

Project MORPHEUS

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

Andrea Brugnoli

Docteur ISAE-Supaéro 2020

Ingénieur ISAE-Supaéro 2017

Candidat sélectionné par ISAE-SUPAERO pour candidater 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. Cela permettra également de faciliter le design optimisé des composantes du système et la prise de décision. À 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 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 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 Les problèmes multiphysiques

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 de concevoir des systèmes ex novo ou bien de détecter de fautes pendant le cycle de vie des composants, sans devoir utiliser de tests expérimentaux très coûteux. Ce domaine est en expansion rapide car aujourd'hui on dispose d'ordinateurs plus puissants et surtout parce que les algorithmes ont été optimisés pour être plus rapides, 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 des différentes physiques et d'autre part à la taille des systèmes obtenus, qui nécessitent plusieurs jours, voire plusieurs semaines, pour être résolus à l'aide

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

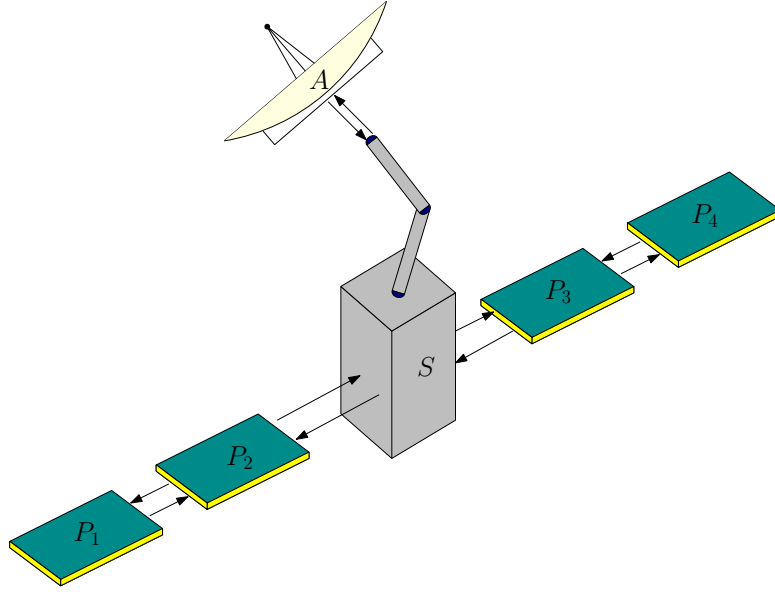


FIGURE 2 – Schéma modulaire représentant un satellite de télécommunication.

d'un supercalculateur [17]. Ces problématiques posent des barrières pour l'utilisation des modèles numériques en industrie.

2.2 Outils scientifiques du projet MORPHEUS

Un formalisme unificateur pour la modélisation des systèmes dynamiques

Un formalisme mathématique très prometteur pour traiter les problèmes multiphysiques est le formalisme port-Hamiltonien [18], 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 composantes simples, interagissant entre eux et avec le milieu environnant à travers des portes. Les portes d'interaction contiennent l'information relative au flux d'énergie entre les différents composants et entre différents domaines physiques : mécanique, électromagnétisme ou dynamique des fluides (cf. l'annexe B pour plus de détails sur cette théorie). 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 (cf. Fig. 2) : pour pouvoir optimiser leur design il est indispensable de disposer d'un outil de modélisation capable de décomposer la complexité de manière à retrouver les différents composants clés. 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, afin de faciliter son adoption dans l'industrie.

Une méthodologie structurée pour la discrétisation

Les algorithmes numériques utilisés en industrie sont adaptés à la nature physique du problème. Pour la mécanique des solides, la méthode des éléments finis est privilégiée par les ingénieurs. Pour la dynamique des fluides, les volumes finis sont majoritairement utilisés car ils garantissent le respect des lois de conservation. Quand il faut utiliser ces deux approches simultanément, leur couplage pose plusieurs défis. Les deux méthodes utilisent des degrés de liberté différents (i.e. différentes entités topologiques du maillage) et l'interconnexion introduit forcément des erreurs. Un outil de modélisation général nécessite une méthode de discrétisation également générale, capable de garantir la possibilité d'interconnecter des physiques distinctes. Récemment, un formalisme unificateur pour la discrétisation des équations à dérivées partielles a été développé [19]. Cette théorie mathématique, appelée la méthode des éléments finis en calcul extérieur ou FEEC², a permis des développements importants pour la discrétisation des équations aux dérivées partielles issues de la physique. Elle a été appliquée avec succès au cas de la mécanique des solides, la dynamique des fluides et l'électromagnétisme et elle représente un outil puissant pour les applications multiphysiques. La portée de cette théorie est illustrée par le fait que le Royaume-Uni a décidé d'utiliser cette nouvelle méthode pour renouveler les codes de calcul pour la météorologie³.

L'intelligence artificielle pour obtenir des modèles réduits

Toute méthode de discrétisation, même la plus sophistiquée, amène à des systèmes dont la taille dépasse facilement le million d'inconnues. Pour pouvoir optimiser le design des composantes mécaniques, il faut simuler ces modèles plusieurs fois. Cela amène à des coûts computationnels prohibitifs même pour les entreprises dotées des centres de calcul les plus avancés. Il est donc indispensable d'introduire des méthodes de réduction, qui sont censées construire un modèle plus simple, capable néanmoins de retenir les propriétés principales du système de départ. La grande majorité de ces méthodes suppose que l'on puisse obtenir un système réduit à travers une méthode essentiellement linéaire, i.e. la Décomposition Orthogonale en Valeurs Propres (POD) [20, 21]. Cette hypothèse n'est pas valable pour tout système exhibant un comportement non-linéaire et conduit à surestimer la dimension du système réduit. Grâce aux progrès récents dans le domaine de l'Intelligence Artificielle (IA), de nouvelles méthodes permettent d'obtenir des modèles réduits plus performants. Par exemple, des chercheurs

2. Le calcul extérieur représente une généralisation du calcul vectoriel basée sur la géométrie différentielle.

3. Le site <https://www.metoffice.gov.uk/research/news/2021/gungho-and-lfric-10th-anniversary> donne un aperçu du projet. Le lecteur intéressé peut aussi consulter les planches <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16815-introduction-lfric-project.pdf>

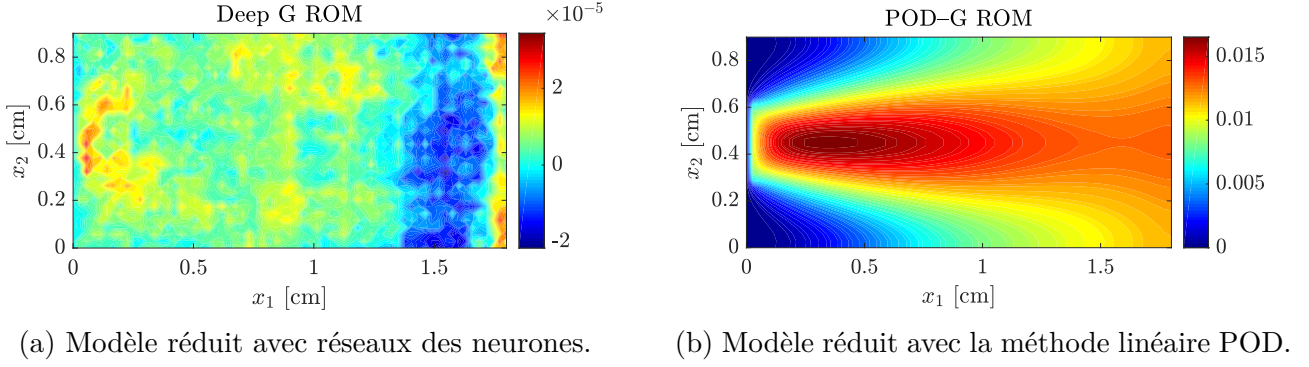


FIGURE 3 – Erreur des modèles réduits sur le champ de température pour un problème de convection-diffusion-réaction. En utilisant un réseau neuronal convolutifs pour générer une variété non linéaire (cf. Fig. 3a) l’erreur associée à la réduction est drastiquement réduite, de 10^{-2} à 10^{-5} , par rapport à la méthode POD (cf. Fig. 3b). Reproduit de [22] avec permission.

ont proposé une architecture basée sur les réseaux neuronaux convolutifs [22] pour obtenir des modèles beaucoup plus rapides (d’un facteur 100 environ) par rapport aux discrétisations haute fidélité. Leur technique représente une extension non linéaire des méthodologies couramment utilisées. Les résultats obtenus démontrent le gain de performances qu’il est possible d’obtenir en utilisant les réseaux neuronaux convolutifs (cf. Fig. 3).

2.3 Verrous scientifiques et lots de travaux pour les adresser

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, invariants du problème). Dans l’industrie des méthodes différentes sont habituellement utilisées pour simuler des physiques distinctes. Par conséquent, le couplage numérique ne représente pas correctement les flux d’énergie. Le premier lot de travail (**WP1**) cherche à résoudre les problématiques liées au couplage multiphysique.

- **WP1** : Développement d’algorithmes numériques haute-fidélité pour des problèmes d’interactions fluide-structures, basés sur le formalisme port-Hamiltonien et les élément finis en calcul extérieur.

L’utilisation d’un paradigme de modélisation unifié permettra d’effectuer les couplages de manière à respecter la physique.

Le second défi du projet consiste à intégrer des techniques issues de l’Intelligence Artificielle, qui seront utilisées pour obtenir des modèles réduits. Il s’agit d’un thème de recherche récent mais en expansion rapide. Par exemple dans [23] 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. Cela ne garantit pas le respect de la structure physique et pose des soucis au niveau de l’interprétation des résultats. Une technique très prometteuse en ce sens est présentée dans [22], 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. Le deuxième lot de travail (**WP2**) a comme but la génération des modèles réduits capables d’incorporer la physique du problème d’une manière interprétable.

- **WP2** : Méthodes de réduction garantissant le respect de la structure physique implémentées en utilisant les réseaux des neurones.

Ce lot de travail consentira d’obtenir des modèles de petite dimension, prêts à être utilisés pour la partie optimisation.

L’optimisation et les études paramétriques sont typiquement effectuées sur les modèles de substitution en industrie, car optimiser directement les modèles fins entraîne des coûts computationnels absolument prohibitifs. Le dernier défi du projet est de démontrer que les modèles réduits obtenus dans le **WP2** pourront servir de modèles de substitution plus fiables que ceux qui sont normalement utilisés. Dans le troisième lot de travail (**WP3**) les modèles réduits seront donc employés pour optimiser le design mécanique des structures et pour le contrôle optimal des structures flexibles. Cette étape permettra d’évaluer la validité et l’efficacité des modèles réduits par rapport aux simulations fines.

- **WP3** : Utilisation des modèles réduits pour l’optimisation et le contrôle optimal et comparaison avec les modèles haute-fidélité.

La résolution de ces trois macro-tâches permettra de mieux comprendre le compromis entre le temps de calcul et la précision pour des applications d’intérêt industriel. Potentiellement, les techniques développées dans ce projet pourront fournir des solutions plus performantes que celles normalement utilisées en industrie.

2.4 Description de lots de travaux

WP1 : méthodes numériques pour systèmes couplés fluide-structure
Responsables : Andrea Brugnoli et Doctorant 1, co-encadré par Denis Matignon (DISC⁴, ISAE)

Dans ce premier lot des travaux, nous cherchons à obtenir des modèles couplés d'interaction fluide-structure dans le cas où la partie structurelle est considérée déformable. Le focus principal est la génération des chemins numériques pour la préservation de la structure Hamiltonienne à l'aide de la méthode à éléments finis en calcul extérieur. Cette tâche représente un véritable défi computationnel, spécialement si on cherche à résoudre le cas plus général possible d'interaction fluide-structure où la partie mécanique est très flexible et effectue des mouvements rigides. On pourra alors diviser la tâche en considérant des problèmes de complexité croissante.

1. Si la structure est encastree et les déformations sont petites, par exemple une aile d'avion en conditions nominales, il est possible d'utiliser un maillage fixe au cours du temps (élasticité linéaire).
2. Si la structure bouge d'une manière rigide mais les déformations restent petites, des approches existent pour limiter la complexité des équations.
3. Dans le cas le plus général, l'élasticité non linéaire doit être considérée.

Le doctorant devra alors concevoir des méthodes numériques capables de s'adapter à cette complexité croissante. Le premier défi portera sur la résolution du premier cas, qui ne demandera pas d'introduire des techniques spéciales pour modifier le maillage. Au contraire les cas successifs devront utiliser des méthodes pour considérer le déplacement du corps élastique (comme par exemple la méthode des frontières immergées [24]). Ces modèles numériques devront retenir les propriétés physiques du problème (conservation d'énergie globale, traçage des échanges d'énergie entre les différents sous-systèmes, préservation d'invariants du problème).

Pour cette première macro-tâche, il sera possible de prolonger le travail effectué dans le cadre de ma thèse, qui a donné lieu à un code de calcul pour application multiphysique (le code SCRIMP décrit dans <https://zenodo.org/record/4945329#.Yd8UJoTMJH4>). Ce code sera ultérieurement développé pour traiter des problèmes d'interaction fluide-structure. Le co-encadrant de thèse sera Denis Matignon, du fait de son expertise concernant les mathématiques numériques et les systèmes port-Hamiltoniens.

Pour ce qui concerne la préservation de la physique au sein des algorithmes, des collaborations avec Marc Gerritsma (TU Delft, Pays Bas) et Herbert Egger

4. Département d'ingénierie des systèmes complexes

(Johannes Kepler University Linz, Autriche) 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.

WP2 : réduction de modèles garantissant le respect de la structure physique

Responsables : Andrea Brugnoli et Doctorant 2, co-encadré par Charles Poussot-Vassal (ONERA ⁵)

Dans ce deuxième lot des travaux, des algorithmes numériques pour la réduction de modèle seront implémentés. Dans cette étape, l'impératif est la préservation de la structure physique du problème. Par structure physique du problème, on entend la présence des lois de conservation (associés à un opérateur antisymétrique) et des effets dissipatifs, et les variables qui définissent l'interconnexion entre le fluide et le solide. 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. Par exemple, des réseaux de neurones peuvent être utilisés pour représenter l'énergie (i.e une fonction entre la dimension de l'état et un scalaire positif), ou l'opérateur associé à la conservation d'énergie, ou bien à sa dissipation. L'apprentissage automatique nécessite d'une base de données. Les données générées dans le **WP1**, représentées par les résultats des simulations des modèles haute fidélité (appelés *snapshots* en anglais), seront donc utilisés pour entraîner les réseaux de neurones à obtenir des modèles réduits en minimisant certaines métriques.

Pour ce qui concerne la deuxième macro-tâche, il sera possible de mettre en place des collaborations avec Volker Mehrmann (TU Berlin) et George Haller (ETH Zurich).

WP3 : optimisation à l'aide des modèles réduits

Responsables : Andrea Brugnoli et Doctorant 3, co-encadré par Joseph Morlier (DMSM ⁶, ISAE) et Post-doc 1

Les techniques développées dans les deux premiers lots de travaux permettront d'obtenir des modèles pour décrire l'aéroélasticité, la dynamique des drones robotiques dans un fluide et d'autres cas d'application. Le dernier objectif consistera à utiliser ces modèles réduits pour l'optimisation. Cette étape permettra d'évaluer la validité et l'efficacité des modèles réduits par rapport aux simulations

5. Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

6. Département Mécanique des Structures et Matériaux

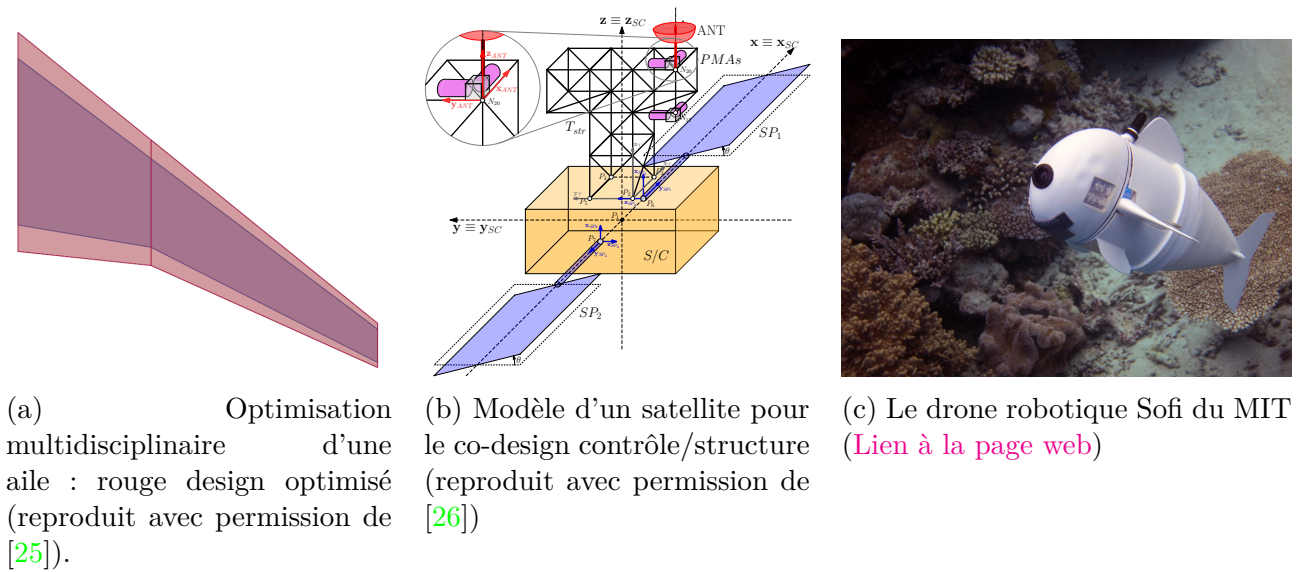


FIGURE 4 – Cas d'application pour les problèmes d'optimisation dans la WP3.

finies. Selon le cas d'application, différents scénarios peuvent être considérés (cf. Fig. 4) :

- L'optimisation structurelle des composants mécaniques en aéronautique, pour augmenter les performances aérodynamiques (minimisation de la traînée et donc de la consommation du carburant, cf. Fig. 4a) ;
- Co-design de la partie structurelle et du contrôleur embarqué. Cette méthodologie consiste à optimiser la performance du contrôleur (qui cherche par exemple à limiter les vibrations), en même temps que les caractéristiques structurelles du véhicule (par exemple la masse ou la rigidité). Ce type d'optimisation est souvent utilisé pour les satellites (cf. Fig. 4b).
- Contrôle optimal pour suivi de trajectoire. Ce type de problématiques apparaît fréquemment en robotique. Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à la *soft robotics*⁷ ; domaine dans lequel la flexibilité des composants ne peut pas être négligée (cf. Fig. 4c).

3 Mise en œuvre du projet

3.1 Objectifs et échéances

Le travail sera effectué au sein du département DISC de l'ISAE. Le développement du projet se déroulera selon les objectifs et livrables suivants :

- **T0 + 6 mois** : Création des partenariats académiques et industriels. Pour ce qui concerne l'architecture logicielle pour le Calcul Haute Performance,

7. https://en.wikipedia.org/wiki/Soft_robotics

on cherchera à organiser la première thèse en collaboration avec le CEA ⁸. Cette institution possède l'un des centres de calcul les plus sophistiqués de France. Il est donc logique d'envisager la création d'une thèse en cotutelle avec cette institution. On cherchera également à effectuer une collaboration avec Airbus pour ce qui concerne la partie optimisation.

- **T0 + 36 mois** : Premier livrable (**L1**) : code pour la simulation couplée pour l'interaction fluide-structure (**WP1**). Pour cette tâche il sera possible de reprendre le code SCRIMP développé dans le cadre de ma thèse (cf. l'Annexe **C** pour plus d'info). Le logiciel sera accompagné des tutoriaux démonstratifs.
- **T0 + 48 mois** : Deuxième livrable (**L2**) : création d'un code de calcul capable d'extraire des modèles réduits à partir des données des simulations haute fidélité (**WP2**). Les performances du code seront validées sur la base du trade-off gain de temps et fidélité au modèle non réduit.
- **T0 + 54 mois** : Troisième livrable (**L3**) : code pour l'optimisation des modèles réduits (**WP3**). La fiabilité de l'approche sera démontrée grâce à la comparaison des résultats obtenus sur les modèles haute fidélité et réduits.
- **T0 + 60 mois** : Livrable final regroupant les différents codes. Publications et valorisation des résultats.

Pour accomplir les objectifs, des recrutements seront effectués :

- **T0 + 6 mois** : Recrutement du premier doctorant, chargé du livrable **L1**. Le doctorant devra avoir des compétences en mathématiques appliquées et modèles pour l'ingénierie.
- **T0 + 18 mois** : Recrutement du deuxième doctorant, responsable du livrable **L2**, en collaboration avec Charles Poussot-Vassal de l'ONERA. Pour cette thèse, on cherchera des compétences en calcul scientifique et intelligence artificielle.
- **T0 + 24 mois** : Recrutement du troisième doctorant, responsable du livrable **L3**. Pour cette thèse, on cherchera un profil ingénieur avec des compétences solides en mécanique. Ce thésard travaillera avec Joseph Morlier (département DMSM de l'ISAE).
- **T0 + 30 mois** : Recrutement d'un chercheur post-doctoral expert en optimisation, co-responsable du livrable **L3**. La personne recrutée utilisera ses compétences pour indiquer les meilleures solutions au niveau algorithmique pour implémenter un code d'optimisation performant.

8. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

3.2 Choix de l'institution d'accueil

Pour ce projet, on choisit l'ISAE-SUPAERO et sa grande expertise dans le domaine aéronautique. En effet les applications aéronautiques sont centrales dans ce projet. De plus, l'intégration des compétences diverses au sein de l'institution permettra le dialogue entre experts dans les différentes disciplines requises : calcul numérique et intelligence artificielle (département DISC), aérodynamique (DAEP⁹), réduction de modèles (DCAS¹⁰), optimisation structurelle (DMSM).

3.3 Budget

Dépense	Coût en €
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-SUPAERO	100000
Matériel et calcul HPC	70000
Frais annexes (conférences, workshops)	60000
Total	1000000

9. Département Aérodynamique et propulsion

10. Département Conception et Conduite des véhicules Aéronautiques et Spatiaux

4 Curriculum Vitae

Andrea Brugnoli

☎ +33 7 50 39 47 27 • ✉ andrea.brugnoli92@gmail.com

🌐 andrea.brugnoli • 📧 andrea.brugnoli

Docteur-Ingénieur en Automatique



Expériences académiques

University of Twente

Chercheur postdoctoral

Méthodes numériques pour problèmes couplés fluide-structure.

Subvention avancée ERC. Chercheur principal: Stefano Stramigioli.

Enschede, Pays Bas

Nov. 2020 - Nov. 2022

Formation

ISAE-SUPAERO

Thèse en Automatique

Une formulation port-Hamiltonienne des structures flexibles. Modélisation et discrétisation symplectique par éléments finis.

Toulouse, France

2017-2020

Université Paris Saclay/ Supélec

Master recherche en automatique et traitement d'images

Modules: identification paramétrique, contrôle avancée des structures flexibles, traitement d'images.

Paris/Toulouse, France

2016-2017

ISAE-SUPAERO

Double Diplôme en génie aéronautique et aérospatial

Spécialisation mathématiques appliquées (calcul scientifique) et automatique avancée.

Toulouse, France

2015-2017

Politecnico di Milano

Master en génie spatial, 110/110 avec mention

Modules : Mécanique orbitale, dynamique et contrôle des structures, propulsion thermochimique.

Milan, Italie

2014-2017

Politecnico di Milano

Licence en génie mécanique, 110/110 avec mention

Modules : méthode des éléments finis, vibrations mécaniques, calcul numérique.

Milan, Italie

2011-2014

Liceo Classico Scipione Maffei

Baccalauréat Littéraire, 100/100

Verona, Italie

2006-2011

Expériences

Institut CIFAR

Ecole d'été en intelligence artificielle et apprentissage par renforcement

Toronto, Canada

Juillet 2021

ITA-Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Chercheur invité

Collaboration avec Flavio Cardoso-Riberio.

São José dos Campos, Brésil

Janvier 2019, 4 mois

CNES-Centre national d'études spatiales

Stage fin études

Analyse des débris spatiaux soumis à la pression de radiation solaire.

Toulouse

Janvier 2017, 6 mois

Politecnico di Milano en partenariat avec Danieli S.p.A

Dynamique d'un manipulateur pour machines de forgeage

Projet sélectionné pour une présentation finale chez Danieli.

Milan/Buttrio, Italie

2014, 4 mois

Activités pédagogiques

J'ai effectué mes activités d'enseignement à l'Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace, soit pour la formation ingénieur, soit pour les masters internationaux.

Année	Niveau	Nature	Discipline	Durée
2019-2020	L1	TD	Résolution numérique des EDP	6h
	L1	TD	Optimisation	6h
2018-2019	L2	TP-TD	Automatique	20h
	L2	TD	Contrôle des structures flexibles	8h
	L2	TP-TD	Automatic control	15h
2017-2018	L2	TP-TD	Automatique	20h
	L2	TP-TD	Automatic control	15h

Activités scientifiques

Année	Lieu	Description
2022	University of Twente (Enschede)	Supervision de la thèse "On the modeling and mechanical design of flexures (compliant mechanisms)" entre le département de Robotique et le département d'ingénierie de précision à l'Université de Twente (avec Marijn Nijenhuis).
2021	Technical University of Berlin (Berlin)	Organisation de la session invitée: "Theoretical and numerical advancements in Hamiltonian formulations of continuum mechanics" pour la conférence "Lagrangian and Hamiltonian method in non linear control 2021".
2020	—	Critiques (Peer reviews) du <i>Journal of Elasticity</i> .
2019-2020	ISAE-SUPAERO (Toulouse)	Organisation et encadrement du Projet Ingénierie et Entreprise intitulé "Simulation et contrôle des structures thermoélastiques pour applications spatiales".

Prix

Fondation ISAE-SUPAERO

Prix de thèse

2021

Politecnico di Milano

Dispense des frais de scolarité pour mérite académique.

2011-2015

Langues

Anglais: courant

Français: courant

Espagnol: intermédiaire

Portugais: intermédiaire

Italien: langue maternelle

Compétences informatiques

Programmes: Abaqus, Inventor, Solid Works, Labview

Langages: Python (en particulier librairies des éléments finis FIREDRAKE et FENICS), Matlab/Simulink, Java, C, \LaTeX

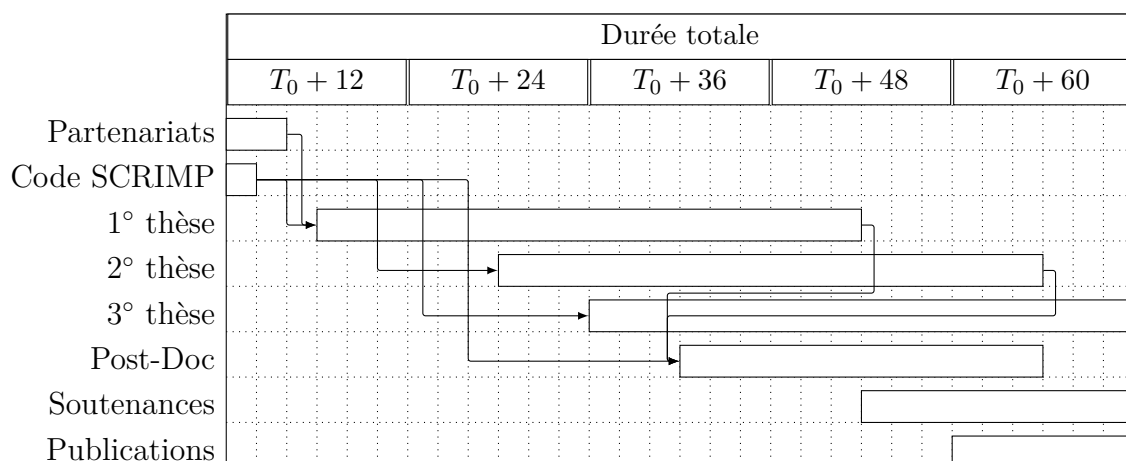


FIGURE 5 – Gaant Chart du projet

5 Plan de carrière

La technologie, les sciences et leur impact sur l’humain m’ont toujours intéressé. C’est pour cela que j’ai effectué mes études en ingénierie dans des institutions prestigieuses (double diplôme Politecnico di Milano et ISAE-SUPAERO et master de recherche en collaboration avec Supélec/Université Paris Saclay). Mes études ont été centrées sur le calcul numérique, les systèmes dynamiques et l’automatique. Mon intérêt pour la simulation des problèmes physiques m’a amené au centre national d’études spatiales (CNES) pour mon stage de fin d’études.

L’ISAE-SUPAERO a financé le projet de thèse pour le quel j’avais été sélectionné. Dans ce travail, j’ai exploré le potentiel d’un formalisme mathématique pour la modélisation des systèmes mécaniques complexes. J’ai pu développer des compétences à l’intersection des mathématiques appliquées, de la physique et de l’ingénierie des systèmes. La révolution digitale qui est en cours actuellement donne aux ingénieurs des instruments puissants pour pousser les avancées techniques. Je considère l’expertise acquise pendant la thèse comme fondamentale, car maintenant je possède les compétences nécessaires pour être acteur de cette révolution. Cette même expertise m’a permis d’être sélectionné comme chercheur post-doctoral dans un projet subventionné par l’European Research Council (ERC) à l’université de Twente. Ce projet est extrêmement passionnant car il réunit différents chercheurs travaillant sur les aspects théoriques et/ou pratiques de la robotique pour perfectionner le design d’un drone bio-inspiré.

À moyen terme je souhaite postuler comme ingénieur de recherche ou maître

de conférence dans une Université ou un Laboratoire en France. Je veux continuer à travailler dans la modélisation mathématique pour l'ingénierie, entre les mathématiques appliquées et l'informatique. Mon idéal serait de travailler dans un organisme qui cherche à résoudre des problèmes d'intérêt sociétal, en utilisant les outils de l'ingénierie computationnelle. Si le projet MORPHEUS est sélectionné pour le prix Lopez-Loreta, je me consacrerai à plein temps à sa réalisation. Ce projet touche à différentes thématiques qui sont au centre de mes intérêts. La possibilité de pouvoir le financer pendant 5 ans représente une opportunité unique de croissance professionnelle. J'envisage également de soutenir une Habilitation à Diriger des Recherches dans un horizon de moins de 10 ans.

6 Production scientifique

Articles dans des revues internationales à comité de lecture

- [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] A. Brugnoli, R. Rashad, and S. Stramigioli. Dual field structure-preserving discretization of port-Hamiltonian systems using finite element exterior calculus. *arXiv preprint arXiv :2202.04390*, 2022. submitted.

Communications dans des congrès internationaux à comité de lecture et actes publiés

- [8] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Partitioned finite element method for the Mindlin plate as a port-Hamiltonian system. In *3rd IFAC Workshop on Control of Systems Governed by Partial Differential Equations CPDE 2019*, pages 88 – 95, Oaxaca, MX, 2019.
- [9] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Interconnection of the Kirchhoff plate within the port-Hamiltonian framework. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6857–6862, 2019.
- [10] F. L. Cardoso-Ribeiro, A. Brugnoli, D. Matignon, and L. Lefèvre. Port-Hamiltonian modeling, discretization and feedback control of a circular water tank. In *2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC)*, pages 6881–6886, 2019.
- [11] A. Brugnoli, F. L. Cardoso-Ribeiro, G. Haine, and P. Kotyczka. Partitioned finite element method for structured discretization with mixed boundary conditions. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2) :7557–7562, 2020. 21st IFAC World Congress.
- [12] A. Brugnoli, D. Alazard, V. Pommier-Budinger, and D. Matignon. Structure-preserving discretization of port-Hamiltonian plate models. *IFAC-PapersOnLine*, 54(9) :359–364, 2021. 24th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems MTNS 2020.
- [13] A. Brugnoli, R. Rashad, F. Califano, S. Stramigioli, and D. Matignon. Mixed finite elements for port-Hamiltonian models of von Kármán beams. *IFAC-PapersOnLine*, 54(19) :186–191, 2021. 7th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control LHMNC 2021.
- [14] K. Cherifi and A. Brugnoli. Application of data-driven realizations to port-Hamiltonian flexible structures. *IFAC-PapersOnLine*, 54(19) :180–185,

2021. 7th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control LHMNC 2021.

- [15] R. Rashad, F. Califano, A. Brugnoli, F. P. Schuller, and S. Stramigioli. Exterior and vector calculus views of incompressible Navier-Stokes port-Hamiltonian models. *IFAC-PapersOnLine*, 54(19) :173–179, 2021. 7th IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control LHMNC 2021.

Communications dans des congrès internationaux sans comité de lecture

- [16] A. Brugnoli, D. Matignon, G. Haine, and A. Serhani. Numerics for physics-based PDEs with boundary control : the partitioned finite element method for port-Hamiltonian systems. In *SIAM Conference on Computational Science and Engineering (CSE21)*, Virtual conference, 2021.

7 Réussites professionnelles

Pendant mon parcours professionnel, j’ai pu vivre des moments extrêmement gratifiants.

En premier, l’obtention de mon doctorat, défendu face à une jury d’experts internationaux, venants de France, Italie et Belgique. La qualité du travail a été reconnue à l’unanimité par les membres du jury et également par la fondation ISAE-SUPAERO, qui m’a attribué un des 5 prix de thèse 2021 (la vidéo de présentation de mon travail peut être visualisée à ce lien <https://www.youtube.com/watch?v=2nNE4LgIkzA>).

Les travaux effectués dans le cadre de ma thèse ont donné lieu à 5 articles dans des revues scientifiques de haut niveau [1, 2, 3, 4, 5] (*Applied Mathematical Modelling, Multibody System Dynamics, Journal of Thermal Stresses*). La portée du travail est démontrée par le fait que ces journaux touchent à des aspects différents de la modélisation mathématique en ingénierie. Dans le cadre de ma thèse, j’ai aussi effectué une mobilité à l’ITA, Istituto Tecnológico de Aeronáutica (São José dos Campos, Brésil). Ce séjour, qui a donné lieu à trois contributions dans des conférences internationales prestigieuses [9, 10, 11], m’a énormément enrichi au niveau professionnel et humain ; en particulier j’ai pu découvrir les activités de recherche entre l’ITA et la compagnie aérienne

Embraer, centrées sur la caractérisation des non-linéarités géométriques pour des avions expérimentaux très souples.

La dernière expérience que je souhaite mentionner a été mon déménagement aux Pays-Bas pour travailler au sein du projet Portwings. Cet ambitieux projet demande des compétences extrêmement diversifiées et chaque membre du groupe est en effet responsable d'une thématique spécifique. Ma mission est de mettre en place les algorithmes numériques pour la simulation du vol battu, qui représente un exemple extrêmement compliqué d'interaction fluide-structure. J'ai pu m'intégrer rapidement, en arrivant à instaurer une discussion scientifique très constructive avec des chercheurs ayant une formation différente de la mienne. Mon travail a déjà donné lieu à un article de revue soumis à un journal très réputé dans le domaine de la physique computationnelle [7].

Lettre d'invitation de l'institution d'accueil

Toulouse, le 20 janvier 2022

**Département d'Ingénierie
pour les Systèmes Complexes**

R.A. Vingerhoeds
Professeur en Ingénierie Systèmes
Chef du Département

Tel. : +33-5-61.33.83.19
rob.vingerhoeds@isae.fr

Lettre de soutien pour
M. Andrea BRUGNOLI,
Candidat au prix de la Fondation
Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta

Mesdames et Messieurs les membres du Jury du prix Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta,

C'est avec un immense plaisir que j'écris cette lettre de recommandation pour Monsieur Andrea BRUGNOLI, candidat au prix de la Fondation Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta.

Après des études extrêmement brillantes qui l'ont mené du Politecnico di Milano à l'ISAE-SUPAERO, Monsieur Andrea BRUGNOLI a effectué un doctorat en Automatique, salué par le Prix de Thèse de la Fondation ISAE-Supaéro ; il a décidé de poursuivre sa compréhension de la simulation numérique respectueuse de la physique par un séjour post-doctoral au sein du projet ERC PortWings à l'Université de Twente, à Enschede aux Pays-Bas.

Le projet de recherche de Monsieur Andrea BRUGNOLI, pour lequel il candidate au Prix de la Fondation Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta, est un projet scientifique de très grande qualité et extrêmement ambitieux : il s'agit d'exploiter au maximum la structure sous-jacente des diverses équations de la physique pour en proposer des simulations les plus réalistes possibles, au travers de modèles réduits dans un cadre unificateur pertinent pour lequel les échanges d'énergie entre sous-systèmes sont la clé de la modélisation structurée ; la réduction de modèle s'effectuera par des techniques d'apprentissage profond à base de réseaux de neurones, et l'application principale visée sera celle des Interactions Fluide-Structure, centrale en aéronautique.

Du point de vue du Département d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes (DISC) de l'ISAE-SUPAERO, ce projet de recherche est une formidable opportunité de valider des développements méthodologiques récents et d'élargir les perspectives tout en participant à un projet scientifique d'envergure. Les méthodologies concernent tout d'abord la modélisation et la simulation numérique structurées, au coeur des recherches de plusieurs chercheurs et enseignants-chercheurs du DISC (Pr Denis Matignon, Dr. Ghislain Haine) ; elles concernent ensuite l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones profonds et l'apprentissage automatique (Dr. Dennis Wilson). Ces trois enseignants-chercheurs ont d'ores et déjà échangé avec Monsieur Andrea BRUGNOLI sur le projet, et ils ont identifié les verrous méthodologiques à lever.

Par ailleurs, l'ISAE-SUPAERO s'étant récemment doté d'un supercalculateur PANDO, c'est tout naturellement que les travaux d'Andrea BRUGNOLI bénéficieront de cette infrastructure matérielle, avec l'aide de Julien Pedron, expert calcul et données scientifiques HPC.

Andrea BRUGNOLI est un chercheur très prometteur : il est l'auteur de pas moins de 6 articles de revues internationales (dont 5 dans des revues « quartile 1 », c'est-à-dire le top mondial), et de 8 communications à des congrès internationaux avec comité de lecture. Il a d'ores et déjà contribué à la proposition et à l'animation de projets collectifs, que ce soit par l'encadrement d'un Projet Ingénierie Entreprise ou bien par l'organisation d'une Session Invitée en conférence internationale. Son expérience internationale est manifeste et exceptionnelle : chercheur invité pour 4 mois à l'ITA au Brésil, participation à une école en Intelligence Artificielle au Canada, sans compter des stages en France et en Italie. Notons qu'Andrea BRUGNOLI parle également 5 langues, ce qui démontre son ouverture, sa culture et sa capacité à intégrer de nouveaux horizons parfois en un temps record. Il est clair que, fort de ces expériences, Andrea BRUGNOLI dispose de la maturité nécessaire pour recruter des doctorants et post-doctorants, et mener une véritable équipe de recherche à même de produire des contributions capitales.

C'est donc avec conviction que j'apporte mon soutien total, ainsi que celui de l'ensemble du département, à la candidature d'Andrea BRUGNOLI au Prix de la Fondation Lopez-Loreta. Je suis convaincu qu'il réussira avec brio ce projet extrêmement ambitieux qui, me semble-t-il, se révèle à la hauteur de l'excellence visé par le prix de la Fondation Jean-Jacques et Félicia Lopez-Loreta.

Veuillez agréer, Mesdames, Messieurs, de mes salutations les plus sincères,


Bob VINGERHOEDS
Chef du Département DISC
Ingénierie des Systèmes
Complexes

Professeur en Ingénierie Systèmes
Chef du Département d'Ingénierie des Systèmes Complexes
ISAE-SUPAERO

9 Description de l'institution d'accueil

L'ISAE-SUPAERO est un établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel (EPSCP) sous tutelle de la DGA du ministère des armées. Implanté à Toulouse, il est une référence mondiale de la formation et de la recherche dans les domaines aéronautiques, spatial et systèmes connexes. L'Institut délivre des formations de haut niveau d'ingénieurs, de masters, de masters spécialisés et de doctorats aux débouchés diversifiés. L'ISAE-SUPAERO mène également des activités de recherche et développement et dispose de 6 départements :

- Aérodynamique, énergétique et propulsion (DAEP) ;
- Conception et conduite des véhicules aérospatiaux (DCAS) ;
- Mécanique des Structures et Matériaux (DMSM) ;
- Ingénierie des Systèmes Complexes (DISC) ;
- Électronique, Optronique et traitement du Signal (DEOS) ;
- Langues Arts Culture et Société (LACS).

A Lettres de manifestations d'intérêt

À support du fait que le projet MORHPEUS présente un fort intérêt industriel et académique, j'ai engagé des discussions avec des acteurs industriels dans le domaine aérospatial, ainsi que avec des centres de recherche très réputés pour leur compétences en simulation numérique et intelligence artificielle, et des professeurs universitaires.

Les personnes suivantes ont donné leur support au projet :

- Isabelle Bloy, Head of Single aisle à Airbus et responsable du programme A321 XLR dans le département New developments in Chief Engineering.
- Michele Colombo, Technical Specialist Digital Enablers à Airbus, est spécialiste technique pour la partie Intelligence Artificielle et aéroélasticité.
- Catherine Lambert, présidente du Cerfacs¹¹, est une experte en traitement du signal et compression de données.
- Corentin Lapeyre, coordinateur principal de l'équipe Helios au Cerfacs, est un expert dans le domaine de l'IA appliquée à la physique computationnelle.
- Pierre-Henri Maire, Directeur de la Recherche au CEA à Bordeaux, est un expert dans le domaine de la physique computationnelle.
- Volker Mehrmann, Président de l'association européenne des mathématiques et professeur à TU Berlin, est un mathématicien spécialisé dans le développement d'algorithmes numériques pour les applications industrielles (réduction de modèle et contrôle optimal).

11. Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique

- Stefano Stramigioli, Vice Président of euRobotics et professeur à l'Université de Twente, est un roboticien spécialisé dans les systèmes port-Hamiltoniens et leur utilisation pour le contrôle de manipulateurs robotiques.



A l'attention du jury du prix Loreta-Lopez

Le 2 Février 2022

Mesdames et Messieurs les membres du jury,

En ma qualité de chercheur au CERFACS, je coordonne le groupe de travail inter-académique Helios (High pErformance LearnIng for cOmputational phySics), qui inclut le CERFACS, l'ISAE-Supaéro et l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse. Helios regroupe des chercheurs intéressés par l'étude des développements récents dans le domaine de l'apprentissage automatique pour leur potentiel à révolutionner la physique numérique. L'essor de ces techniques dans des domaines comme le traitement d'image ou du langage s'est accompagné d'importantes attentes, et déjà de certaines désillusions. L'objectif de nos travaux est de caractériser les forces mais aussi les faiblesses de ces techniques, afin de les associer à l'ensemble des outils numériques qui ont déjà fait leurs preuves pour la modélisation physique, en cherchant des complémentarités. Les applications de ces stratégies hybrides incluent notamment des problématiques d'énergétique et de propulsion, d'environnement (climat, feux de forêt, événements météo intenses), et de sécurité (dispersion de polluant, explosions accidentelles).

Le projet MORPHEUS présenté par Andrea Brugnoli s'inscrit parfaitement dans les thématiques traités par notre laboratoire de recherche. Il s'agit d'un projet numérique fortement inter-disciplinaire, car il intègre d'une part des méthodologies structurées basées sur la physique pour la modélisation des problèmes multiphysiques, et d'autre part des outils de l'intelligence artificielle pour la génération de modèles réduits. La proposition MORPHEUS appuie sur un point critique de l'hybridation des méthodes traditionnelles avec les techniques d'apprentissage: la prise en compte de contraintes physiques sous forme de fonction de coût à minimiser, ou autre forme de contrainte "souples" pour le problème, ne permet pas de garantir que des grandeurs physiques sont conservées, comme la masse ou l'énergie. Ces grandeurs sont pourtant fondamentales en modélisation physique, et leur conservation est un point clé de toute méthode, de résolution. MORPHEUS propose au contraire de se focaliser sur des approches où la contrainte physique est imposée en amont, et où les approximateurs entraînés ne peuvent pas déroger à leurs règles. Cette stratégie s'inscrit dans le contexte de multiples travaux émergents pour introduire des contraintes physiques "en dur" dans les approches hybrides dans la littérature récente, une voie très prometteuse pour exploiter les techniques d'apprentissage sans pâtir des inconvénients de leurs approximations inhérentes.

D'autre part, Andrea Brugnoli a déjà démontré en quelques années une importante capacité à produire des travaux et des publications de qualité. Ce début de carrière académique très prometteur s'est accompagné d'un large ensemble de collaborations, démontrant une bonne capacité à travailler en équipe. Pour toutes ces raisons, je souhaite par la présente lettre exprimer mon intérêt pour le projet MORPHEUS, ainsi que mon soutien à M. Brugnoli pour sa candidature au prix Lopez-Loreta.

Fait pour servir et valoir ce que de droit.

En vous souhaitant, Medames, Messieurs, une bonne réception.

Cordialement,

A handwritten signature in black ink, reading 'C. Lapeyre' with a stylized flourish at the end.

Corentin Lapeyre

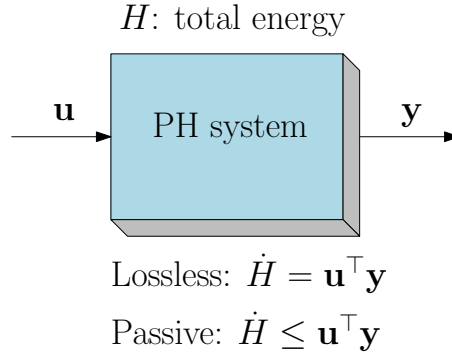


FIGURE 6 – Un système port-Hamiltonien est un système Hamiltonien sujet à l’interaction avec le monde extérieur.

B Les systèmes port-Hamiltoniens

Dans cette annexe la théorie des systèmes port-Hamiltoniens est rapidement présentée. La discussion reprends l’introduction du livre [27].

La théorie des systèmes port-Hamiltoniens rassemble différentes traditions dans la modélisation et l’analyse des systèmes physiques. Premièrement, du point de vue de la modélisation, elle trouve son origine dans la modélisation basée sur les ports, lancée par Henry Paynter à la fin des années 50. Ce formalisme vise à fournir un cadre unifié pour la modélisation de systèmes appartenant à différents domaines physiques (mécanique, électrique, hydraulique, thermique, etc.). Ceci est réalisé en reconnaissant l’énergie comme *lingua franca* entre les domaines physiques, et en identifiant des composants idéaux capturant les principales caractéristiques physiques (stockage d’énergie, dissipation d’énergie, routage d’énergie, etc.).

Une deuxième origine de la théorie des systèmes port-Hamiltoniens est la mécanique géométrique. Dans ce branche de la physique mathématique la formulation Hamiltonienne de la mécanique classique est formalisée de manière géométrique. Le paradigme de base de la mécanique géométrique consiste à représenter la dynamique Hamiltonienne d’une manière intrinsèque, c’est à dire sans introduire des coordonnées, en utilisant un espace d’état doté d’une structure symplectique ou de Poisson, ainsi que d’une fonction Hamiltonienne représentant l’énergie. Cette approche géométrique a conduit à une théorie élégante et puissante pour l’analyse du comportement dynamique des systèmes Hamiltoniens, affichant leurs caractéristiques, telles que les symétries et quantités conservées, de manière transparente.

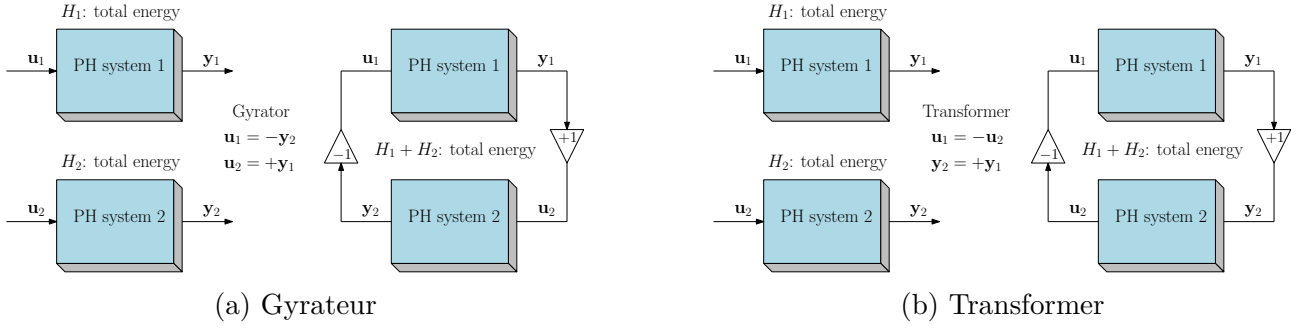


FIGURE 7 – Interconnexion des deux systèmes port-Hamiltonien : ces deux type d'interconnexion sont telles à préserver les échanges de puissance entre les deux systèmes.

Enfin, un troisième pilier sous-jacent au cadre des systèmes port Hamiltoniens est la théorie des systèmes et du contrôle, où les systèmes dynamiques sont décrits comme étant ouverts à l'interaction avec l'environnement (par exemple via des entrées et des sorties, cf. Fig. 6) et comme étant susceptibles d'être contrôlées activement.

Une différence principale entre la théorie des systèmes port-Hamiltoniens et la mécanique géométrique réside dans le fait que pour la première la structure géométrique sous-jacente n'est pas nécessairement la structure symplectique de l'espace des phases, mais est en fait déterminée par la structure d'interconnexion du système. En ce sens la théorie port-Hamiltonien fusionne intrinsèquement la géométrie avec la théorie des réseaux, grâce à la notion de structure de Dirac. Une propriété clé des structures de Dirac est le fait que leur composition est à nouveau une structure de Dirac. Cela a pour conséquence cruciale que l'interconnexion des systèmes port-Hamiltoniens par leur ports est à nouveau un système port-Hamiltonien (cf. Fig. 7). Une autre extension de la théorie des systèmes port-Hamiltoniens par rapport à la mécanique géométrique est l'inclusion d'éléments dissipateurs d'énergie, qui sont largement absents dans les systèmes Hamiltoniens classiques. Cette inclusion élargit considérablement le domaine d'application des systèmes port-Hamiltoniens par rapport à celui des systèmes Hamiltoniens classiques.

La modélisation port-Hamiltonien apparaît comme une théorie générale pour la modélisation des systèmes physiques complexes rencontrés dans de nombreux domaines de l'ingénierie.

C Le code SCRIMP

Le code SCRIMP (Simulation and ContRol of Interactions in Multi-Physics) est un projet Python pour l'approximation numérique d'équations aux dérivées partielles contrôlées à la frontière en utilisant le formalisme port-Hamiltonien. La principale motivation derrière le développement de SCRIMP était de fournir un cadre facile à utiliser pour la solution numérique des systèmes port-Hamiltoniens de dimension infinie à des fins à la fois de recherche et d'enseignement. Les approximations numériques avec des discrétisations sont gérées par le logiciel d'éléments finis FEniCS (<https://fenicsproject.org/>). Des applications basées sur des équations aux dérivées partielles paraboliques ou hyperboliques sont abordées. Plusieurs cahiers sont fournis pour démontrer l'utilisation de SCRIMP dans ce cadre <https://zenodo.org/record/4945329#.Yf1FPVvMJH5>.

Références

- [17] David E Keyes et al. Multiphysics simulations : Challenges and opportunities. *The International Journal of High Performance Computing Applications*, 27(1) :4–83, 2013.
- [18] A.J. van der Schaft and B.M. Maschke. Hamiltonian formulation of distributed-parameter systems with boundary energy flow. *Journal of Geometry and Physics*, 42(1) :166–194, 2002.
- [19] Douglas N. Arnold, Richard S. Falk, and Ragnar Winther. Finite element exterior calculus, homological techniques, and applications. *Acta Numerica*, 15 :1–155, 2006.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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>.
- [23] 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.
- [24] Charles S. Peskin. The immersed boundary method. *Acta Numerica*, 11 :479–517, 2002.
- [25] Joan Mas Colomer, Nathalie Bartoli, Thierry Lefebvre, Joaquim R. R. A. Martins, and Joseph Morlier. An MDO-based methodology for static aeroelastic scaling of wings under non-similar flow. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 63(3) :1045–1061, Mar 2021.
- [26] Antonio Finozzi, Francesco Sanfedino, and Daniel Alazard. Sub-structuring modeling of large space truss structures for structure/control optimization in presence of parametric uncertainties. *arXiv preprint arXiv :2201.01731*, 2022.
- [27] Arjan Van Der Schaft and Dimitri Jeltsema. Port-Hamiltonian systems theory : An introductory overview. *Foundations and Trends in Systems and Control*, 1(2-3) :173–378, 2014.