RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS BASÉS SUR LA THERMODYNAMIQUE ET MODÉLISATION MULTI-ÉCHELLE

F. Masi^a

^a Univ. Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LJK, filippo.masi@inria.fr

Mots clés : apprentissage profond, homogénéisation, thermodynamique, modélisation multi-échelle.

Résumé

La modélisation du comportement mécanique des matériaux complexes hétérogènes, tels que les géomatériaux et les métamatériaux, représente un défi majeur en mécanique des solides. Ces matériaux présentent des comportements fortement non linéaires, dépendants de l'histoire du chargement, qui ne peuvent être correctement décrits par les approches heuristiques. Les méthodes multi-échelles, telles que l'homogénéisation numérique (FE², FEM×DEM), permettent de relier le comportement microscopique au comportement macroscopique via la résolution de problèmes auxiliaires. Cependant, ces approches, bien qu'exactes, sont limitées par leur coût de calcul prohibitif, en particulier pour des simulations en temps réel ou des systèmes de grande échelle.

Ces dernières années, le développement de l'apprentissage automatique, porté par une disponibilité croissante de données, a ouvert des perspectives prometteuses pour surmonter les limites des approches classiques. Nous présentons ici les *Thermodynamics-based Artificial Neural Networks* (TANN), une approche hybride qui combine apprentissage profond et principes fondamentaux de la thermodynamique [1–3]. Ces réseaux intègrent directement les lois de conservation de l'énergie et le second principe de la thermodynamique, garantissant ainsi des prédictions physiquement cohérentes. Cet expose se concentre principalement sur deux problématiques majeures : (1) l'identification des variables d'état internes représentatives des matériaux complexes [2, 3] – un aspect essentiel en thermodynamique hors-équilibre – et (2) l'apprentissage à partir d'ensembles de données clairsemés [4] – une contrainte fréquente en mécanique expérimentale. Intégrés dans des schémas multi-échelles (FEM×TANN [2]), ils permettent de réduire considérablement les coûts de calcul tout en maintenant une précision élevée.

Les capacités de cette approche sont démontrées sur plusieurs cas représentatifs, incluant des matériaux microstructurés présentant des comportements inélastiques. Les résultats montrent que les TANN offrent une modélisation robuste, interprétable et précise, tout en ouvrant la voie à des simulations multi-échelles plus efficaces et accessibles pour la mécanique des solides.

Références

- [1] F. Masi, I. Stefanou, et al. Thermodynamics-based Artificial Neural Networks for constitutive modeling, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 147 (2021) 104277.
- [2] F. Masi, I. Stefanou. Multiscale modeling of inelastic materials with Thermodynamics-based Artificial Neural Networks (TANN), *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 398 (2022) 115190.
- [3] F. Masi, I. Stefanou. Evolution TANN and the identification of internal variables and evolution equations in solid mechanics, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 174 (2023) 105245.
- [4] F. Masi, I. Einav. Neural integration for constitutive equations using small data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 420 (2024) 116698.