

Contributions à la conception de métacomposites pour le contrôle vibratoire
Contributions to the design of metacomposites for structural control

(english version below)

Les matériaux adaptatifs sont des matériaux avec des propriétés supplémentaires par rapport aux matériaux classiques (détection ou actionnement dans ce projet du fait de l'utilisation de matériaux piézoélectriques). Ils peuvent ainsi agir directement sur leur environnement et améliorer les propriétés globales de la structure dans laquelle ils sont intégrés (durabilité, efficacité, réponse instantanée aux stimuli de l'environnement). Les composites, quant à eux, sont des matériaux clés pour de nombreux domaines (transports, aéronautique, énergies renouvelables, etc.). Ils répondent au besoin d'allègement des pièces tout en conservant d'excellentes propriétés mécaniques. La combinaison de ces deux technologies permet l'émergence de "super" matériaux aux propriétés structurales contrôlables : les méta-composites adaptatifs. Ils possèdent de nouvelles propriétés personnalisées, développées selon un cahier des charges fonctionnel.

Les enjeux technologiques associés à ces matériaux et à leur utilisation dans les structures sont bien identifiés et ont le potentiel de répondre aux enjeux sociétaux majeurs définis dans le programme Horizon de la Commission européenne (thèmes DT-NMBP-01-2018, LC- NMBP-31-2020 et LC-NMBP-32-2019) et l'un des objectifs de développement durable (ODD9 - Construire des infrastructures résilientes, promouvoir une industrialisation inclusive et durable et favoriser l'innovation) de l'Agenda 2030 adopté aux Nations Unies. Ces enjeux concernent, d'une part, l'augmentation de la durabilité des structures composites (suivi de l'état des structures ; augmentation de leur fiabilité ; amélioration des coûts de maintenance et d'exploitation ; développement de matériaux réparables, adaptables ou reconfigurables) et, d'autre part, leur conception robuste en fonction de toutes les sources d'incertitudes (lois de comportement des matériaux constitutifs, tolérances de fabrication, erreurs de modélisation...). Ce deuxième aspect répond à trois objectifs principaux : 1) l'accélération du processus de conception grâce à l'utilisation de modèles prédictifs, réduisant ainsi le besoin de prototypage coûteux en temps et en argent, 2) la prise en compte des variabilités et incertitudes liées à tout dispositif complexe, permettant de garantir la précision du modèle avec un certain niveau de confiance, et 3) l'enrichissement en temps réel des modèles avec des données expérimentales (intelligence numérique), en exploitant la dimension adaptative de ces structures. Par conséquent, la question principale de ce projet est : Quel outil d'aide à la décision déployer pour maîtriser la conception robuste de structures complexes contrôlables, multiphysiques et multiéchelles telles que les structures méta-composites adaptatives à base de matériaux piézoélectriques ?

Afin de répondre à la problématique, le projet a été découpé en trois Work Packages (WP), fortement couplés et un axe transversal. La conception robuste et l'application visée (le masquage vibratoire de composants sensibles embarqués sur une structure méta-composite)

seront les maîtres mots du projet. Le masquage des vibrations permet de créer des zones d'invisibilité vibratoire sur les structures d'accueil pour, par exemple, isoler les composants sensibles de leur environnement vibratoire.

Le travail de doctorat proposé porte essentiellement sur le WP1, focalisé sur les actions de recherche visant à déployer l'intelligence numérique basée sur la physique dans une approche système afin de développer des outils d'aide à la décision pour la conception robuste de méta-composites adaptatifs tirant parti de simulations multiphysiques multi-échelles et de stratégies de contrôle.

L'état de l'art actuel des méta-composites adaptatifs pour les applications de contrôle des ondes élastiques manque d'une compréhension claire de la façon dont les différents paramètres de conception (propriétés des matériaux passifs, conception du shunt et lois de contrôle) interagissent pour produire une performance efficace (ou inefficace) en particulier lorsque des incertitudes apparaissent : elles sont inévitables à la fois dans le processus de fabrication et dans la mise en œuvre de la loi de commande, suscitant de nombreuses questions. À quelles performances peut-on raisonnablement s'attendre et à quelle vitesse les incertitudes du système les dégradent-elles ? Dans quelle mesure la boucle de commande adaptative peut-elle corriger les variabilités des composants structurels passifs ? Dans quelle mesure les éléments passifs peuvent-ils être conçus pour améliorer les performances structurelles contrôlées et améliorer la robustesse à l'incertitude ? Quelles incertitudes réduire en priorité pour garantir une conception robuste acceptable ? Comment des études expérimentales multiniveaux ciblées peuvent-elles améliorer le compromis entre performance et robustesse ? Telles sont les questions qui seront abordées dans ce workpackage.

Le principal défi de l'approche de modélisation basée sur la physique proposée est de réduire et potentiellement d'éliminer le besoin de prototypage physique pour de nouvelles applications en fournissant des directives de conception efficaces basées sur un modèle prenant en compte les caractéristiques de trois sous-systèmes fortement couplés d'une structure de type méta-composite adaptatif :

1. la structure porteuse composite passive,
2. la répartition et le type de capteurs et d'actionneurs,
3. les lois de commande synthétisées,

sous des incertitudes aléatoires (par exemple des tolérances de fabrication ou des signaux en temps réel) et épistémiques (par exemple des lois de comportement des matériaux ou des temps de retard effectifs dans la boucle de contrôle).

Les développements seront fondés sur les directives bien établies du cadre de vérification et de validation des simulations (V&V) qui permettent de quantifier et d'améliorer sélectivement la crédibilité des simulations basées sur la physique grâce à des études expérimentales dédiées. Les tâches suivantes exploiteront efficacement la sensibilité globale et l'analyse des effets, la conception de test basée sur un modèle, les métriques de validation du modèle, l'étalonnage du modèle et les stratégies de robustesse des décisions pour prendre en charge le processus de conception global pour les méta-composites adaptatifs avec une application de contrôle des ondes élastiques dédiée.

La méthodologie proposée sera d'abord appliquée à un problème académique de conception d'un méta-composite adaptatif pour valider l'approche. L'environnement de prototypage virtuel sera ensuite déployé sur une application de masquage du monde réel intégrant les résultats des simulations et des études expérimentales pour concevoir et fabriquer une réalisation physique dont les performances mesurées seront comparées aux performances de conception basées sur un modèle attendues.

Plus particulièrement, une méthodologie de tolérancement robuste sera développée pour assurer une performance acceptable sous les incertitudes du système et l'évolution des spécifications fonctionnelles. Les trois sous-systèmes couplés doivent être conçus comme un ensemble de manière à faire correspondre au mieux les caractéristiques passives non adaptatives (par exemple, propriétés des matériaux composites, propriétés mécaniques, formes des composants) avec les caractéristiques adaptatives (lois de commande synthétisées) dans un environnement multi-objectifs multi-contraintes. Les conceptions candidates seront comparées à l'aide d'une approche de tableau de bord pour faciliter la compréhension des compromis essentiels pour les comportements multifonctionnels.

Dans un second temps, une nouvelle méthodologie de calibration de modèle sera proposée basée sur le comportement en boucle fermée d'un méta-composite adaptatif conçu pour une application de contrôle d'ondes élastiques. L'idée est de tirer parti de la synthèse des lois de commande pour enrichir l'espace des données expérimentales en générant des réponses focalisées du système afin de faciliter le processus d'étalonnage en réduisant l'espace des paramètres. Ce raffinement du modèle a posteriori devrait fournir des estimations de paramètres plus fidèles et des règles de modélisation améliorées pour les conceptions de produits futurs.

Ce travail se déroulera à l'institut FEMTO-ST (Besançon), en collaboration avec le LTDS (Ecully), dans le cadre du projet collaboratif ASTRIA, financé par l'ANR, qui regroupe les laboratoires SYMME (Chambéry), ICB (Belfort), ROBERVAL (Compiègne), LTDS (Ecully) et FEMTO-ST (Besançon).

Pour postuler, merci d'envoyer un CV, relevés de notes et lettres de recommandation à scott.cogan@femto-st.fr et morvan.ouisse@femto-st.fr.

English version

Adaptive materials are materials with additional properties compared to conventional materials (sensing or actuation in this project with the use of piezoelectric materials). They can thus act directly on their environment and improve the overall properties of the structure in which they are integrated (durability, efficiency, instant response to environmental stimuli). Composites are key materials in many fields (transport, aeronautics, renewable energies, etc.). They meet the need to lighten parts while retaining excellent mechanical properties. The combination of these two technologies has led to the emergence of "super" materials with controllable structural properties: adaptive meta-composites. Adaptive meta-composites feature new, customized properties, developed according to functional specifications.

The technological challenges associated with these materials and their use in structures are well identified and have the potential to address the major societal issues defined in the European

Commission's Horizon program (themes DT-NMBP-01-2018, LC- NMBP-31-2020 and LC-NMBP-32-2019) and one of the Sustainable Development Goals (SDG9 - Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation) of the Agenda 2030 adopted at the United Nations. These challenges concern, on the one hand, increasing the durability of composite structures (monitoring the condition of structures; increasing their reliability; improving maintenance and operating costs; developing materials that can be repaired, adapted or reconfigured) and, on the other hand, their robust design with respect to all sources of uncertainty (behavior laws of constituent materials, manufacturing tolerances, modeling errors, etc.). This second aspect meets three main objectives: 1) speeding up the design process through the use of predictive models, thus reducing the need for costly and time-consuming prototyping, 2) taking into account the variabilities and uncertainties associated with any complex device, enabling model accuracy to be guaranteed with a certain level of confidence, and 3) enriching models in real time with experimental data (digital intelligence), by exploiting the adaptive dimension of these structures. Consequently, the main question of this project is: What decision-support tool can be deployed to master the robust design of complex, controllable, multiphysical and multiscale structures such as adaptive meta-composite structures based on piezoelectric materials?

The project has been divided into three closely coupled Work Packages (WP) and a transversal axis. Robust design and the targeted application (vibration masking of sensitive components embedded in a meta-composite structure) will be the key words of the project. Vibration masking, also called cloaking, makes it possible to create zones of vibratory invisibility on host structures, for example, to isolate sensitive components from their vibratory environment.

The proposed PhD work focuses mainly on WP1, with research actions aimed at deploying physics-based numerical intelligence in a systems approach to develop decision support tools for the robust design of adaptive meta-composites taking advantage of multi-scale multiphysics simulations and control strategies.

The current state-of-the-art in adaptive meta-composites for elastic wave control applications lacks a clear understanding of how the various design parameters (passive material properties, shunt design and control laws) interact to produce effective (or ineffective) performance particularly when uncertainties arise: these are unavoidable both in the manufacturing process and in the implementation of the control law, raising many questions. What performance can reasonably be expected, and how quickly does system uncertainty degrade it? To what extent can the adaptive control loop correct the variabilities of passive structural components? To what extent can passive components be designed to enhance controlled structural performance and improve robustness to uncertainty? Which uncertainties should be reduced as a priority to guarantee an acceptable robust design? How can targeted multi-level experimental studies improve the trade-off between performance and robustness? These are the questions that will be addressed in this workpackage.

The main challenge of the proposed physics-based modeling approach is to reduce and potentially eliminate the need for physical prototyping for new applications by providing efficient model-based design guidelines taking into account the characteristics of three strongly coupled subsystems of an adaptive meta-composite type structure:

1. the passive composite load-bearing structure,
2. the distribution and type of sensors and actuators,
3. the synthesized control laws,

under random uncertainties (e.g., manufacturing tolerances or real-time signals) and epistemic uncertainties (e.g. material behavior laws or effective delay times in the control loop).

Developments will be based on the well-established guidelines of the Simulation Verification and Validation (V&V) framework, which enable the credibility of physics-based simulations to be selectively quantified and improved through dedicated experimental studies. The following tasks will effectively exploit global sensitivity and effects analysis, model-based test design, model validation metrics, model calibration and decision robustness strategies to support the overall design process for adaptive meta-composites with a dedicated elastic wave control application.

The proposed methodology will first be applied to an academic adaptive meta-composite design problem to validate the approach. The virtual prototyping environment will then be deployed on a real-world masking application integrating the results of simulations and experimental studies to design and manufacture a physical realization whose measured performance will be compared with expected model-based design performance.

In particular, a robust tolerancing methodology will be developed to ensure acceptable performance under system uncertainties and evolving functional specifications. The three coupled subsystems are to be designed as an ensemble in such a way as to best match passive non-adaptive characteristics (e.g. composite material properties, mechanical properties, component shapes) with adaptive characteristics (synthesized control laws) in a multiobjective, multi-constraint environment. Candidate designs will be compared using a dashboard approach to facilitate understanding of the trade-offs essential for multifunctional behavior.

In a second step, a new model calibration methodology will be proposed based on the closed-loop behavior of an adaptive meta-composite designed for an elastic wave control application.

The idea is to take advantage of control law synthesis to enrich the experimental data space by generating focused system responses to facilitate the calibration process by reducing the parameter space. This a posteriori model refinement should provide more faithful parameter estimates and improved modeling rules for future product designs.

This PhD is open at FEMTO-ST (Besançon-FR), in close collaboration with LTDS (Ecully), funded by ANR project ASTRIA, with partners SYMME (Chambéry), ICB (Belfort), ROBERVAL (Compiègne), LTDS (Ecully) and FEMTO-ST (Besançon).

For application, please send CV, grades and recommendation letters to scott.cogan@femto-st.fr and morvan.ouisse@femto-st.fr.