

## **Approche multi-échelle de la modélisation des couplages chemo-magnéto-thermo-mécaniques**

Olivier HUBERT, Karine LAVERNHE-TAILLARD, Xuyang CHANG, Maxime SAVARY, Mame Daro FALL, Olivia SEVESTRE

LMT (ENS Paris-Saclay/CNRS/Université Paris Saclay), 61 Av. Président Wilson, 94235 Cachan, France

Notre époque se caractérise par une utilisation de plus en plus intensive des actionneurs dans des domaines d'application extrêmement vastes, de la plus grande à la plus petite échelle. La miniaturisation de ces systèmes ajoute de nouvelles contraintes de conception et nécessite le développement de matériaux à propriétés contrôlées et de modèles robustes. L'une des solutions envisagées est l'utilisation de matériaux développant au moins un couplage multiphysique fort (l'un des mécanismes physiques étant la mécanique). Les exemples incluent les matériaux magnétostrictifs, les alliages à mémoire de forme classiques ou magnétiques, les matériaux piézoélectriques, certains supports composites multi-ferroïques, etc. L'un des défis de la modélisation est de mieux décrire les interactions complexes observées expérimentalement (non-linéarité, non-monotonie, irréversibilité, effets dynamiques et multiaxiaux etc ...), et dériver des modèles de comportement présentant des domaines de validité suffisants pour les applications considérées.

Nous nous concentrerons dans cette présentation sur les matériaux présentant des couplages de type chemo-magnéto-thermo-mécaniques. Nous commencerons par une présentation des résultats expérimentaux obtenus en laboratoire illustrant la grande diversité des phénomènes associés aux couplages précités. Nous montrerons ensuite qu'il est possible d'approcher la modélisation d'une grande variété de ces phénomènes par une approche unifiée utilisant les ressorts du changement d'échelle et d'une thermodynamique adaptée [1,2,3,4]. L'approche convient en particulier aux situations où certaines quantités physiques peuvent être considérées comme homogènes sur une échelle pertinente et où la déformation libre peut être définie. Les résolutions peuvent être analytiques ou numériques. Plusieurs situations concrètes traitées en laboratoire illustreront le propos.

- [1] C. Bormio-Nunes, O. Hubert, "Piezomagnetic behavior of Fe-Al-B alloys", *J. of Magnetism Magnetic Materials*, **393** (2015) 404-418.
- [2] M.Savary, O.Hubert, A.L.Helbert, T.Baudin, R.Batonnet, T.Waeckerlé, "Magnetostrictive and magnetic effects in Fe-27%Co laminations", *AIP Advances*, **8**, (2018) 056117.
- [3] A. Maynadier, D.Depriester, K.Lavernhe-Taillard, O.Hubert, "Thermo-mechanical description of phase transformation in Ni-Ti Shape Memory Alloy", *Procedia Engineering*, **10** (2011), 2208-2213.
- [4] M.D. Fall, O.Hubert, F.Mazaleyrat, K.Lavernhe-Taillard, A.Pasko, "Multiscale Modeling of Magnetic Shape Memory Alloys: Application to NiMnGa Single Crystal", *IEEE Transactions on Magnetism*, **52**, 5 (2016) 1-4.