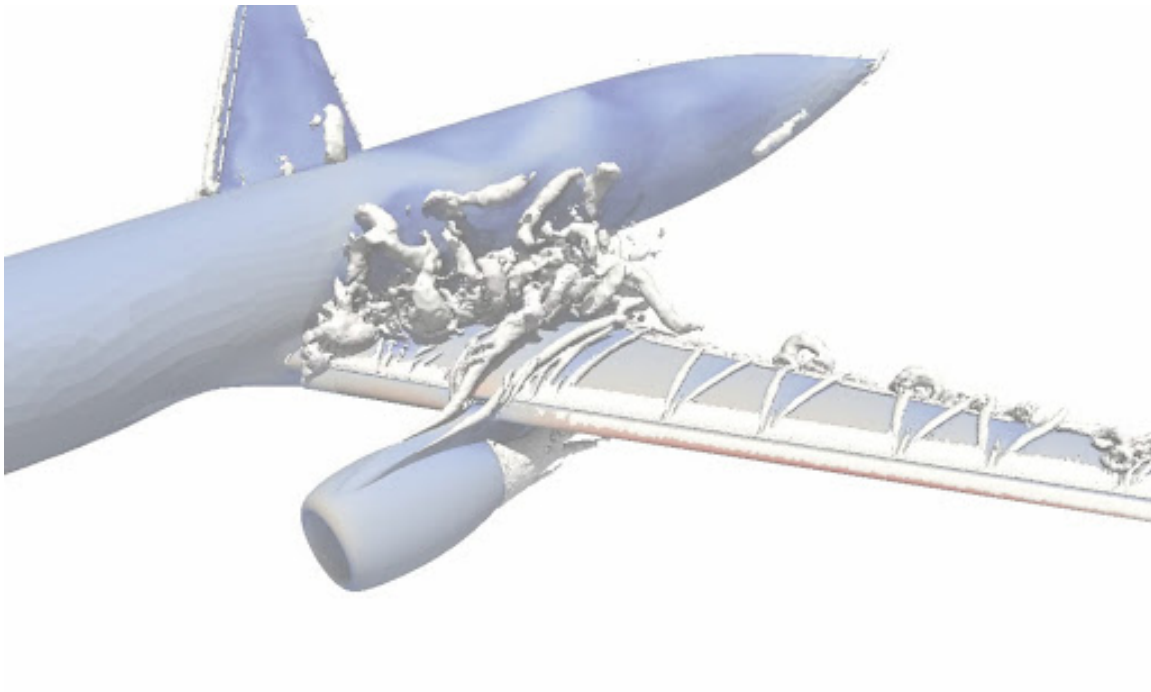


# Project MORPHEUS

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 Contexte et objectifs du projet

## 1.1 Le candidat

La technologie, les sciences et leur impact sur l'humain m'ont toujours intéressé. C'est pour cela que j'ai opté pour un baccalauréat littéraire avec option informatique (obtenu en 2011 à Vérone, Italie). Après mon baccalauréat<sup>1</sup>, j'ai obtenu une licence en ingénierie mécanique du Politecnico de Milan. Pendant la première année du master en ingénierie Spatiale, j'ai décidé de partir à l'étranger et j'ai choisi d'effectuer un double diplôme à l'ISAE-SUPAERO. J'ai pu approfondir mes connaissances en automatique grâce à un Master Recherche en collaboration avec Supélec/Université Paris Saclay, ainsi que mes compétences en mathématiques appliquées à travers un parcours spécialisé. Mon intérêt pour les systèmes dynamiques et la simulation m'a amené au centre national d'études spatiales (CNES) pour mon stage de fin études, où j'ai effectué des simulations intensives sur le supercalculateur.

J'ai donc décidé de poursuivre un doctorat de recherche en automatique et mathématiques appliquées (calcul numérique), au sein du projet ANR-DFG INFIDHEM (Inter-connected Infinite-Dimensional Systems for Heterogeneous Media). Le projet consistait à utiliser un formalisme mathématique capable de traiter d'une manière unifiée les problèmes multi-physiques. Mon travail était centré sur la modélisation et discrétisation des structures flexibles minces, très utilisées dans l'aéronautique (cf. Fig 2). Mes travaux de thèse ont été présentés devant un jury international (Thomas Hélie, directeur de Recherches DR2 au CNRS, Yann Le Gorrec, Professeur ENSMM et Alessandro Macchelli, professeur associé à l'Université de Bologne) et ont été diffusés au travers de conférences internationales et de 5 articles de revue rédigés par le candidat [1, 2, 3, 4, 5].

Ma forte curiosité pour les thématiques de ma thèse ne m'a pas abandonné par la suite. C'est pour cela que j'ai décidé de continuer en Post-Doc à l'Université de Twente aux Pays Bas, au sein d'un projet qui vise à étendre la compréhension des mécanismes physiques sous-jacents au vol biologique (en particulier les oiseaux). Mon rôle consiste à mettre en place des algorithmes numériques capables de reproduire fidèlement la structure physique du problème [6].

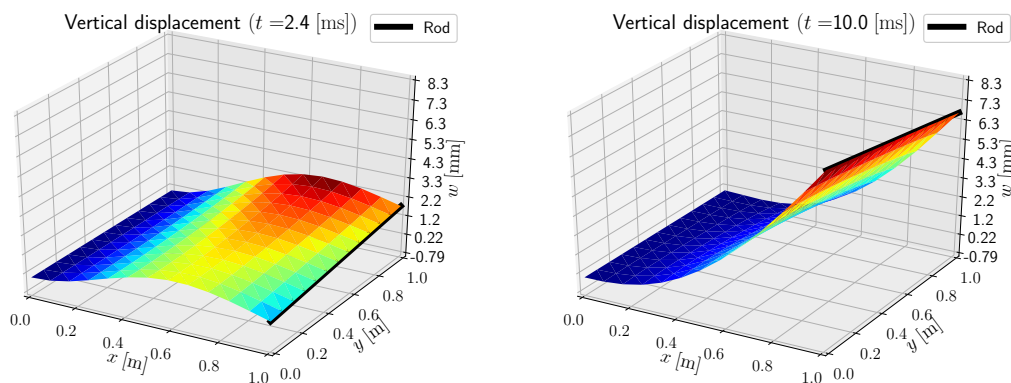


Figure 2: Simulation d'une plaque mince flexible connectée à une poutre rigide.

---

<sup>1</sup>En Italie il est possible d'accéder aux universités scientifique après un Bac. L.

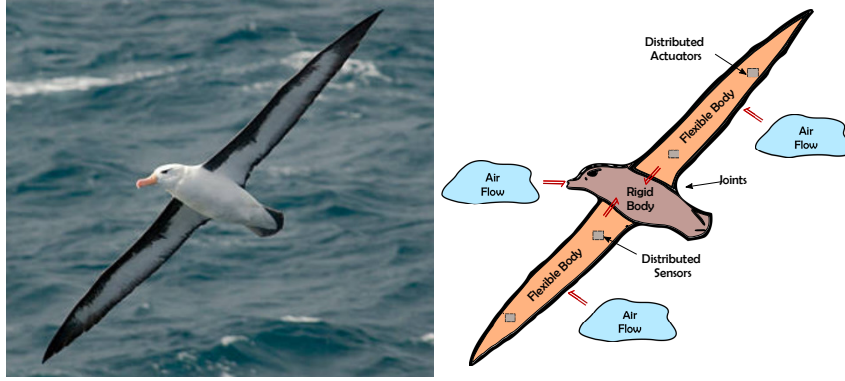


Figure 3: Modèle d'un oiseau robotique bio-inspiré.

## 1.2 Contexte

Ma thèse s'est inscrite dans le cadre d'un projet européen financé par l'agence national de la recherche (ANR) et la Fondation allemande pour la recherche (DFG). L'ambition du projet était de pousser la compréhension d'un formalisme mathématique issu de la physique et de la théorie des systèmes pour le traitement unifié de divers domaines d'applications (mécanique des solides, des fluides, l'électromagnétisme et la thermodynamique). Il s'agit du formalisme port-Hamiltonien, basé sur la mécanique Hamiltonienne et les graphes de liaisons pour la modélisation des systèmes dynamiques. Il y a 30 ans, le premier article sur cette théorie était publié. Dans le cadre de ma thèse, j'ai pu contribuer à étendre ce formalisme vers les applications, en développant des modèles mathématiques et numériques pour la mécanique des structures flexibles [1, 2], la mécanique multi-corps flexibles [3] et la thermoelasticité [4].

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 2021<sup>2</sup>. Ce niveau de maturité est aussi attesté par le fait que le conseil de la recherche européen (ERC) a récemment attribué au Prof. Stefano Stramigioli une subvention de 2.8 millions € pour le projet Portwings<sup>3</sup>. 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. 3).

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 techniques de déploiement robustes, rapides et accessibles [7]. 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.

<sup>2</sup>[https://meetings.siam.org/ess/dsp\\_programsess.cfm?SESSIONCODE=70329](https://meetings.siam.org/ess/dsp_programsess.cfm?SESSIONCODE=70329)

<sup>3</sup><http://www.portwings.eu/>

### 1.3 Le projet MORPHEUS

Le but de ce projet de recherche consiste à mettre en place des méthodes numériques pour accélérer la simulation des problèmes d’interaction fluide-structure (IFS) d’un facteur 100, par rapport au temps de calcul requis pour une simulation haute-fidélité. La réussite du projet permettra donc d’intégrer des modèles plus économiques, qui pourront remplacer des simulations très coûteuses, et ainsi de faciliter le design et la prise de décisions.

À la différence de plusieurs méthodes proposées dans la littérature, l’impératif de ce projet reste la fidélité à la physique [8]. Le formalisme port-Hamiltonien s’avère être un candidat idéal pour atteindre ce but.

La vision qui sous-tend ce projet est que l’utilisation d’algorithmes fidèles à la structure physique du problème pourra radicalement améliorer les techniques normalement utilisées pour la réduction des modèles et l’optimisation. 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 sous-jacente sont beaucoup plus précis que ceux qui ne la garantissent pas [9].

## 2 Aspects innovants du projet et verrous scientifiques

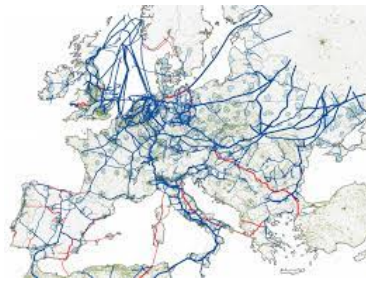
### 2.1 État de l’art

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) [10, 11]. Cette hypothèse n’est pas valable pour tout système exhibant un comportement non-linéaire et conduit à surestimer la dimension du système réduit [12]. 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 [9], d’autres ne demandent pas de simulations coûteuses, mais cherchent à minimiser la violation des principes physiques [13]. Toutes ces méthodes ne garantissent pas le respect de la structure physique dans toute la chaîne qui aboutit au modèle final.

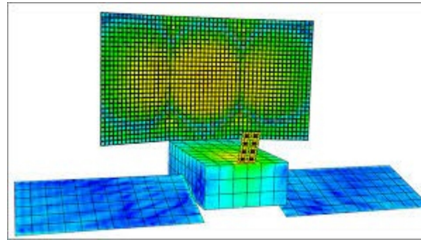
### 2.2 Verrous scientifiques

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.

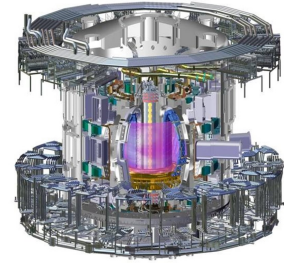
Le second challenge du projet consiste à intégrer des techniques issues de l’Intelligence Artificielle, qui seront utilisées pour obtenir des modèles réduits. Une technique très prometteuse en ce sens est présentée dans [9], mais ici le respect des lois physiques est imposé a posteriori au travers de contraintes et non pas inclus au niveau de la structure de



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



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



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

Figure 4: Exemple de cas d'application des outils computationnels développés dans le cadre du projet MORPHEUS.

départ. Dans [13] des réseaux de neurones, entraînés pour minimiser l'erreur par rapport au bilan de masse et de la quantité de mouvement, sont utilisés pour s'affranchir 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.

### 2.3 Domaines d'application

Au-delà de l'aéronautique, où l'aéroélasticité 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 4):

- 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 l'électromagnétisme et la thermomécanique sont nécessaires.
- La production d'énergie 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 l'électromagnétisme d'une manière complexe.

## 2.4 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 sujet<sup>4</sup> 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 (l'usure des matériaux introduit des non-linéarités);

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.

## 3 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:

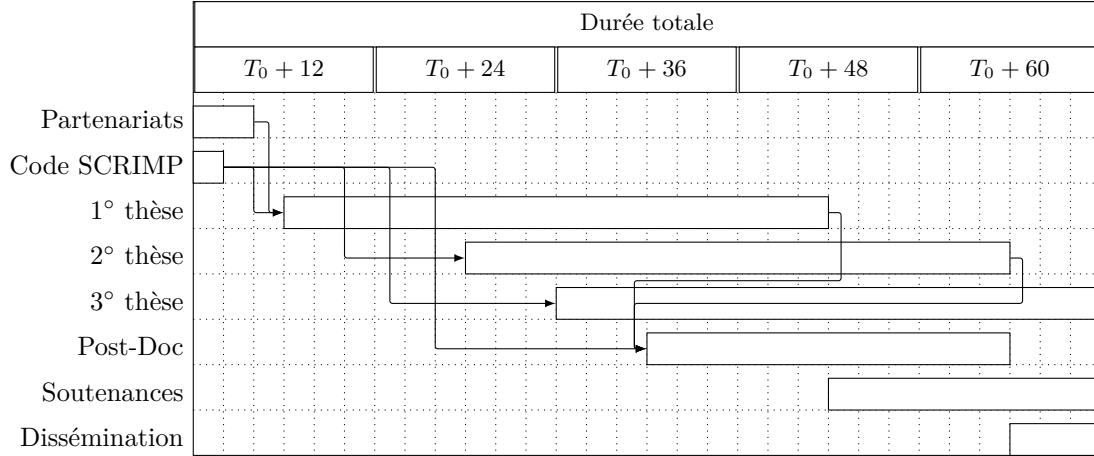
- développement du code pour calcul scientifique;
- développement du code pour la partie intelligence artificielle;
- expertise pour l'optimisation multidisciplinaire.

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.

---

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





### 3.1 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 [5]). 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).

### 3.2 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
<b>Total</b>	1000000

### References

- [1] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Port-Hamiltonian formulation and symplectic discretization of plate models. Part I: Mindlin model for thick plates. *Applied Mathematical Modelling*, 75:940 – 960, Nov 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.04.035>.
- [2] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Port-Hamiltonian formulation and symplectic discretization of plate models. Part II: Kirchhoff model for thin plates. *Applied Mathematical Modelling*, 75:961 – 981, Nov 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.04.036>.
- [3] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Port-Hamiltonian flexible multibody dynamics. *Multibody System Dynamics*, 51(3):343–375, Mar 2021. <https://doi.org/10.1007/s11044-020-09758-6>.
- [4] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. A port-Hamiltonian formulation of linear thermoelasticity and its mixed finite element discretization. *Journal of Thermal Stresses*, 44(6):643–661, May 2021. <https://doi.org/10.1080/01495739.2021.1917322>.
- [5] 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>.
- [6] F. Califano, R. Rashad, A. Dijkshoorn, L. Groot Koerkamp, R. Sneep, A. Brugnoli, and S. Stramigioli. Decoding and realising flapping flight with port-Hamiltonian system theory. *Annual Reviews in Control*, 51:37–46, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.03.009>.
- [7] 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.
- [8] Karen E. Willcox, Omar Ghattas, and Patrick Heimbach. The imperative of physics-based modeling and inverse theory in computational science. *Nature Computational Science*, 1(3):166–168, Mar 2021. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00040-z>.
- [9] 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>.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.