

Project MORPHEUS

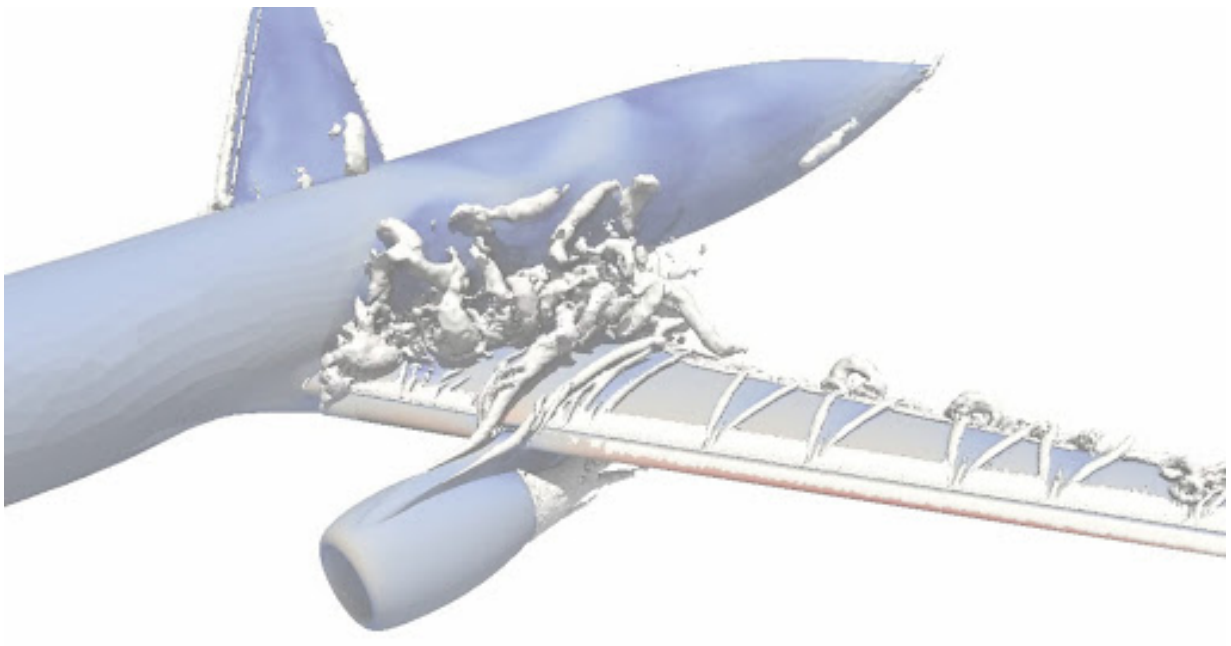
Model Order Reduction for multi-PHysical and Energy-Unified
Systems

Andrea Brugnoli

Docteur ISAE-Supaéro 2020

Ingénieur ISAE-Supaéro 2017

Dossier de candidature au prix de la fondation Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta pour l'excellence académique.



Source: [FEniCS-HPC website](#)

1 Résumé du projet

Le but du projet MORPHEUS consiste à mettre en place des méthodes numériques pour accélérer la simulation des problèmes d'interaction fluide-structure (IFS), par rapport au temps de calcul requis pour une simulation haute-fidélité. Il sera donc possible d'intégrer des modèles plus économiques, qui pourront remplacer des simulations très coûteuses, et ainsi de faciliter le design et la prise de décisions. A la différence de plusieurs méthodes proposées dans la littérature, l'impératif est la fidélité à la structure physique du problème. Cette structure est le plus souvent ignorée par les algorithmes de réduction, qui traitent les simulations comme des boîtes noires. Les modèles réduits respectueux de la physique sont beaucoup plus précis que ceux qui ne la garantissent pas et leur utilisation pourra radicalement améliorer les techniques normalement utilisées pour la réduction des modèles et l'optimisation. Pour réaliser son ambition, ce projet vise à utiliser des formalismes mathématiques récents pour la modélisation multiphysique et la digitalisation des modèles. Les outils capables de prédire précisément le comportement des systèmes complexes ont une importance fondamentale pour nous aider à affronter les prochains défis technologiques et sociétaux. Le fait que cette année le Prix Nobel de Physique ait été attribué à trois chercheurs travaillant sur ce sujet¹ confirme l'importance et l'actualité de cet axe de recherche.

2 Développement du projet scientifique

2.1 Contexte

L'ingénierie computationnelle est une science récente, multidisciplinaire et en expansion rapide. Son but consiste à mettre en place des modèles mathématiques et numériques pour prédire le comportement des systèmes complexes. Cela permet d'éviter l'utilisation des tests expérimentaux très coûteux pour les systèmes en phase de conception et de détecter des fautes pendant le cycle de vie des composants. Ce domaine est en expansion rapide car aujourd'hui on dispose des ordinateurs plus puissants et surtout parce que, grâce au développement des codes open source, les logiciels de calcul sont beaucoup plus accessibles, robustes et faciles à utiliser. Toutefois les problèmes multiphysiques, qui sont centraux dans les applications industrielles, sont extrêmement compliqués à traiter. Cela est dû d'une part à la difficulté associée au traitement

¹<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>

des différentes physique et d'autre part à la taille des systèmes obtenus, qui nécessitent des plusieurs jours, voir plusieurs semaines, pour être résolu à l'aide d'un supercalculateur [1].

Un formalisme mathématique très prometteur pour accomplir cette tâche est le formalisme port-Hamiltonienne, basé sur la mécanique Hamiltonienne et les graphes de liaisons pour la modélisation des systèmes dynamiques. Au cœur de ce formalisme il y a l'idée que tout système physique peut être décrit d'une manière modulaire, c'est à dire à partir des ses composant simples, qui interagissent entre eux et avec le milieu environnant à travers des portes. Les portes d'interactions contiennent l'information relative au flux d'énergie entre les différents composants et entre différents domaines physiques (mécanique, électromagnétisme ou fluidodynamique). La conception modulaire est fondamentale dans l'ingénierie, car le design de tout système technologique est fait à partir des éléments simples qui sont assemblés pour donner lieu à la complexité qui nous entoure. Prenez par exemple un avion, un hélicoptère, un satellite ou un téléphone portable : pour pouvoir optimiser leur design il est indispensable de disposer d'un outil de modélisation capable de décomposer la complexité d'une manière à retrouver les différents composants clés.

Aujourd'hui ce formalisme a désormais atteint le niveau de maturité nécessaire pour attaquer les applications industrielles. Le professeur Volker Mehrmann, vice-président de la société mathématique européenne (EMS), en est pleinement convaincu, et il a récemment illustré les avantages de cette approche lors de la SIAM Conference on Computational Science and Engineering en 2021². Ce niveau de maturité est aussi attesté par le fait que le conseil de la recherche européen (ERC) à récemment attribué au Prof. Stefano Stramigioli une subvention de 2.8 millions € pour le projet Portwings³. Ce projet, dans le quel je suis impliqué pour mon post-doctorat, cherche à améliorer la compréhension du vol battu pour pouvoir perfectionner le design et la construction des robots biomimétiques. L'ambition réside dans le fait d'utiliser la théorie port-Hamiltonienne pour expliquer les interactions complexes entre l'aérodynamique et la flexibilité de l'aile (cf. Fig. ??).

Pour réaliser un développement substantiel dans les domaines d'application les plus critiques pour la société, des investissements considérables seront nécessaires dans les méthodes mathématiques et informatiques : il faudra disposer de

²https://meetings.siam.org/sess/dsp_programsess.cfm?SESSIONCODE=70329

³<http://www.portwings.eu/>

techniques de déploiement robustes, rapides et accessibles [2]. Étant donné le potentiel du formalisme port-Hamiltonien pour les traitement unifié des problèmes multiphysiques, à travers différentes échelles et précision, il est probable que son adoption en industrie soit de nature à faciliter cette révolution digitale.

2.2 Le projet MORPHEUS

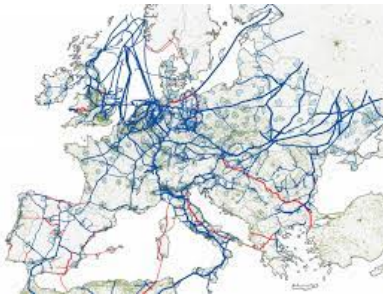
3 Aspects innovants du projet et verrous scientifiques

3.1 État de l’art

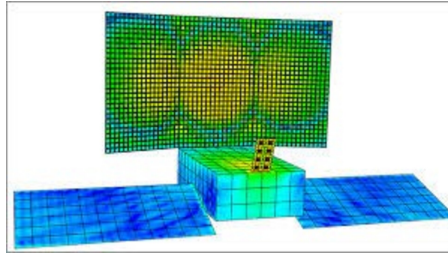
Le coût prohibitif des simulations numériques pour les problèmes couplés d’interaction fluide-structure a poussé la communauté scientifique à concevoir des algorithmes capables de réduire la complexité des modèles. La grande majorité de ces méthodes supposent que l’on puisse obtenir un système réduit à travers une méthode essentiellement linéaire, i.e. la Décomposition Orthogonale en Valeurs Propres (POD) [3, 4]. Cette hypothèse nest pas valable pour tout système exhibant un comportement non-linéaire et conduit à surestimer la dimension du système réduit [5]. Grâce aux progrès récents dans le domaine de l’Intelligence Artificielle (IA), de nouvelles méthodes permettent d’obtenir des modèles réduits rapides. Certaines méthodes utilisent les données issues des simulations fines [6], d’autres ne demandent pas de simulations coûteuses, mais cherchent à minimiser la violation des principes physiques [7]. Toutes ces méthodes ne garantissent pas le respect de la structure physique dans toute la chaîne qui aboutit au modèle final.

3.2 Verrous scientifiques

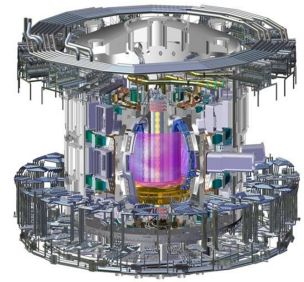
Le premier défi du projet consiste à implémenter des méthodes numériques pour la résolution des systèmes couplés multiphysiques. Ces modèles numériques devront retenir les propriétés physiques du problème (conservation d’énergie globale, traçage des échanges d’énergie entre les différents sous-systèmes, conservation d’invariants du problème). Dans l’industrie habituellement, des méthodes différentes sont utilisées pour simuler des physiques distinctes. Par conséquent, le couplage numérique ne représente pas correctement les flux d’énergie. L’utilisation d’un paradigme de modélisation unifié permettra donc d’effectuer les couplages de manière à respecter la physique.



(a) Réseau européen du gaz ([Lien source](#))



(b) Logiciel simulation antenne reflectarray ([Lien source](#))



(c) Le réacteur du projet ITER ([Lien source](#))

Figure 2: Exemple de cas d'application des outils computationnels développés dans le cadre du projet MORPHEUS.

Le second challenge du projet consiste à intégrer des techniques issues de l'Intelligence Artificielle, qui seront utilisées pour obtenir des modèles réduits. Une technique très prometteuse en ce sens est présentée dans [6], mais ici le respect des lois physiques est imposé a posteriori au travers de contraintes et non pas inclus au niveau de la structure de départ. Dans [7] des réseaux de neurones, entraînés pour minimiser l'erreur par rapport au bilan de masse et de la quantité de mouvement, sont utilisés pour saffranchir de la simulation haute fidélité. Pourtant, cela ne garantit pas le respect de la structure physique et pose des soucis au niveau de l'interprétabilité des résultats. Conserver la structure physique de la simulation haute fidélité dans la représentation réduite permettra d'intégrer des outils d'intelligence artificielle d'une façon interprétable.

Le dernier objectif consistera à utiliser ces modèles réduits pour optimiser le design mécanique des structures, et vérifier la validité des modèles réduits. Cette étape permettra d'évaluer la validité et l'efficacité des modèles réduits par rapport aux simulations fines. Typiquement dans l'industrie l'optimisation et les études paramétriques sont effectuées sur les modèles fins, mais cela comporte des investissements considérables en termes de temps et de ressources de calcul. Les modèles réduits seront plus rapides mais inévitablement moins précis par rapport aux simulations fines. Venir à bout de ces trois macro-tâches permettra de mieux comprendre le compromis entre temps de calcul et précision pour des applications d'intérêt industriel.

3.3 Domaines d'application

Au-delà de laéronautique, où laéroélasticité et le design des turbomachines restent un challenge essentiel, différents secteurs d'applications pourront bénéficier des outils développés dans le cadre de ce projet (cf. Fig 2):

- Pour réduire les coûts associés à la maintenance des réseaux de distribution (énergie électrique, gas, hydrogène ou hydraulique), des méthodes structurées capables de représenter une hiérarchie de modèles sont nécessaires. Le coût de calcul est trop élevé pour pouvoir optimiser ces modèles directement.
- Afin de fournir des services Internet dans des endroits sans accès haut débit, une solution prometteuse consiste à utiliser des constellations de satellites équipés d'antennes constituées de différents modules réflecteurs (reflectarray). Pour concevoir ces modules, des modèles intégrant lélectromagnétisme et la thermomécanique sont nécessaires.
- La production dénergie à partir de la fusion nucléaire pose énormément de défis technologiques, à cause des conditions extrêmes de fonctionnement pour le réacteur. La fusion nucléaire représente un cas typique de problème multiphysique, où la dynamique des fluides interagit avec lélectromagnétisme d'une manière complexe.

3.4 Portée du projet

Les outils capables de prédire le comportement des systèmes complexes ont une importance fondamentale pour nous aider à affronter les prochains défis technologiques et sociétaux. Le fait que cette année le Prix Nobel de Physique ait été attribué à trois chercheurs travaillant sur ce sujet⁴ confirme l'importance et l'actualité de cet axe de recherche. Disposer d'outils quantitatifs performants pour traiter et comprendre la complexité qui nous entoure contribue :

1. à faciliter le design des technologies opérantes, et à les pousser dans conditions extrêmes (avions très flexibles, turbomachines, fusées, etc.);
2. à prévenir les risques dus au vieillissement des infrastructures, bâtiments (lusure des matériaux introduit des non-linéarités);

⁴<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>

Le fait d'utiliser un outil de modélisation unifié représente une nouveauté essentielle de ce projet. Cela pourra permettre la création d'une infrastructure commune pour les outils numériques à la base de la digitalisation, et donc faciliter son adoption dans l'industrie.

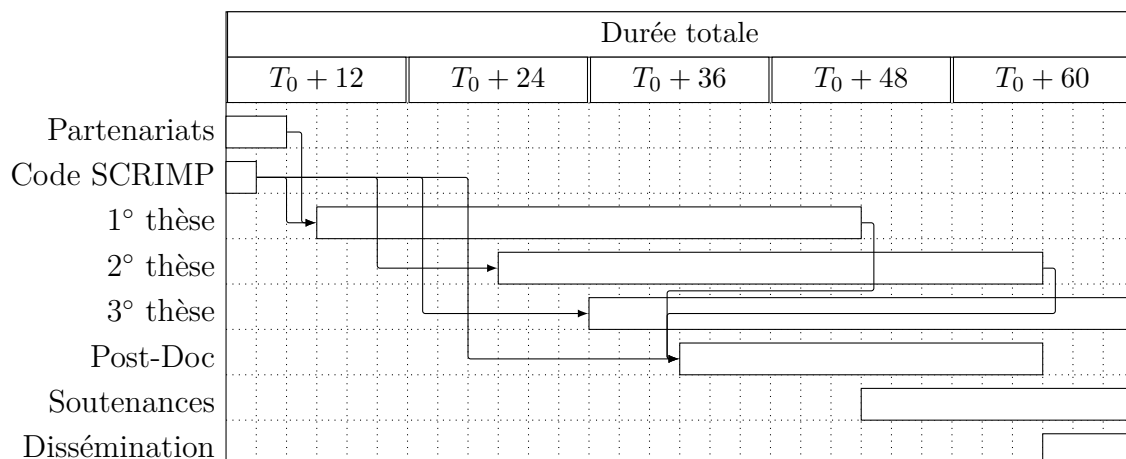
4 Organisation du projet

Le projet est divisé en trois work packages :

1. Développement d'algorithmes numériques haute-fidélité pour des problèmes d'interactions fluide-structures.
2. Méthodes de réduction garantissant le respect de la structure physique.
3. Utilisation des modèles réduits pour l'optimisation multidisciplinaire et comparaison avec les modèles haute-fidélité.

Chaque macro-tâche est directement associée à une thèse. Pour cela les recrutements des trois doctorants et d'un post-doctorant sont prévus, ainsi que la coopération des trois chercheurs. Chacun d'entre eux sera affecté à chaque macro-sujet:

- développement du code pour calcul scientifique;
- développement du code pour la partie intelligence artificielle;
- expertise pour l'optimisation multidisciplinaire.



À la fin du projet, le livrable consistera en un code capable de modéliser des problèmes multiphysiques et de générer des modèles réduits utilisables en lieu et place des modèles haute fidélité.

4.1 Moyens et partenariats

Pour ce que il concerne la mise en place du projet, des différents partenariats en France et à l'international seront mis en place. Pour ce qui concerne les aspect théoriques fondamentaux Bernhard Maschke (Université de Lyon), Arjan van der Schaft (University of Groningen) et Stefano Stramigioli (University of Twente) constitueront les interlocuteurs académiques principaux.

Pour ce qui concerne la première macro-tâche, il sera possible de prolonger le travail effectué dans le cadre de ma thèse, qui a donné lieu a un code de calcul pour application multiphysique (le code SCRIMP décrit dans [8]). Ce code sera ultérieurement développé pour traiter des problèmes d'interaction fluide-structure. Pour ce qui concerne la préservation de la physique au sein des algorithmes, des collaborations avec Marc Gerritsma (département d'aérodynamique de l'Université de Delft) et Herbert Egger (Johannes Kepler University Linz) seront mises en place. Pour ce qui concerne l'interaction fluide-structure, l'office National d'Études et de Recherches Aérospatiales (ONERA), garant d'une profonde expertise en ce domaine, représentera l'interlocuteur principal pour les problèmes liés au couplage multiphysique.

Pour ce qui concerne la deuxième macro-tâche, i.e. la réduction des modèles, il sera possible de mettre en place des collaboration avec Charles Poussot-Vassal (chercheur principal à l'ONERA), Volker Mehrmann (TU Berlin) et George Haller (ETH Zurich).

Pour la troisième partie, il sera important de dialoguer avec Joseph Morlier (ISAE-Supaéro et Institut Clément Ader).

4.2 Budget

Dépense	Coût
Porteur du projet (temps plein)	$5 \times 60000 = 300000$
3 doctorants (temps plein)	$3 \times 3 \times 40000 = 360000$
1 Post-Doc (temps plein)	$2 \times 55000 = 110000$
Personnels ISAE	100000
Matériel et calcul HPC	60000
Frais annexes (conférences, workshops)	60000
Total	1000000

References

- [1] David E Keyes, Lois C McInnes, Carol Woodward, William Gropp, Eric Myra, Michael Pernice, John Bell, Jed Brown, Alain Clo, Jeffrey Connors, Emil Constantinescu, Don Estep, Kate Evans, Charbel Farhat, Ammar Hakim, Glenn Hammond, Glen Hansen, Judith Hill, Tobin Isaac, Xiangmin Jiao, Kirk Jordan, Dinesh Kaushik, Efthimios Kaxiras, Alice Koniges, Kihwan Lee, Aaron Lott, Qiming Lu, John Magerlein, Reed Maxwell, Michael McCourt, Miriam Mehl, Roger Pawlowski, Amanda P Randles, Daniel Reynolds, Beatrice Rivière, Ulrich Rüde, Tim Scheibe, John Shadid, Brendan Sheehan, Mark Shephard, Andrew Siegel, Barry Smith, Xianzhu Tang, Cian Wilson, and Barbara Wohlmuth. Multiphysics simulations: Challenges and opportunities. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 27(1):4–83, 2013.
- [2] Steven A. Niederer, Michael S. Sacks, Mark Girolami, and Karen E. Willcox. Scaling digital twins from the artisanal to the industrial. *Nature Computational Science*, 1(5):313–320, May 2021.
- [3] Vilas Shinde, Elisabeth Longatte, Franck Baj, Yannick Hoarau, and Marianna Braza. Galerkin-free model reduction for fluid-structure interaction using proper orthogonal decomposition. *Journal of Computational Physics*, 396:579–595, 2019.
- [4] Alexis Tello, Ramon Codina, and Joan Baiges. Fluid structure interaction by means of variational multiscale reduced order models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 121(12):2601–2625, 2020.
- [5] Gaetan Kerschen, Jean-claude Golinval, Alexander F. Vakakis, and Lawrence A. Bergman. The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems: An overview. *Nonlinear Dynamics*, 41(1):147–169, Aug 2005.
- [6] Kookjin Lee and Kevin T. Carlberg. Model reduction of dynamical systems on nonlinear manifolds using deep convolutional autoencoders. *Journal of Computational Physics*, 404:108973, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.108973>.
- [7] Luning Sun, Han Gao, Shaowu Pan, and Jian-Xun Wang. Surrogate modeling for fluid flows based on physics-constrained deep learning without simulation data. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 361:112732, 2020.
- [8] A. Brugnoli, G. Haine, A. Serhani, and X. Vasseur. Numerical approximation of port-Hamiltonian systems for hyperbolic or parabolic pdes with boundary control. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 9:1278–1321, 2021. <https://doi.org/10.4236/jamp.2021.96088>.