

# **Homogénéisation de composites sous conditions thermomécaniques couplées**

G. Chatzigeorgiou, F. Meraghni

LEM3, CNRS, Arts et Métiers, Université de Lorraine, Metz

Les phénomènes fortement dissipatifs lors de conditions de chargement cyclique élevé ou modéré dans un composant structurel en matériau composite provoquent une interaction significative entre les champs mécaniques et thermiques en raison du processus d'auto-échauffement. L'homogénéisation thermoélastique classique néglige l'effet des champs mécaniques sur la variation de température, ce qui la rend insuffisante pour décrire la réponse thermomécanique complexe des structures non linéaires. Pour y remédier, il est nécessaire de développer des modèles de micromécanique prenant en compte les couplages thermomécaniques dans les composites non linéaires soumis à des phénomènes visqueux et plastiques, ainsi qu'à d'éventuels endommagements.

La théorie de l'homogénéisation périodique offre une base solide pour comprendre le comportement à deux échelles des milieux composites thermomécaniques, dans lesquels les constituants du matériau sont supposés obéir aux lois des matériaux standards généralisés. Ce cadre permet de prendre en compte à la fois les lois d'équilibre et les lois de la thermodynamique aux niveaux microscopique et macroscopique. En utilisant la technique d'homogénéisation par développement asymptotique, on obtient des résultats utiles sur la structure générale des potentiels énergétiques et des lois constitutives à l'échelle micro et macro [1]. Une formulation incrémentale et linéarisée a été développée, permettant d'identifier des modules tangents thermomécaniques appropriés pour le problème macroscopique. Sur la base de ce cadre théorique, une approche par éléments finis à deux échelles (EF<sup>2</sup>) a été établie [2]. Les constituants des matériaux impliqués dans les analyses obéissent aux lois des matériaux standards généralisés, tandis que les équations caractéristiques du problème (loi de conservation, première loi de la thermodynamique) sont exprimées et satisfaites aux échelles microscopique et macroscopique.

Pour surmonter le coût computationnel élevé de l'approche EF<sup>2</sup>, un cadre d'homogénéisation par champ moyen pour l'étude des composites soumis à des processus thermomécaniques entièrement couplés a été proposé [3]. Ce cadre aborde ces effets en combinant le schéma de Mori-Tanaka et la théorie de l'analyse des champs de transformation (TFA), tout en développant un cadre multi-échelle capable de prendre en compte les couplages thermomécaniques. Pour réduire encore plus le coût computationnel, des techniques basées sur les données peuvent être adoptées. Dans ces approches, la réponse macroscopique de VER est remplacée par un réseau neuronal artificiel à deux niveaux, qui satisfait les restrictions thermodynamiques de la deuxième loi de la thermodynamique. Ce nouveau réseau neuronal (appelé MuTINN [4]) est intégrable dans les calculs par éléments finis, permettant des simulations structurelles très rapides et robustes.

## Références

- [1] G. Chatzigeorgiou, N. Charalambakis, Y. Chemisky, F. Meraghni, Periodic homogenization for fully coupled thermomechanical modeling of dissipative generalized standard materials, *International Journal of Plasticity*, 81 (2016) 18-39.
- [2] E. Tikarouchine, G. Chatzigeorgiou, Y. Chemisky, F. Meraghni, Fully coupled thermo-viscoplastic analysis of composite structures by means of multi-scale three-dimensional finite element computations, *International Journal of Solids and Structures*, 164 (2019) 120-140.

- [3] G. Chatzigeorgiou, F. Meraghni, Q. Chen, Fully coupled nonlinear thermomechanical modeling of composites using mean-field Mori–Tanaka scheme combined with TFA theory, *International Journal of Solids and Structures*, 296 (2024) 112828.
- [4] M. El Fallaki Idrissi, F. Praud, F. Meraghni, F. Chinesta, and G. Chatzigeorgiou, Multiscale Thermodynamics-Informed Neural Networks (MuTINN) towards fast and frugal inelastic computation of woven composite structures, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 186 (2024), 105604.