

AAAF - COMMISSION STRUCTURE

Synthèse de la journée scientifique 3AF

La place du maillage dans la conception de structures aérospatiales

CNES Paris Daumesnil et CNES Toulouse, 8 janvier 2020

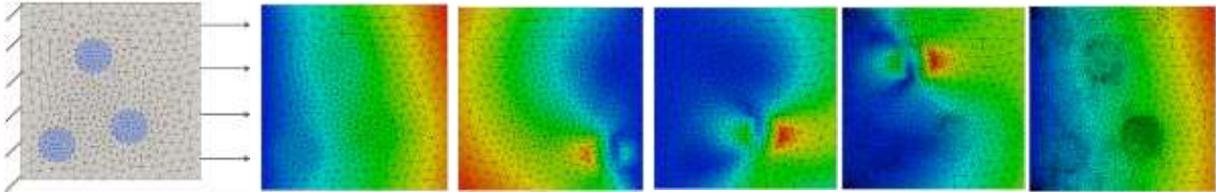
Cette journée, dédiée à la place du maillage dans la conception de structures aérospatiales, qui a été organisée en visio-conférence entre la salle Vinci du CNES/Paris Daumesnil et la salle Léonard de Vinci du CNES/Toulouse par la Commission structures de la 3AF et la COMET Structures du CNES, a réuni 120 personnes (65 à Paris et 55 à Toulouse).

Le maillage est un enjeu majeur de la conception des structures, notamment dans l'industrie aérospatiale, en statique comme en dynamique, y compris rapide, en linéaire comme en non-linéaire, dans les activités d'optimisation et jusque dans la recherche de certification. Les activités de recherche autour du maillage sont toujours très actives. Cette journée se compose de 10 présentations et d'une table ronde, où le monde académique, l'industrie et les services, les petites et les grandes entreprises (ENS Paris-Saclay, INSA Lyon, LaMCoS, IMPETUS, Safran, ONERA, INTES, ArianeGroup, EXPLEO Group, PORTALLIANCE, Dassault Systèmes) ont présenté leurs travaux et avancées sur les enjeux du maillage.

Le premier exposé intitulé *Contrôle de la qualité des simulations numériques en ingénierie : outils robustes d'estimation d'erreur et techniques adaptatives* (Pr. Ludovic Chamoin de l'ENS Paris-Saclay) traite de la certification des simulations numériques, par des outils d'estimation d'erreur et d'adaptation de maillage. Il présente les avancées de recherche réalisées au LMT (ENS Paris-Saclay) au cours de la dernière décennie sur ce sujet, basées sur le concept d'erreur en relation de comportement. Après un état de l'art sur les outils d'estimation d'erreurs disponibles, avec leurs performances et limites, pour assurer la qualité des calculs éléments finis (éventuellement enrichis tels que dans XFEM) pour les problèmes classiques de mécanique des structures (élasticité, plasticité, endommagement, dynamique), les développements récents permettant une mise en œuvre simplifiée de ces outils, avec l'apport de la réduction de modèle et des techniques dites non-intrusives ont été abordés. Puis, un focus a été fait sur l'application des outils pour l'analyse multi-échelle et la réduction de modèle PGD (*Proper Generalized Decomposition*). Enfin, l'exposé a abordé les nouvelles thématiques dans lesquelles la certification des résultats numériques est devenue primordiale, allant du traitement de mesures de champs au contrôle en temps réel de systèmes mécaniques par la simulation.

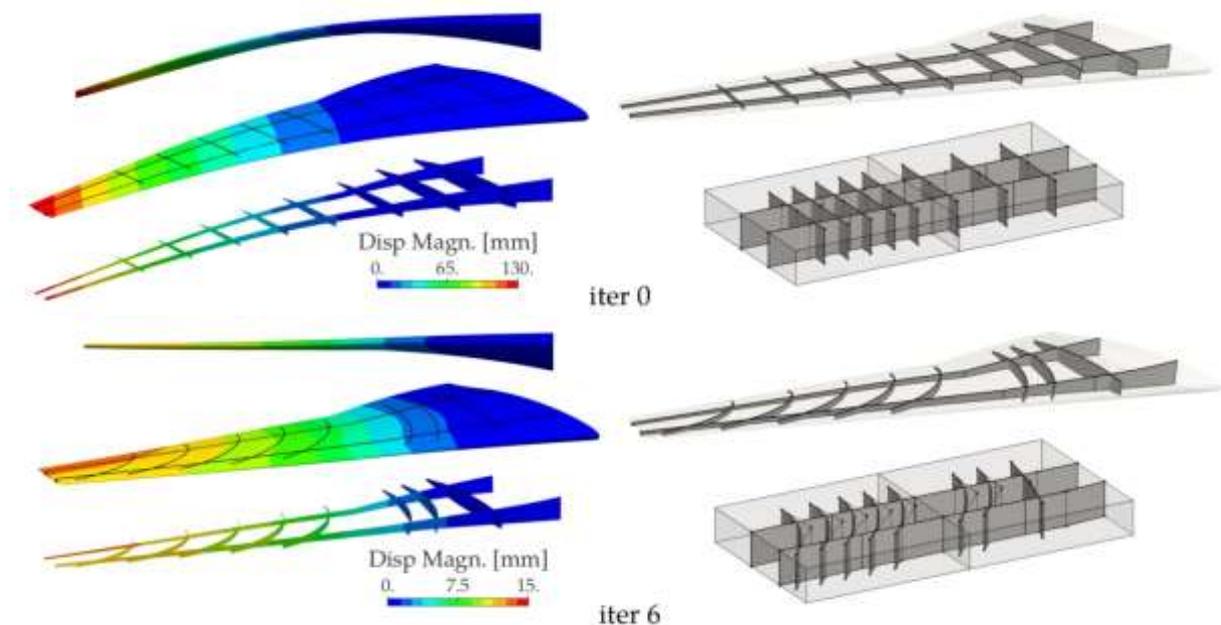


Résultat de calcul d'erreur de discrétisation sur une structure 3D : géométrie et chargement (gauche), maillage (centre), et contributions locales majoritaires de l'erreur (droite)



Modèle PGD avec maillage adaptatif pour un problème d'élasticité avec module de Young paramétré dans chacune des trois inclusions : géométrie et chargement (gauche) et représentation des modes spatiaux 1 à 5

La présentation suivante, intitulée *Analyse isogéométrique : intégration des modèles géométriques et de calcul dans le processus d'optimisation de forme*. Application aux *aérostructures raidies* (Pr. Thomas Elguedj de INSA Lyon / LaMCoS) étudie la relation entre géométrie CAO et géométrie éléments finis. L'analyse isogéométrique, qui vise à accélérer la chaîne CAO-Calcul, s'appuie sur les fonctions NURBS pour représenter la géométrie et pour effectuer l'analyse. La continuité géométrique apporte des gains significatifs dans un grand nombre de problèmes : équations aux dérivées partielles d'ordre supérieur, phénomènes hautes fréquences, coques minces, etc. Un démonstrateur pour le logiciel ABAQUS a été développé et est disponible en open-source. Après une partie de présentation théorique, l'exposé a présenté l'utilisation de cette technique dans le cadre de l'optimisation de forme pour laquelle un gain réel par rapport aux approches classiques éléments finis est observé. Des exemples d'application, tel que l'optimisation de forme de raidisseurs d'ailes d'avions ont permis d'illustrer la méthode.



Modèle géométrique - Etat initial avant optimisation et état final optimisé sur la forme et la position des raidisseurs d'une aile pour une optimisation de la compliance sous la contrainte de volume constant.

L'exposé suivant de IMPETUS par Jérôme Limido intitulé *Approche "sans maillage" Gamma-SPH-ALE pour la modélisation de la fragmentation dynamique des solides et des structures* présente un nouveau schéma SPH robuste baptisé gamma-SPH-ALE, appliqué dans un premier temps aux équations d'Euler, puis étendu à la dynamique des solides. Ce cadre permet notamment de prévenir l'apparition d'oscillations parasites dans les ondes élastiques, ainsi que de résoudre les problèmes d'instabilité en tension, points durs des méthodes SPH standard. En mettant également à profit la parallélisation GPU, les résultats des simulations sont obtenus en des temps de calculs très réduits par rapport aux implémentations CPU.

L'exposé a présenté quelques exemples d'application (impact élasto-plastique de Taylor ; impacts à hyper-vitesse sur structures spatiales corrélés à des essais).

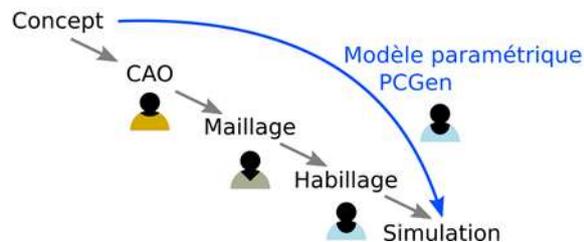
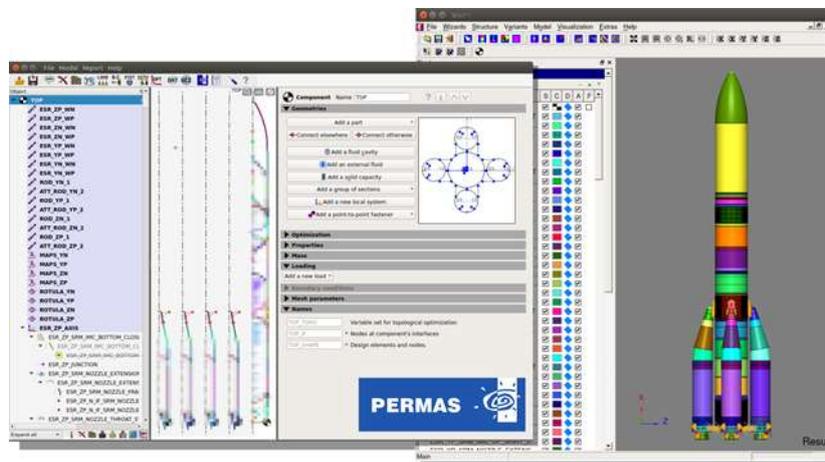
L'exposé de Safran intitulé *Dynamique rapide - méthodologie et état de l'art* a été composé en deux parties. Pour certifier les turbines aéronautiques, la justification de la rétention des débris en cas de rupture d'une pale de turbine nécessite d'évaluer le nombre de débris générés. Hervé Chalons, de Safran Helicopter Engines, a présenté des simulations ayant permis en 2019, et pour la première fois à Safran Helicopter Engines, l'obtention de certifications en se basant sur des simulations EF pour démontrer la résistance des pales « suiveuses » à l'impact de la pale rompue. Ces simulations sont caractérisées par la prise en compte d'un matériau monocristallin fonctionnant dans des conditions de température extrême. L'exploitation de ces simulations en certification a été rendue possible grâce à la qualité des outils et aux choix de modélisation, mais aussi grâce à des travaux préparatoires de caractérisation matériaux et de validation par essais sur échantillons technologiques et sur essais moteur. Pour la certification des moteurs d'avions, il est nécessaire de démontrer le comportement du moteur en cas d'événements exceptionnels : ingestion de corps étrangers et perte d'aube fan (FBO). Dans ce but, les essais réalisés s'appuient sur des modélisations complexes (notamment par éléments finis) permettant de reproduire le comportement du moteur. Le maillage utilisé pour ces simulations étant un élément essentiel, Arnaud Pougis, de Safran Aircraft Engines, a présenté la mise en évidence d'une part des particularités liées à la dynamique rapide et d'autre part de la place du maillage pour représenter les différentes physiques des phénomènes étudiés (assurer la convergence, gérer les contacts, prendre en compte des endommagements).

L'exposé de Safran Helicopter Engines par Christophe Colette, intitulé *Les éléments-finis en conception mécanique : quels apports ?* a présenté une réflexion sur la bonne utilisation des analyses par éléments finis. Dans un contexte industriel, le choix d'un modèle adapté, allant du 0D (pas de calcul) à des modèles numériques complexes (éléments finis 3D non linéaires par exemple) permet de concentrer les ressources là où c'est nécessaire. Les éléments finis (EF) sont largement utilisés dans les conceptions mécaniques : validation de modèles de moindre complexité, calculs de durées de vie, de jeux en fonctionnement, préparation d'instrumentation d'essai, aide aux expertises, etc. La crédibilité des résultats obtenus demande un savoir-faire exigeant, des modèles numériques validés et des moyens de vérification complémentaires (check-list par exemple). Parmi les perspectives les plus intéressantes des EF sont identifiées : l'intégration dans des chaînes de modélisation capable de prendre en compte les sources d'incertitude, la modélisation des procédés (soudage, cémentation, etc.) et l'optimisation topologique en lien avec la fabrication additive.

La présentation suivante, intitulée *Approches par remaillage adaptatif pour la mécanique non-linéaire des structures* par Vincent Chiaruttini (ONERA et Université Paris-Saclay) a montré des approches par remaillage adaptatif pour des applications en mécanique des matériaux et des structures. En lien avec des méthodes d'estimation d'erreur a priori ou a posteriori, des algorithmes robustes d'intersection entre éléments surfaciques sont utilisés pour le suivi dynamique d'interfaces mobiles lors de simulations multi-physiques ou de modèles numériques multi-échelles. À l'aide de nouvelles méthodes de transfert de champs, la présentation a montré comment assurer la consistance des résolutions sur des discrétisations évolutives de problèmes fortement non-linéaires. Enfin, ont été présentés quelques résultats récents sur le développement d'approches par remaillage adaptatif parallèle dans le cadre de solveurs hautes performances par décomposition de domaine.

L'exposé suivant intitulé *PERMAS Component Generator : outil de modélisation rapide. Exemples d'application spatiale*, par Jacques Marchesini et Marie Lequoy de INTES France et Aurélien Sénéchal et Vincent Le Gallo de ArianeGroup a présenté le développement d'un logiciel de pré-dimensionnement pour Ariane 6 dans le cadre du projet Launch Design Optimisation. Le développement de systèmes complexes comme un lanceur spatial en des

temps très courts nécessite de simuler rapidement de très nombreuses variantes tout en intégrant des physiques complexes comme le couplage fluide-structure, le ballotement, les liaisons boulonnées, etc. L'outil PCGen (PERMAS Component Generator) est un module de la suite logicielle PERMAS qui permet aux concepteurs de modéliser rapidement et facilement des structures quasi-axisymétriques tout en respectant des standards d'entreprise (labels, nomenclature, règles de maillage, etc.). Basé sur une bibliothèque de géométries pré-paramétrées, plutôt orientée sur des structures de type lanceur, PCGen permet de s'affranchir de la création de CAO et des opérations de maillage associées (tâches souvent complexes et fastidieuses en avant-projet), pour se concentrer sur l'essentiel : simuler pour concevoir. L'analyse de très nombreuses variantes (changement de géométrie, d'épaisseurs, matériaux, finesse de maillage, etc.) en des temps raccourcis devient alors accessible tout en assurant leur traçabilité grâce à des outils de documentation intégrés. Le module PCGen permet également de transformer "en un simple clic" la géométrie paramétrique en un modèle EF paramétré directement exploitable par le solveur PERMAS pour des optimisations combinées paramétriques (forme, distribution d'épaisseur, etc.) et topologiques.



*Illustration d'usage de l'outil PCGen (PERMAS Component Generator)
INTES France & Ariane Group*

Dans l'exposé intitulé *Advanced Detailed Finite Element Model (ADFEM)*, Bertrand Girardeau de EXPLEO Group et Bruce De Witt de PORTALLIANCE ont présenté l'Advanced Detailed Finite Element Model (ADFEM) qui consiste en une approche globale de modélisation d'aérostructure en maillage fin (2D dans un premier temps et 3D pour les zones critiques identifiées) avec pour objectif de se rapprocher le plus possible de la structure physique et de créer ainsi un jumeau numérique calcul de la maquette CAO. Ce jumeau numérique calcul est géré automatiquement en configuration afin d'assurer une adéquation CAO / Modèle Eléments Finis. Associé à des puissances de calcul importantes (HPC) et des stratégies de codage permettant d'optimiser le post-traitement des données, l'ADFEM est conçu pour obtenir rapidement et de façon visuelle des résultats de calcul et permettre une approche de concurrent engineering entre les équipes design et calcul sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

Dans l'industrie aéronautique, durant les différentes phases de conception, il y a des besoins en simulation : depuis des coupons en passant par des sous-ensembles jusqu'aux modèles globaux. Ces modèles sont généralement constitués d'assemblages complexes qui nécessitent d'être maillés le plus efficacement possible. Dans le dernier exposé de la journée, *Gestion d'assemblages et simulations de validation en 3DExperience Plateforme*, Patricia Millot de 3DS présente la plateforme 3DExperience de Dassault Systèmes. Celle-ci héberge un ensemble d'applications permettant de préparer la géométrie, de la mailler en automatique, de faire la mise en données et de lancer les simulations tout en gardant l'associativité avec la géométrie.

Cette journée, particulièrement riche par les exposés et les discussions, s'est terminée par une table ronde où plusieurs aspects ont été discutés.

Quels sont les axes pour améliorer le maillage ?

Le maillage prend encore beaucoup de temps et nécessite de l'expertise, notamment la maquette numérique CAO n'est pas directement adaptée au maillage. Il faut donc maintenir la formation au maillage. Au-delà du maillage initial, il faut mettre l'accent sur les outils de remaillage pour améliorer l'efficacité du calcul. Les maillages sont différents selon le type d'analyse (statique, vibratoire, multiphysique, etc.), mais le maillage universel reste encore un horizon assez lointain.

Comment faire du maillage automatique à partir de la CAO ?

On a besoin de faire une bonne CAO pour faire un bon maillage mais la CAO habituelle n'est pas une représentation adaptée au maillage. Comme il est peu probable de pouvoir changer la géométrie de la CAO, les outils de maillage doivent intégrer la possibilité d'adapter la CAO. La question de l'apport de l'intelligence artificielle pour le maillage a été mentionnée.

Qu'en est-il de l'estimation d'erreur et de la convergence ?

On a tendance à vouloir affiner le maillage à tout prix, mais cela peut être contre-productif ou non physique. Des estimateurs d'erreurs permettraient d'amener les utilisateurs à dé-raffiner les maillages. La convergence devrait se faire de manière automatisée avec le maillage.

Quels sont les freins aux changements de méthode de calcul ?

D'un point de vue industriel, changer de méthode de calcul implique de reformer les utilisateurs, les sous-traitants, de revalider les modèles par pyramides d'essais etc., ce qui représente un coût important. De plus, changer de méthode implique aussi de perdre des années de développements sur les outils et méthodes précédents. Le retour sur investissement doit donc montrer l'intérêt économique de tels changements.