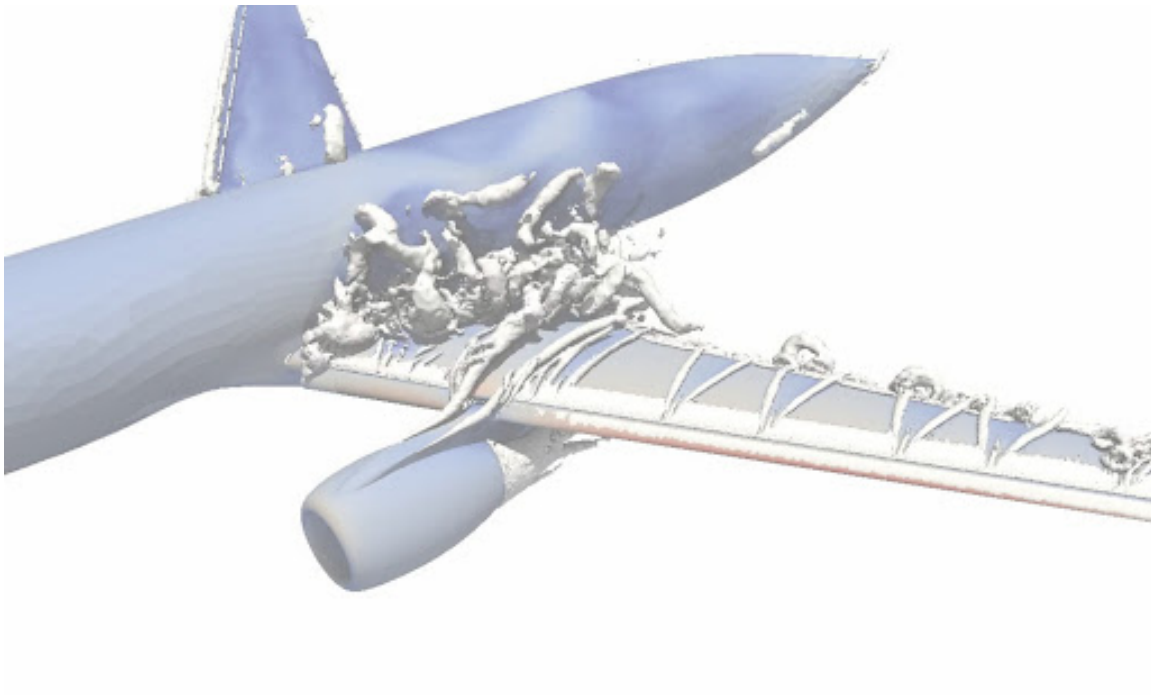


# Méthodes numériques pour la révolution digitale des jumeaux numériques: de la modélisation multi-physique haute fidélité aux modèles réduits pour l'ingénierie

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 impacte sur l'humaine 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-Supaéro. 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 dans l'automatique et les mathématiques appliquées (calcul numérique), au sein du projet INFIDHEM (Interconnected Infinite-Dimensional Systems for Heterogeneous Media). Le projet consistait à utiliser un formalisme mathématique capable de traiter d'une manière unifiée les problèmes multi-physique. 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 à travers des conférences internationales et 5 articles de revue [1, 2, 3, 4, 5].

Ma forte curiosité pour les thématiques de ma thèse ne m'a pas abandonné dans la suite. C'est pour cela que j'ai décidé de continuer en Post-Doc à l'Université de Twente, dans un projet qui vise à étendre la compréhension de mécanismes physiques sous-jacents le 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].

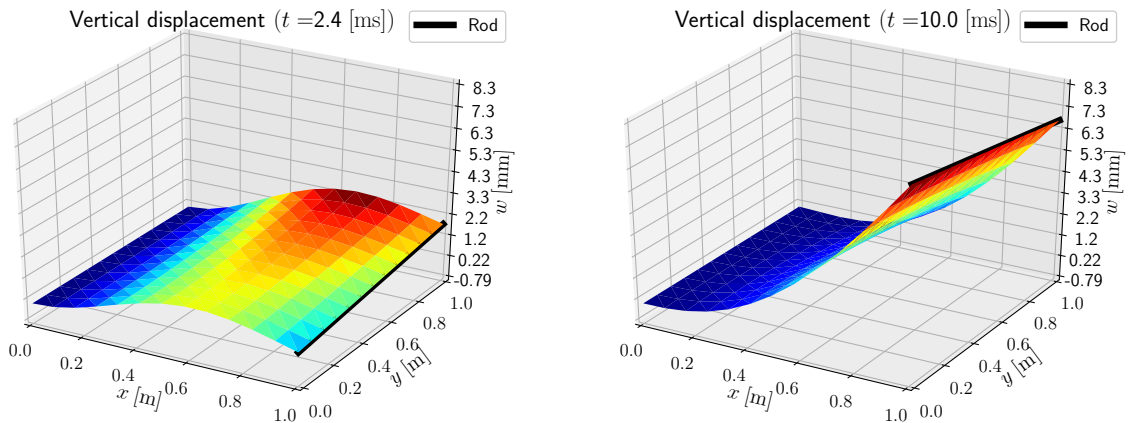


Figure 2: Simulation d'une plaque mince connectée à une poutre rigide.

---

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

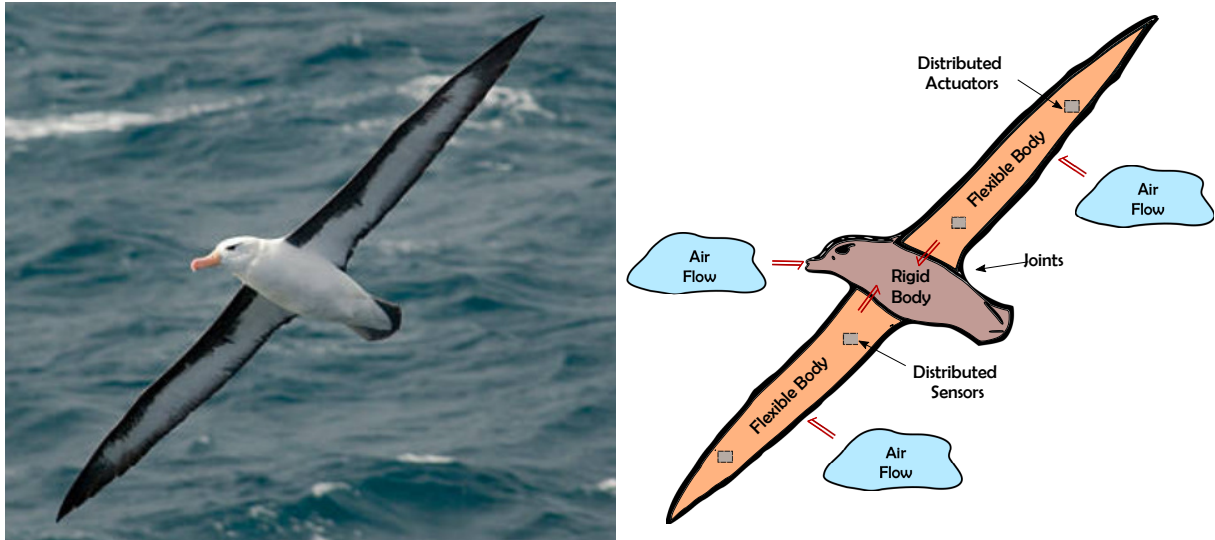


Figure 3: Modèle d'un oiseau robotique bio-inspiré vu comme l'interconnexion de plusieurs systèmes dynamiques.

## 1.2 Contexte

Ma thèse s'est inscrite dans le cadre d'un projet européen financé par l'agence nationale 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 des applications divers (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.

Aujourd'hui ce formalisme a désormais atteint le niveau de maturité pour attaquer problèmes de nature industriel. Il en est convaincu Volker Mehrmann, vice-président de la société mathématique européenne (EMS), qui a illustré les avantages de ce formalisme dans une [conférence plénière](#) à l'occasion de la SIAM Conference on Computational Science and Engineering. Ce niveau de maturité est aussi témoigné par le fait que le conseil de la recherche européen (ERC) a récemment attribué à [Stefano Stramigioli](#) une subvention de 2.8 millions d'euros pour le projet [Portwings](#). Ce projet, dans le quel je suis impliqué pour mon post-doc, cherche à améliorer la compréhension du vol battu pour pouvoir perfectionner le design et la construction des robot biomimétiques. L'ambition réside dans le fait d'utiliser la théorie port-Hamiltonien pour expliquer les interactions complexes entre l'aérodynamique et la flexibilité de l'aile (cf. Fig. 3).

## 1.3 Le projet

Dans ce projet de recherche, le but consiste à mettre en place des méthodes numérique pour accélérer la simulation des problèmes fluide-structure d'un facteur 10-100, par rapport au temps de calcul demandé par une simulation haute-fidélité. Ce projet va donc s'inscrire dans la thématique des jumeaux-numériques. Une éventuelle réussite permettra donc d'intégrer des modèles physique plus économique, qui pourront remplacer des simulations

très couteuse et ainsi faciliter le design et la prise des décisions. L'accélération des codes de calcul pour la simulation numérique est considéré un défis fondamental pour faire avancer le niveau technologique de l'industrie aérospatiale (cf. par exemple [NASA Computational challenge](#) ou [DDMS](#), le programme de digitalisation d'AIRBUS).

Un défis fondamental des modèles réduit est la capacité à représenter des physique extrêmement complexes d'une manière précise. Dans un premier temps, des simulations haute fidélité seront donc mise en place. Ces modèles numériques devront retenir les propriété physique du problème (conservation d'énergie global, tracement des échanges des énergies entre différents systèmes, conservation d'invariants du problème). Dans un second temps, des technique issus de l'intelligence artificielle seront utilisés pour obtenir des modèles réduit (une technique très prometteuse en ce sens est présentée dans [7]). Dans cette phase, l'impérative reste la fidélité a la physique des modèles ainsi obtenu [8]. Le dernière objectif consistera à utiliser des modèles réduit pour optimiser le design mécanique des structures et vérifier la validité des modèles réduits.

## 2 Organisation du projet

### 2.1 Partenariats académiques

Pour ce que il concerne la mise en place du projet, des différents partenariat académiques en France et à l'international seront mis en place. Bernhard Maschke (Lyon), Volker Mehrmann (Berlin), Arjan van der Schaft (Groningen) et Stefano Stramigioli (Twente) constitueront les interlocuteur académiques principales. Pour la partie réduction de modèle l'expertise de Charles Poussot-Vassal permettra .... (chercheur principal à l'ONERA)

### 2.2 Le plan

### 2.3 Budget

## 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, 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. Snee, A. Brugnoli, and S. Stramigioli. Decoding and realising flapping flight with port-Hamiltonian system theory. *Annual Reviews in Control*, 51:37–46, 2021.
- [7] 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.
- [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.