

APPEL A PROJET FARMAN 2013

Identification par rayons X des fractions de variantes dans les alliages à mémoire de forme magnétiques - IDEFIX

Durée du projet : 2 ans

Responsables scientifiques

- Olivier HUBERT, PU, ENS-Cachan, LMT-Cachan, hubert@lmt.ens-cachan.fr
- Frédéric MAZALEYRAT, PU, ENS-Cachan, SATIE, mazaleyrat@satie.ens-cachan.fr

Membres de l'équipe-projet avec la proportion de temps consacré au projet

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| - Olivier HUBERT, LMT-Cachan | 6 hommes-mois (25%) |
| - Frédéric MAZALEYRAT, SATIE | 6 hommes-mois (25%) |
| - Martino LO-BUE, SATIE | 6 hommes-mois (25%) |
| - Karine LAVERNHE, LMT-Cachan | 6 hommes-mois (25%) |
| - Patrick AIMEDIEU, LMT-Cachan | 3 hommes-mois (12,5%) |
| - Alexandre PASKO, SATIE | 3 hommes-mois (12,5%) |

Description de la problématique scientifique

Les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) sont réputés pour l'effet mémoire de forme qui est la capacité à recouvrer leur état initial par simple chauffage après avoir été déformé de manière apparemment stable. Ils présentent aussi un comportement pseudo-élastique c'est à dire qu'ils sont capables de se déformer en de très grandes proportions, jusqu'à 8%, et de recouvrer leur configuration initiale à la décharge [James *et al.*, 2000]. Ces comportements sont le fait d'une transformation de phase solide-solide, isochore et displacive, appelée par analogie avec les aciers « transformation martensitique » [Bhattacharya, 2003]. Ce changement de phase peut être indifféremment provoqué par une variation de température ou par une contrainte appliquée. Il provoque à l'échelle cristalline l'apparition de « variantes » développant des déformations du réseau de l'ordre de 5% à 10% selon les alliages. La phase stable à haute température, appelée austénite, a généralement une structure cristalline de grande symétrie. Elle se transforme en un nombre fini de variantes de martensite, stable à basse température, qui présentent un degré de

symétrie inférieure (structure cubique vers monoclinique ou orthorhombique par exemple).

Les alliages à mémoire de forme magnétiques (AMFM) sont, en même temps, une forme particulière et générale des alliages à mémoire de forme : outre via une variation de température et l'application d'une contrainte, la transformation de phase peut également être obtenue par l'application d'un champ magnétique, chaque variante définissant des domaines de Weiss où l'aimantation est uniforme [Straka *et al.*, 2003 ; Müllner *et al.*, 2004]. Ces matériaux assez récents (on citera en particulier les Heusler Alloys) ont montré leur capacité à devenir de très bons matériaux pour les actionneurs car ils fournissent une déformation beaucoup plus importante que les matériaux actifs conventionnels comme les matériaux piézoélectriques ou magnétostrictifs [James *et al.*, 1999]. Et contrairement aux AMF classiques, ils ont une réponse en déformation très rapide sous l'effet d'un champ magnétique. Dans le cas des AMF classiques, le changement de phase s'accompagne en effet d'une génération ou absorption de chaleur conduisant à une hystérésis importante. Dans le cas des AMFM, le réarrangement structural des variantes de martensite s'effectue à température constante.

L'utilisation de ce type d'AMF rend nécessaire la compréhension des phénomènes régissant leur comportement. Cela passe par une observation du comportement via des outils adaptés à l'observation des phénomènes de couplage thermo-magnéto-mécanique et par la simulation de structures entières sous chargements multiaxiaux. Ce n'est possible qu'à travers la modélisation du comportement de Volumes Élémentaires Représentatifs (VER), et l'établissement de lois de comportement fiables et rapides d'une part, ainsi que la modélisation de la structure et de ses échanges thermiques d'autre part.

Le travail qui est proposé s'intéresse à deux aspects de cette problématique complexe:

- le développement d'outils expérimentaux adaptés à l'observation des fractions de phase, sous chargement magnétique, thermique et/ou mécanique
- la mise en place de mesures thermo-magnéto-mécaniques du comportement de ces matériaux

Les aspects modélisations seront développés par ailleurs. Nous nous baserons en particulier sur un modèle multiéchelle de changement de phase récemment proposé [Maynadier, 2012]. Ce modèle décrit le comportement d'un VER à partir de la physique de la transformation martensitique à l'échelle de la maille cristalline. Il est fondé sur la comparaison des énergies libres de chaque constituant. Une évaluation probabiliste des fractions de phases et de variantes, en tant que variables internes, est réalisée grâce à une distribution de Boltzmann. L'approche est au départ inspirée de modèles de couplage magnéto-mécanique [Daniel *et al.*, 2008] ; il peut donc s'étendre sans difficulté majeure aux AMFM.

Originalité du projet

Le projet permettra une estimation quantitative des fractions de phase en fonction des variables température et aimantation, ce qui autorise une comparaison avec un modèle de comportement développé en parallèle.

Le projet peut paraître ambitieux. Il s'agit essentiellement de mettre en place l'ensemble expérimental et de démontrer la faisabilité de ce type de mesure à l'aide de l'outil proposé. Un travail préalable à une analyse poussée du comportement des Heusler Alloys consiste à réaliser d'une part les mesures de phases (et de contrainte) sur des AMF classiques soumis à une variation de température (nous disposons d'une platine à effet Peltier prévue à cet effet). D'autre part, des mesures de fractions de domaines magnétiques sous chargement magnétique seront réalisées en utilisant un matériau magnétique classique à magnétostriction élevée (type fer-cobalt polycristallin). Le système de mesure sera par ailleurs complété d'une mesure de température par caméra infra-rouge. La réalisation de mesures de changement de phase sous contrainte pour un AMF classique, puis un AMFM est envisageable d'ici 1 à 2 ans. Un projet ANR sera déposé en ce sens, ce type d'essais nécessitant des moyens techniques et humains adaptés.

Apport scientifique des différents partenaires à la réalisation du projet

Le LMT-Cachan est équipé d'un parc important de machines d'essais mécaniques et de systèmes d'analyse et de mesures des grandeurs mécaniques. L'accent est en particulier porté sur les mesures en cours d'essais. La mesure de champs de propriétés est un problème actuel en mécanique des matériaux. Elle nécessite le recours à des techniques de mesure sophistiquées mettant en œuvre par exemple l'interaction entre une onde électromagnétique et la matière à analyser. Le problème se pose en particulier pour l'estimation des contraintes lors d'essais mécaniques multiaxiaux, où la seule connaissance des conditions aux limites ne suffit pas. De même, l'étude d'une transformation de phase sous sollicitation mécanique, thermique ou magnétique requiert des outils spécifiques, à la fois précis et rapides pour le suivi d'une cinétique. Lors d'une transformation de phase sous sollicitation multiaxiale, les deux problèmes (mécanique et microstructural) se posent. Le LMT-Cachan s'est récemment doté d'un système de diffraction des rayons X à même de mesurer ces deux grandeurs de façon simultanée. Ce système doit nous permettre de réaliser une évaluation des champs de fractions volumiques des phases d'un AMFM lors des transformations, sous sollicitation thermique, magnétique ou mécanique. Le laboratoire SATIE possède par ailleurs toute l'expérience nécessaire pour pouvoir dimensionner et réaliser un système d'excitation magnétique adapté à la mesure envisagée (en particulier un système capable de développer les niveaux de champ requis pour faire évoluer la structure en domaines ou en variantes).

Le projet est piloté par O.Hubert et F. Mazaleyrat, tous deux professeurs à l'ENS-Cachan. O.Hubert est spécialiste des couplages multiphysiques, tant d'un point de vue expérimental que de la modélisation. F.Mazaleyrat est un spécialiste de mesures magnétiques et de la physique des matériaux. Il est en particulier sensibilisé aux applications capteur et actionneur évoqués plus haut.

Demande financière, destination des fonds clairement explicitée avec une répartition : fonctionnement (dont gratifications de stage) et équipement.

Nous souhaiterions disposer du financement pour en particulier :

- un stagiaire de M2 (sur une durée de 6 mois), de formation physique appliquée. Celui-ci

- sera chargé des essais lors de la 2eme année et de la comparaison avec le modèle (2 k€)
- le matériel d'excitation magnétique *in-situ* (petit matériel et carte de commande type NI-DAQ). Matériel pour la génération du champ magnétique, basé sur un système de culasse et de bobinages + autres petits matériels + usinage des pièces – 10k€
- financement d'une conférence internationale pour deux personnes – 2 k€

Soit une aide au fonctionnement de 14 k€ sur 2 ans.

Bibliographie succincte

Bhattacharya, K. (2003). « Microstructure of martensite ». materials modelling. Oxford materials 2007 édition.

Daniel, L., Hubert, O., Buiron, N. et Billardon R. (2008). « Reversible magneto-elastic behavior : a multiscale approach ». *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 56:1018-1042.

James, R. et Hanes, K. (2000). Martensitic transformation and shape memory alloys. *Acta Materialia*, 48:197–222.

James R.D., Tickle R., Wuttig M. (1999), « Large field induced strains in ferromagnetic shape memory materials », *Mater. Sci. Eng. A*, 273-275 : 320-325.

Maynadier, A., (2012) « Couplages thermomécaniques dans les Alliages à Mémoire de Forme : Mesure de champs cinématique et thermique et modélisation multiéchelle », Thèse de doctorat, ENS-Cachan.

Müllner P., Chernenko V.A., Kosterz G. (2004). « Large magnetic-field-induced deformation and magneto- mechanical fatigue of ferromagnetic Ni-Mn-Ga martensites ». *Mater. Sci. Eng. A*, 387-389 : 965-968.

Straka L., Heczko O., Novak V., Lanska N. (2003), “Study of austenite-martensite transformation in Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy”, *J. Phys IV*, 112 : 911-915.