

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[LEM3 - Campus Metz / PIMM - Campus Paris]

THÈSE

par : **Mohammed EL FALLAKI IDRISSE**
sera soutenue le : **19 Janvier 2024**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**
Spécialité : **Mécanique des matériaux**

**Model Order Reduction and Artificial Neural Networks
Towards Fast and Accurate Multiscale Simulations of
Composite Materials with Periodic Microstructure**

THÈSE dirigée par :
[Prof. Fodil MERAGHNI]

co-dirigée par :
[Prof. Francisco CHINESTA]

et encadrée par :
[Dr. Francis PRAUD]

Jury

M. Thomas BÖHLKE
M. Frédéric LEON
Mme. Laura DE LORENZIS
M. Charbel FARHAT

M. Ivan IORDANOFF
M. Francisco CHINESTA
M. Francis PRAUD
M. Fodil MERAGHNI
M. George CHATZIGEORGIOU
M. Mustapha ZIANE

Prof. IEM, Institut KIT
Prof. LMA, Aix Marseille Université
Prof. D-MAVT, ETH Zürich
Prof. Institute for Computational and Mathematical
Engineering, Stanford University
Prof. I2M, Arts et Métiers Sciences et Technologies
Prof. PIMM, Arts et Métiers Sciences et Technologies
Dr. LEM3, Arts et Métiers Sciences et Technologies
Prof. LEM3, Arts et Métiers Sciences et Technologies
Dr-HDR LEM3-CNRS
Dr. ESI Group-Chaire ESI/ENSAM

Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Examinateur
Invité
Invité

**T
H
È
S
E**

**Model Order Reduction and Artificial Neural Networks Towards
a Fast and Accurate Multiscale Simulation of Composite Materials
with Periodic Microstructure****Résumé**

Les composites à renfort tissé rencontrent des défis liés à la prédiction de leur comportement intégrant la microstructure. L'utilisation d'approches multi-échelles devient impérative pour déterminer leur réponse macroscopique dans des conditions de chargement complexes, en intégrant les lois constitutives régissant leurs composants. Cependant, implanter efficacement ces méthodologies dans des applications industrielles à grande échelle, en particulier dans le cadre des analyses FE², reste difficile en raison des importantes exigences computationnelles qu'elles impliquent. La difficulté s'accroît lorsque de nombreux calculs directs sont essentiels pour évaluer diverses configurations ou lorsque des simulations en temps réel sont nécessaires, en particulier pour l'optimisation, les problèmes d'analyse inverse ou les applications de jumeaux numériques. La nécessité de ces calculs amplifie les exigences informatiques, ce qui constitue un obstacle notable à leur intégration dans les applications pratiques. Pour remédier à ces problèmes tout en tenant compte des effets d'échelle, cette thèse vise à développer des outils numériques efficaces pour obtenir des prédictions précises et rapides de réponse macroscopique des composites tissés. Tout d'abord, nous développons des jumeaux virtuels (solution multiparamétrique) pour la prédiction en temps réel de la réponse du composite, en utilisant des méthodes basées sur la Décomposition Propre Généralisée (PGD) non intrusive. L'objectif est de fournir une approximation précise de ces problèmes multidimensionnels, impliquant plusieurs paramètres microstructuraux, avec un ensemble de données limité. Ces solutions multiparamétriques sont construites pour des comportements linéaires et non linéaires, y compris des comportements dépendant de l'histoire et du temps. Ensuite, nous développons une approche basée sur les Réseaux Neuronaux Artificiels (ANN) pour créer un modèle macroscopique de substitution des composites. Ce modèle, appelé MuTINN, est fondé sur des principes thermodynamiques et introduit des quantités spécifiques d'intérêt servant comme des variables d'état interne au niveau macroscopique. Cela capture efficacement les lois d'état et d'évolution régissant le comportement dépendant de l'histoire de ces composites tout en préservant l'admissibilité thermodynamique et l'interprétabilité physique de leurs réponses globales. Cette approche a été associée avec succès à un code FE, simplifiant l'application de l'approche multiscale FE-MuTINN pour les calculs de structures composites. Les capacités prédictives de l'approche proposée sont démontrées à travers plusieurs échelles, illustrées par divers exemples de structures composites tissées. Ces applications prennent en compte l'endommagement anisotrope des torons et le comportement élastoplastique d'une matrice polymère. Cela promet une solution potentielle pour atténuer les défis de calculs associés aux simulations multi-échelles de grandes structures composites, ouvrant la voie au développement des jumeaux hybrides.

Mots clés : Composites à Renfort Tissé, Anélasticité, Modélisation Multi-échelle, Endommagement Anisotrope, Solution Multiparamétrique, PGD non intrusive, FE-MuTINN, Jumeaux Virtuels, Simulation en temps-réel.

Abstract

Woven reinforced composites are often hindered by challenges in accurately predicting their mechanical behavior. This obstacle primarily stems from the heterogeneous nature of these materials. Consequently, employing multi-scale approaches becomes imperative to ascertain their overall responses under complex loading conditions, incorporating detailed descriptions of microstructure and the constitutive laws governing their components. However, effectively incorporating these methodologies into real-scale applications, particularly within FE² analyses, remains challenging due to the significant computational requirements. This challenge intensifies when numerous direct calculations are necessary for testing various configurations, a critical aspect in optimization, inverse analysis, or real-time simulations. The need for such calculations adds to the computational demands, posing a significant obstacle to integrated into practical applications. To address these issues, while considering the scale effects, this thesis aims to develop efficient numerical tools to achieve accurate and fast predictions of woven composite response. First, we develop virtual twins (multiparametric solution) for real-time prediction of composite response, using non-intrusive Proper Generalized Decomposition (PGD) based methods. This aims at providing an accurate approximation of these high-dimensional problems, that involved several microstructural parameters, with limited dataset. These multiparametric solutions are constructed for both linear and nonlinear behavior including history- and rate-dependent behaviors. Second, we develop an approach based on Artificial Neural Networks (ANNs) to perform a macroscopic surrogate model of composites. This model, referred to as Multiscale Thermodynamics Informed Neural Networks (MuTINN), is founded on thermodynamic principles and introduces specific quantities of interest that serve as internal state variables at the macroscopic level. This captures efficiently the state and evolution laws governing the history-dependent behavior of these composites while retaining the thermodynamic admissibility and the physical interpretability of their overall responses. This approach has successfully associated with FE code, streamlining the application of multiscale FE-MuTINN approach for composite structure computations. The prediction capabilities of the proposed approach are demonstrated across the material scales, exemplified through diverse instances of woven composite structures. These applications account for anisotropic yarn damage and an elastoplastic polymer matrix behavior. This promises a potential solution to alleviate the computational challenges associated with multiscale simulations of large composite structures and paving the way for the development of a hybrid twin solution.

Keywords: Woven Composite Materials, Elastic and Inelastic Behaviors, Anisotropic Yarn Damage, Multiscale Modeling, Multiparametric Solution, Non-intrusive PGD, FE-MuTINN, Virtual Twins, Real-time simulation.