La présentation suivante intitulée 'Panorama des applications des métamodèles et modèles réduits en aéroélasticité et optimisation' de A. Placzek (ONERA) s'attache à présenter l'application de modèles réduits et de métamodèles à la conception multidisciplinaire et à l'aéroélasticité. En effet les modèles réduits, type POD et les métamodèles (réseau de neurones, krigeage,...), utilisés depuis de nombreuses années à l'ONERA, sont particulièrement adaptés à la conception multidisciplinaire et à l'optimisation des structures.

L'analyse de la stabilité aéroélastique et l'optimisation structurale, s'appuyant sur les codes CFD, nécessitent de nombreuses boucles de calcul particulièrement onéreuses. Des approches en modèles réduits sont développées pour décrire le couplage aéroélastique. Par exemple, la POD est employée pour décrire le champ aérodynamique à partir d'un ensemble de 'snapshots' précalculés, les modèles réduits POD-Galerkin pour résoudre les équations Euler/RANS linéarisées (détection du flutter) et pour résoudre les équations Navier Stokes non linéarisés (Vortex Shedding).

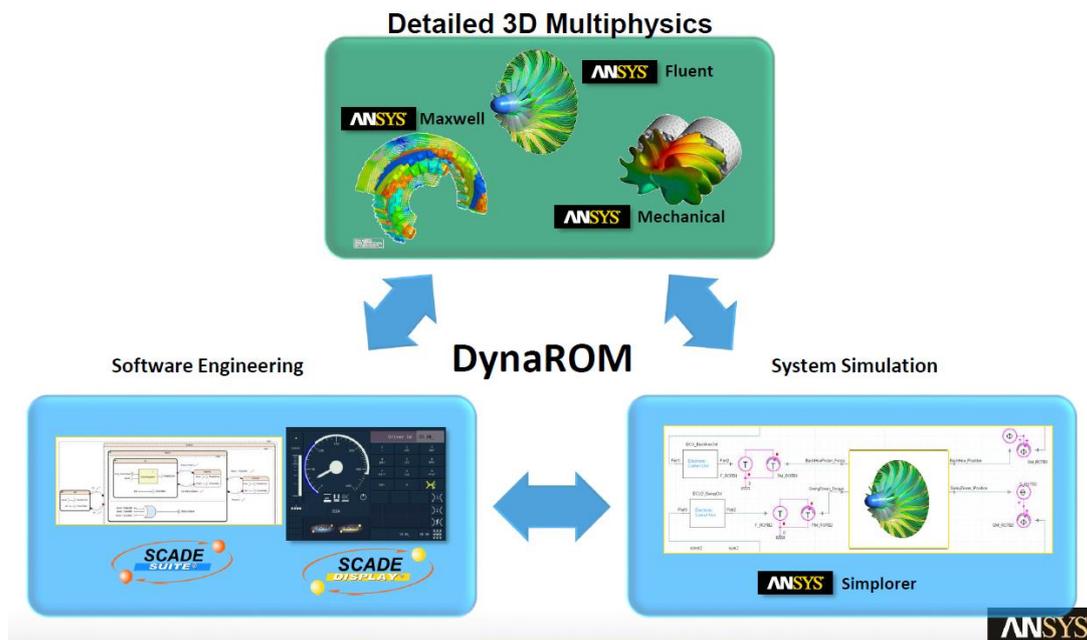
Les métamodèles, fondés sur des approches statistiques et probabilistes, remplacent une simulation numérique CFD de l'interaction fluide/structure, onéreuse, par l'utilisation d'une équation non physique. La construction de cette équation (métamodèle) est faite au préalable à partir de données d'essais et/ou de calculs CFD/structure. Les approches pour construire des métamodèles sont les réseaux de neurones, le krigeage, moindre carrés, apprentissage statistique,... Un exemple d'application à une nacelle de moteur est présenté en conception et optimisation (réduction de la consommation). Ils sont utilisés aussi en optimisation structurale (positionnement des fréquences pour la conception de pales, flambage), en dynamique des rotors ou en aéroélasticité instationnaire.

En termes de perspectives, la robustesse des modèles réduits en non linéaire pour les grands nombres de Reynolds doit être améliorée. Quant aux métamodèles, ils restent limités en nombre de paramètres d'entrée.

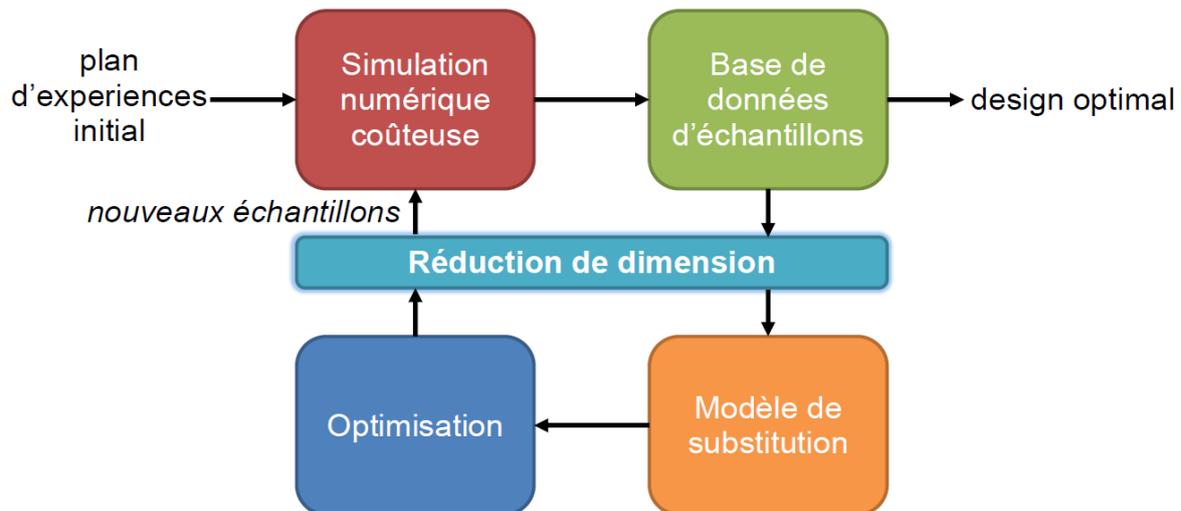
Vient ensuite un exposé industriel fait par J. Duysens et M. Rochette de la société ANSYS présentant l'application de la réduction de modèles à l'analyse fluide-structure stationnaire et

transitoire. L'accent est mis sur la possibilité de passer de la simulation 3D et 4D au calcul temps réel grâce à la réduction de modèle. L'approche d'ANSYS comprend deux étapes : approche offline consistant à élaborer un plan d'expérience de simulations 3D/4D en faisant varier les paramètres d'entrée (excitations dépendant du temps et des paramètres scalaires) et online conduisant à réaliser un modèle réduit dans une application verticale opéré en quasi temps-réel. Des exemples sont présentés : entrée d'air/échappement générique 3D dans un écoulement thermo-aérodynamique, barre chauffée. L'application des techniques de réduction de modèles permet la résolution du problème (calcul des pressions statiques) dans le premier cas en 3 secondes sur un PC au lieu de 2 heures sur un cluster à 16 cœurs. Les techniques de réduction de modèles sont utilisées au niveau système, pour des problèmes multiphysiques et multidomaines.

## ANSYS vision with DYNAROM

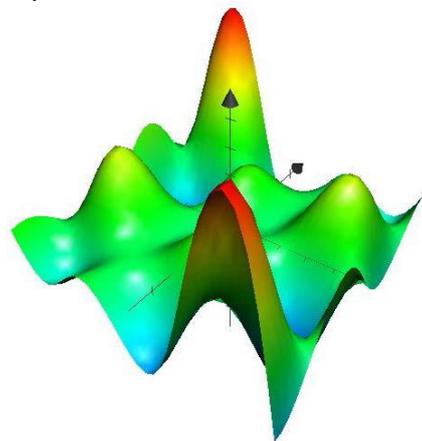


CENAERO (présentation de V. Baudoui) s'intéresse à la réduction de dimension pour l'optimisation pour la conception basée sur des simulations numériques coûteuses. L'idée est d'utiliser des modèles de substitution avec enrichissement adaptatif du plan d'expérience en conservant tous les paramètres et en définissant un sous-espace sur lequel réaliser l'optimisation. La réduction de dimension est une interface dans une boucle d'optimisation adaptative. L'approche utilisée est alors l'analyse en composantes principales supervisées SPCA (Supervised Principal Component Analysis), l'erreur étant calculée par 'Leave-one-out'. Les avantages de la démarche sont sa rapidité et son caractère multi-objectifs.

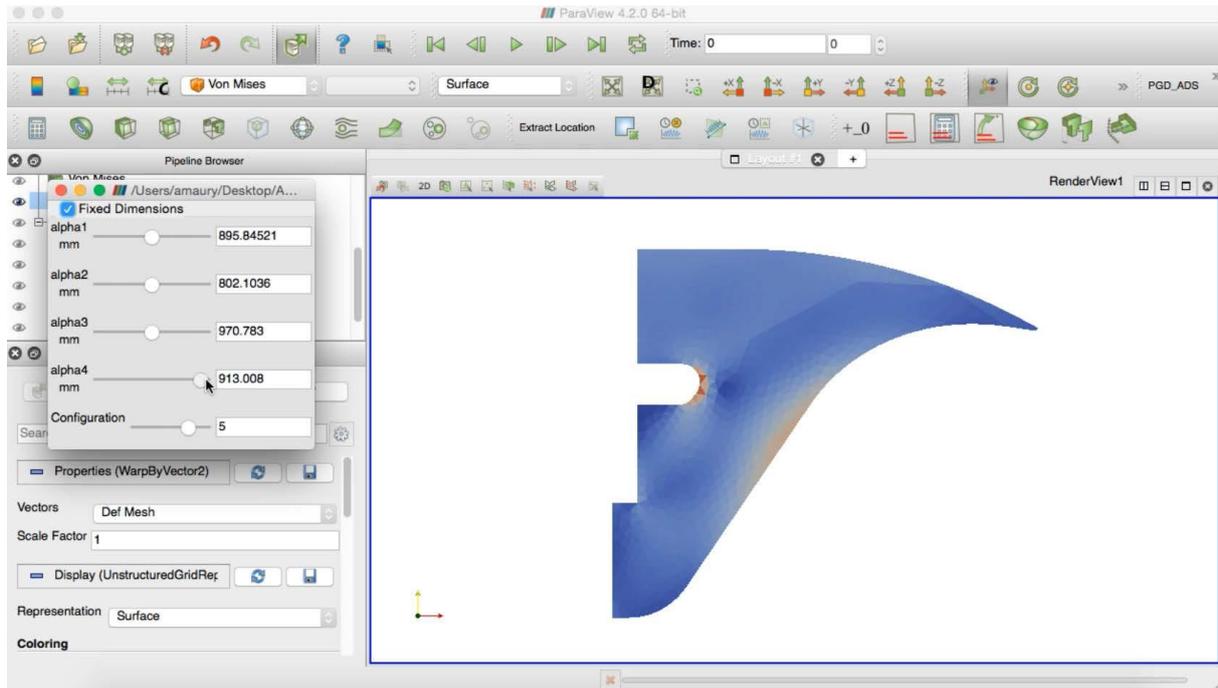


Les turbomoteurs d'hélicoptères sont des assemblages complexes de différents organes comportant des roues aubagées. La conception de ces roues nécessite des modèles éléments finis pouvant comporter des centaines de milliers de degrés de liberté (DDL), faisant de la réduction de modèle, pour SAFRAN Turboméca, une démarche indispensable pour le dimensionnement de ces composants. Une difficulté supplémentaire est la présence d'hétérogénéités et d'usure du matériel qui empêchent toute prise en compte de symétrie. Les techniques classiques de CMS (Component Mode Synthesis) de type Craig-Bampton peuvent être utilisées, afin de réduire le nombre de degrés de liberté, tout en autorisant une perte en prenant en compte la symétrie. Cependant, les phénomènes non-linéaires complexes, comme la friction en pied d'aube ou en tête de pale conduisent SAFRAN Turboméca à employer des approches fréquentielles, comme l'approche HBM 'Harmonic Balance Method', couplées à des techniques de condensation. Mais la prise en compte du désaccordage (prise en compte des dispersions entre secteurs) en présence de non-linéarités demande à SAFRAN Turboméca le développement d'approche CNCMS par modes non-linéaire, couplée à des techniques de sous-structuration CMS. Ce développement est au cœur des recherches actuelles de SAFRAN Turboméca. SAFRAN Turboméca a une collaboration étroite avec ANSYS.

L'exposé d'AIRBUS Defence & Space (L. Ballère) porte sur le prédimensionnement, en statique, de structures à géométrie complexe, avec en toile de fond l'optimisation en termes de masse. La procédure habituelle demande la construction de modèles éléments finis pour chaque configuration et la réalisation d'un grand nombre de calculs. Elle demande beaucoup de temps et est onéreuse. Aussi, AIRBUS Defence & Space s'intéresse à l'utilisation d'abaques virtuels dans la logique de justification (construction offline d'abaques), en s'appuyant sur la PGD (en collaboration avec l'école normale supérieure Paris-Saclay). La formulation PGD en variables séparées (temps, espace) avec prise en compte de paramètres (Module d'Young, variations géométriques) permet un gain de coût important. Ces abaques sont construites 'offline' avec utilisation en temps réel. Cette approche, interfacée avec le logiciel SAMCEF, a été validée sur un démonstrateur industriel, une pièce métallique d'une structure de lanceur.



Abaque virtuel pour une quantité d'intérêt



ESI Group (F. Daim) souligne l'importance de la simulation numérique dans l'industrie automobile dans les études d'influence des paramètres de conception (masse, la consommation, la sécurité, les coûts,...). La simulation numérique requiert une importance particulière dans le cas de la simulation du crash, simulation fondée sur la méthode des éléments finis et le schéma explicite en temps, qui est chronophage en raison de temps de calcul petits (stabilité). En conséquence, les études paramétriques et d'optimisation nécessitent l'utilisation de modèles réduits. Le modèle réduit développé dans VPS (Virtual Performance Solution) et PAMCRASH est fondé sur un calcul hyper-réduit (paramètres physiques déterminés sur un sous-domaine d'intérêt). Par ailleurs, ESI Group souligne que l'une des difficultés liées aux modèles réduits est leur caractère intrusif dans les logiciels.

La présentation de l'IRT SystemX (Y. Le Guennec) revient sur la thématique du crash. Les industriels tels que RENAULT doivent trouver des solutions pour réduire les temps de développement. La démarche présentée s'appuie ici sur la plateforme ALTERNOVA, plateforme logicielle d'optimisation multidisciplinaire pour la conception et le dimensionnement de systèmes complexes. Elle permet la prise en compte d'un nombre de paramètres supérieurs à 100. La réduction de modèles porte sur les simulations de crash. L'approche s'appuie sur une décomposition CUR de la matrice des simulations (décomposition en un nombre réduit de colonnes et de lignes) et des techniques de régression.

La dernière présentation de la journée (D. Ryckelynck, Mines ParisTech) est consacrée à l'hyper-réduction en mécanique non linéaire des matériaux. Elle souligne la complexité croissante des modèles en mécanique des matériaux (finesse des modèles, augmentation du nombre d'essais, utilisation de la tomographie, traitement d'images, ...) qui conduisent à une explosion des données. Confrontées à cette difficulté, les simulations numériques s'appuient sur l'hyper-réduction, qui permet de simplifier la représentation de l'état d'un système thermodynamique en exploitant une représentation tronquée et simplifiée des variables internes de la structure. Des applications sont présentées : reconstruction d'un champ de température sur une aube, simulation élastoplastique, simulation du soudage, de pièces moulées et d'un système anti-vibration. Elle souligne également l'intrusivité des approches d'hyper-réduction et d'hyper-réduction multidimensionnelle. Le champ d'application des modèles réduits en mécanique est rappelé :

- Thermique transitoire et stationnaire,
- Statique non linéaire des solides,
- Couplages thermo-métallurgico-mécaniques,
- Dynamiques lente des structures,
- Dynamique explicite (mise en forme, crash),
- Soudage.

Les limitations concernent les problèmes de propagation d'onde et la fissuration.

Cette journée, particulièrement riche par les exposés et les discussions, s'est terminée par une table ronde animée par B. Mahieux (SAFRAN). Même si l'utilisation des approches en réduction de modèles reste timide dans les bureaux d'études, nous notons les démarches en métamodèles (ONERA, ANSYS), les premiers outils métiers en dimensionnement statique (AIRBUS), les calculs hyper-réduits sur sous-domaines (ESI Group). Il ressort cependant que les méthodes employées dans les bureaux d'études restent classiques. Le frein au développement des approches en réduction de modèles est leur côté intrusif. Les approches locales/globales permettent cependant de s'affranchir de cet aspect intrusif en greffant le logiciel approprié sur les codes commerciaux. Toutes ces démarches en réduction de modèles sont soumises à un grand avenir, sous réserve d'une implication accrue des développeurs de logiciels, même si nous observons déjà une implication active d'ANSYS, ESI et SAMTECH. Soulignons enfin que la France est en pointe sur la réduction de modèles. En effet, nous observons peu de travaux sur ce sujet aux Etats-Unis.