

## Soutenance de thèse

**Anass SERHANI** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA MOIS et intitulée «*Systèmes couplés d'EDPs, vus comme des systèmes Hamiltoniens à ports avec dissipation : Analyse théorique et simulation numérique*»

**Le 28 septembre 2020 à 9h00, salle des thèses - ISAE-SUPAERO**

devant le jury composé de

|                               |   |                       |
|-------------------------------|---|-----------------------|
| M. Denis MATIGNON             | Professeur ISAE-SUPAERO                               | Directeur de thèse    |
| M. Ghislain HAINE             | Professeur Associé ISAE-SUPAERO                       | Co-directeur de thèse |
| M. Damien TROMEUR-<br>DERVOUT | Professeur Université Lyon 1                          | Rapporteur            |
| M. Nicolae CINDEA             | Maître de Conférences Université Clermont<br>Auvergne | Rapporteur            |
| M. Laurent LEFÈVRE            | Professeur Grenoble INP                               |                       |
| Mme Stéphanie SALMON          | Professeure Université de Reims                       |                       |
| M. Antoine FALAIZE            | Ingénieur de recherche LaSIE                          |                       |
| M. Michel FOURNIÉ             | Maître de Conférences Université Toulouse 3           |                       |

**Résumé :** Dans cette thèse, nous nous intéressons à la modélisation, la discrétisation, la simulation et l'analyse numérique de systèmes d'équations aux dérivées partielles dissipatives, contrôlées et observées à la frontière, via le formalisme des systèmes Hamiltonien à ports d'interaction, ou port-Hamiltonian systems (pHs). L'objectif principal est de préserver le bilan de puissance des systèmes continus lors du passage au discret. Le problème des ondes et de la chaleur y sont largement étudiés. Dans la première partie de la thèse, nous avons étudié un modèle d'ondes hétérogènes anisotropes avec plusieurs types d'amortissement, interne et frontière. Non seulement nous avons rigoureusement éclairci le cadre fonctionnel du problème, mais nous avons mis en évidence son aspect géométrique, plus précisément, en mettant en lumière la structure de Stokes-Dirac sous-jacente au bilan de puissance. Pour discrétiser le problème des ondes amorties, la récente méthode des éléments finis partitionnés, ou Partitioned Finite Element Method (PFEM), est adoptée pour sa construction systématique et sans traitement supplémentaire d'une structure de Dirac de dimension finie, ce qui permet l'obtention naturelle d'une version discrète du bilan de puissance ; la simulation s'effectue par la résolution d'une équation différentielle ordinaire (ODE) linéaire. Cette discrétisation structurée est appliquée aux dissipations internes de type fluide et visco-élastique et aux dissipations frontières de type admittance et impédance. Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés à un problème de diffusion. Le problème de la chaleur est modélisé, en formulation Hamiltonienne, par plusieurs choix de Hamiltoniens possibles, qui découlent soit de la littérature mathématique, soit de la littérature thermodynamique (énergie interne ou bien entropie). Puisque le problème des ondes et le problème de la chaleur partagent le même opérateur de structure, la discrétisation du problème de diffusion hérite d'un grand nombre de raisonnements faits dans la première partie. Néanmoins, le système discret obtenu est alors une équation différentielle algébrique (DAE), linéaire ou bien non-linéaire. La méthode PFEM retenue dans ce travail démontre son efficacité par sa capacité à mimer, au niveau discret, la diffusion bien connue de l'équation de la chaleur, mais également les premier et second principes de la thermodynamique (selon le Hamiltonien choisi lors de la modélisation). La troisième partie de la thèse, très originale, est consacrée à l'analyse numérique de la méthode de discrétisation proposée. La convergence du schéma numérique est démontrée pour des configurations multiples de familles d'éléments finis sur le modèle des ondes de la première partie, et les ordres obtenus sont vérifiées numériquement. En particulier, la configuration optimale des familles d'éléments finis, c'est-à-dire la minimisation du nombre de degrés de liberté pour un ordre de convergence donné, est obtenue en corollaire. La simulation numérique, n-dimensionnelle, des problèmes étudiés a donné lieu à des codes scientifiques développés en Python. Ces derniers sont adressés à destination, à la fois, des utilisateurs novices et des développeurs intéressés pour améliorer les codes ou pour les adapter à d'autres modèles.

**Mots-clés** : Systèmes Hamiltoniens à ports d'interaction, Discrétisation structurée, Méthodes des éléments finis, Systèmes à paramètres distribués, Simulation numérique, Intégration symplectique

**Summary:** The analysis of physical system is usually performed within the Lagrangian and/or Hamiltonian formalism, while modeling and simulation are much more reachable within the network point of view. The modeling of physical systems based on the representation of intrinsic energy exchanges between different energetic domains allows a modular description of their (even complex) dynamic behaviour. In this context, the port-Hamiltonian framework represents a powerful modeling and control tool. Port-Hamiltonian systems are an ideal framework for the compositional modeling of finite- and infinite-dimensional physical systems, which might lead to high-order control systems. Different structure preserving reduction methods have been suggested for linear port Hamiltonian systems. The basic idea of full discretization methods for Hamiltonian PDEs consists of two steps: first, a spatial truncation that reduces the PDE to a system of Hamiltonian ODEs; second, timestepping of the finite-dimensional Hamiltonian ODE using an appropriate symplectic method, which is a well-known and a powerful tool. The crucial new step is the construction of a finite-dimensional ODE model that retains the Hamiltonian character of the given PDE. We aim at revisiting these methods in the more general case of those dissipative dynamical systems with a deeply structured damping model, that proves compatible with the port-Hamiltonian systems (pHs) with dissipation.

**Keywords:** Port-Hamiltonian systems, Structure-preserving discretization, Finite element methods, Distributed-parameter systems, Numerical simulation, Symplectic integration