

CONVERSION D'ÉNERGIE MAGNÉTO-THERMO-MÉCANIQUE DANS LES ALLIAGES A MÉMOIRE DE FORME MAGNÉTIQUES

Jean-Yves GAUTHIER, Arnaud HUBERT, Joël ABADIE, Nicolas CHAILLET
Laboratoire d'Automatique de Besançon - UMR CNRS 6596 – ENSMM – UFC
24 rue Alain Savary, 25000 BESANÇON
{jygauthi, ahubert, jabadie, chaillet}@ens2m.fr

Christian LEXCELLENT
Institut FEMTO-ST - UMR CNRS 6174 – ENSMM – UFC – UTBM
24 chemin de l'Épitaphe, 25000 BESANÇON
christian.lexcellent@univ-fcomte.fr

Résumé

Les alliages à mémoire de forme magnétiques sont des matériaux actifs dont les caractéristiques combinent celles des alliages à mémoire de forme *classiques* et celles des matériaux magnétostrictifs. Ces matériaux relativement récents sont actuellement assez peu utilisés pour des applications pratiques telles que les actionneurs et les capteurs en raison des difficultés de conception et de contrôle résultant d'un comportement complexe. Cet article se propose de présenter le mode de conversion d'énergie à l'œuvre dans ces matériaux ainsi qu'un état de l'art des principaux travaux en termes d'actionneurs. Il se propose ensuite de présenter les réalisations des auteurs ainsi que les modèles de comportement développés pour finir par une présentation des règles de conception et de contrôle mis en évidence.

Mots Clés. Matériaux actifs, alliages à mémoire de forme magnétiques, actionneurs, capteurs, conversion d'énergie.

INTRODUCTION

Les alliages à mémoire de forme magnétiques (AMFM) sont une nouvelle classe de matériaux actifs dont les caractéristiques combinent celles des alliages à mémoire de forme *classiques* et celles des matériaux magnétostrictifs. De ce fait, les performances des AMFM se situent à l'intersection de celles de ces deux types de matériaux et complètent ainsi l'offre actuelle en matière de matériaux actifs. L'objectif de cet article est d'expliquer le mode de conversion d'énergie de ces matériaux *relativement* nouveaux et de présenter les différentes réalisations en termes de capteurs et d'actionneurs qui ont été développées par les auteurs depuis maintenant plusieurs années. Les travaux présentés résultent d'une collaboration entre une équipe de recherche en mécanique et sciences des matériaux et une équipe de recherche en développement et contrôle de micro-actionneurs. Cette collaboration se justifie par la forte pluridisciplinarité nécessaire dans tout travail sur les matériaux actifs. Cet article se propose dans un premier temps de présenter le mode de fonctionnement des AMFM ainsi que des réalisations internationales en termes de capteurs et d'actionneurs. Les stratégies de modélisation adoptées par les auteurs seront présentées dans un second temps en se basant sur l'actionneur *classique* rencontré dans la littérature. La modélisation retenue permet alors de modéliser le comportement dynamique complexe thermo-magnéto-mécanique des AMFM. Différentes réalisations seront ensuite présentées et enfin quelques pistes de réflexion et d'études ainsi que des perspectives seront proposées.

PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT ET ÉTAT DE L'ART

De par leurs caractéristiques héritées des AMF classiques et des matériaux magnétostrictifs, le mode de conversion d'énergie des AMFM peut être vu comme une superposition des effets obtenus pour ces deux classes de matériaux. Leurs performances se situent donc entre les performances de ces deux matériaux (cf. Fig. 1 pour une comparaison de la relation densité d'énergie/fréquence d'utilisation).

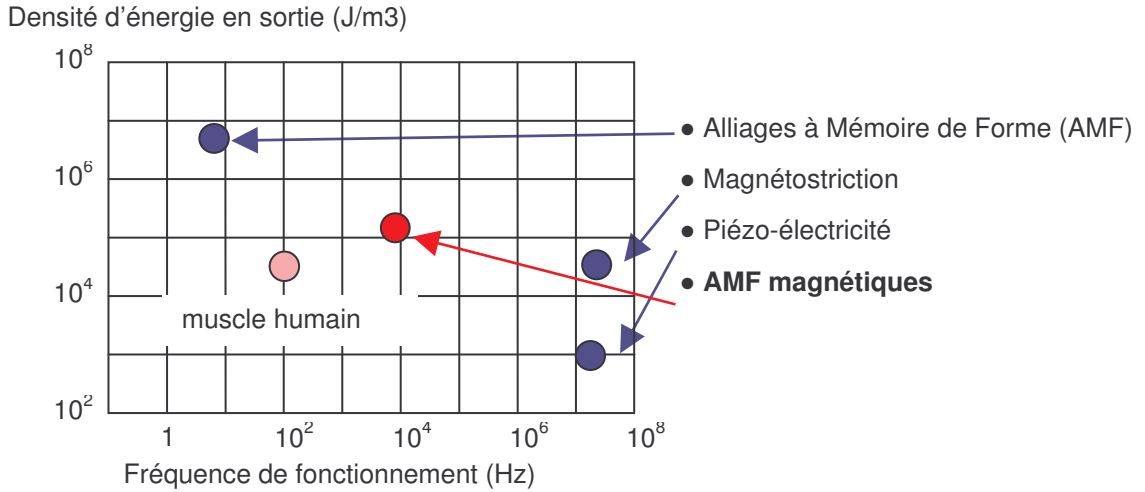


Fig. 1 : Caractéristiques des principaux matériaux actifs.

Les AMFM offrent une déformation maximale de l'ordre de 6 à 10 % comme les AMF thermiques classiques mais présentent des temps de réponse de l'ordre de ceux des matériaux magnétostrictifs (ordre de la milliseconde). A l'heure actuelle, deux matériaux sont principalement étudiés et utilisés. Ils ont tous les deux été mis au point dans les années 1995/1996 aux États-Unis, par une équipe du MIT pour le Ni-Mn-Ga [1] et par une équipe de l'université du Minnesota pour le FePd [2]. Parmi tous les matériaux présentant les propriétés des AMFM, le plus utilisé est sans conteste le Ni-Mn-Ga. C'est ce matériau qui a été utilisé dans tous nos travaux. Les échantillons ont été obtenus auprès de la société finlandaise Adaptamat. Le matériau à notre disposition (sous la forme de bâtonnets monocristallins) présente deux formes cristallographiques différentes fonctions de la température : l'austénite (la phase haute température) et la martensite (la phase basse température). L'austénite se présente sous une forme cristallographique cubique (c'est en fait plus exactement la forme cristallographique dite *d'Heusler*) alors que la martensite (forme 5M pour notre matériau) se présente sous une forme parallélépipédique avec trois variantes possibles (cf. Fig. 2 (a)).

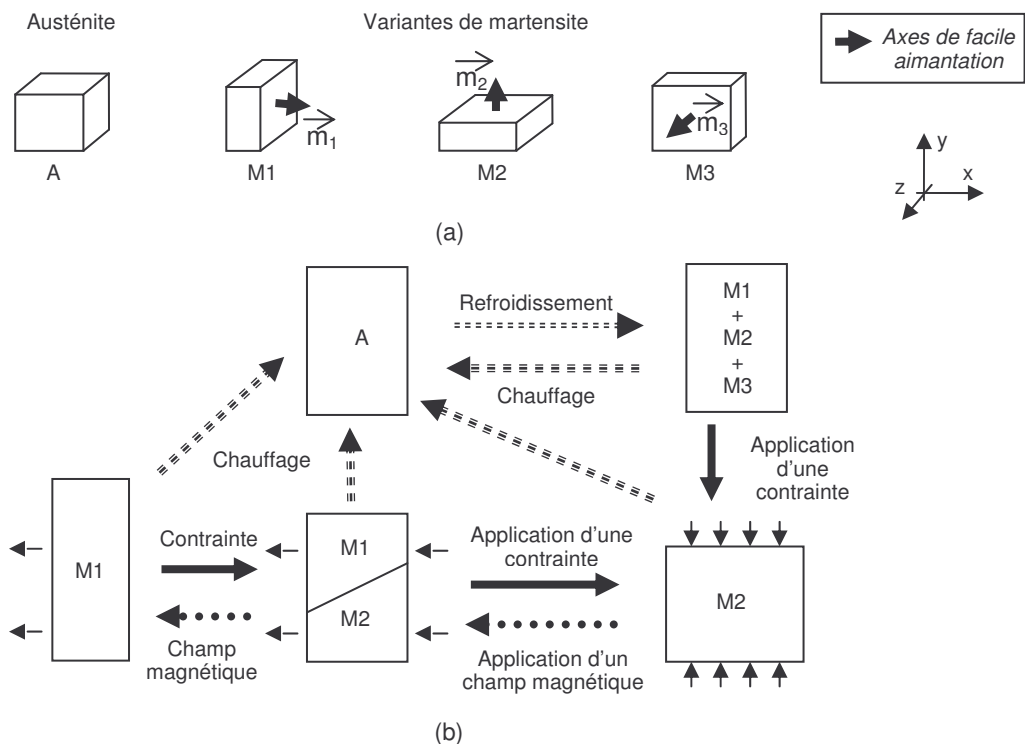


Fig.2 : Constitution d'un AMFM : (a) représentation de l'austénite et des trois variantes de martensite, (b) réarrangement martensitique et transformation de phase sous l'action d'un champ de contrainte, d'un champ magnétique et de la température.

Les différents cycles de passage d'une phase à l'autre sont représentés schématiquement sur la Fig. 2 (b). A partir de la phase mère austénite A, un refroidissement sous contraintes nulles fait apparaître les trois phases M1, M2 et M3 à part égales. L'application d'une contrainte magnétique ou mécanique permet de favoriser l'une ou l'autre de ces variantes. Un champ mécanique favorise la variante qui a son axe court orienté suivant l'axe de cette contrainte et un champ magnétique favorise la variante qui a son axe de facile aimantation orienté suivant l'axe de ce champ. On parle alors de réarrangement ou de réorientation martensitique. L'axe court étant le même que l'axe de facile aimantation, une disposition perpendiculaire de ces deux champs permet de favoriser dans le plan xy l'une ou l'autre des deux variantes perpendiculaires pour un actionnement en deux dimensions (M1 et M2 pour une étude et un contrôle de la déformation dans le plan xy tel que celui représenté sur la Fig. 2 (b)). La favorisation de l'une ou l'autre des variantes M1 et M2 permet de générer une déformation, leurs axes courts étant perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. La déformation résultant de ce principe permet de réaliser des actionneurs à partir d'un morceau d'AMFM à condition d'utiliser les contraintes mécaniques et magnétiques de manière *antagoniste* pour obtenir un actionnement bidirectionnel. En substituant une précontrainte mécanique à l'application d'une contrainte mécanique extérieure, la déformation devient contrôlable à partir seulement du champ magnétique appliqué. La grande majorité des réalisations d'actionneurs actuellement recensées reposent sur ce principe de fonctionnement.

En dehors des très nombreux travaux réalisés sur les AMFM par les chercheurs en science des matériaux, assez peu d'études sont effectuées dans les domaines applicatifs et notamment celui de la conception d'actionneurs et de capteurs. Les principales réalisations sont l'œuvre de la firme finlandaise Adaptamat et de quelques laboratoires. Ils utilisent essentiellement le principe décrit précédemment [3] [4]. La société Adaptamat a également réalisé un actionneur de type *Inchworm* ainsi qu'une pompe. Un concept de pompe est également proposé par la société Active Control eXperts située à Cambridge dans le Massachusetts aux États-Unis en collaboration avec le MIT. Quelques prototypes de soupapes existent également, notamment celui recensé dans [3] et celui présenté par la société Midé technology Corp. Nous pouvons également citer un micro-actionneur pour scanner optique [5] contrôlé en température. Celui-ci utilise l'effet *reluctance variable* associé au passage de la température de Curie du matériau plutôt que le principe de réorientation des variantes M1/M2 comme dans toutes les autres réalisations. Quelques prototypes de type *push-pull* sont également proposés en chine [6], en Allemagne [7] ainsi que sur un prototype que nous avons réalisé [8]. En dehors de ces quelques réalisations issus de travaux de laboratoires de recherche, peu de réalisations existent et pratiquement aucune en France. De plus, aucun de ces prototypes n'est véritablement utilisé industriellement. Le manque d'applications concrètes est en grande partie dû aux difficultés de conception et de contrôle de ces dispositifs. Ces difficultés seront présentées dans la suite de cet article.

MODÉLISATION THERMO-MAGNÉTO-MÉCANIQUE

Stratégie de modélisation adoptée

Dans le domaine des AMFM, plusieurs stratégies de modélisation. Ainsi, parmi les chercheurs en sciences des matériaux, certains ont une approche microscopique (physique du solide et étude des réseaux cristallographiques) et d'autres, une approche macroscopique (physique des milieux continus et thermodynamique). La première approche est délicate à exploiter pour la conception d'applications telles que les actionneurs, c'est pourquoi nous avons retenu la seconde. En outre, les approches recensées sont différentes pour les modèles issus des travaux de la communauté des matériaux en AMF classiques (plutôt des mécaniciens) ou des modèles issus de la communauté des matériaux magnétiques (plutôt des physiciens). Notre tâche a donc été en premier lieu de trouver un compromis raisonnable entre les modèles issus de ces deux communautés afin d'obtenir un modèle multi-physique pertinent et applicable à la conception de dispositifs réels. De plus, il est notable que la communauté scientifique regroupée autour des domaines de la conception et de la commande des actionneurs utilise souvent une approche *système* afin d'avoir une vue d'ensemble des dispositifs complets (approche mécatronique : interaction entre le système de contrôle, le système d'alimentation de puissance, le système de conversion d'énergie et la charge à entraîner). Notre stratégie de modélisation se situe donc à l'intersection de ces différentes approches et la forte pluridisciplinarité qui en résulte nous conduit à faire certains compromis. Au final, l'approche qui a été retenue est une approche variationnelle de type énergétique mélangeant aussi bien les techniques de contrôle énergétique (théorie de Lyapunov, passivité, dissipativité), la modélisation lagrangienne et hamiltonienne ainsi que la thermodynamique des processus irréversibles.

Application à l'étude de l'actionneur *classique*

Une première étude a été conduite sur un prototype simple ressemblant à la majorité des réalisations issues de la littérature (cf. Fig. 3). Sur ce prototype, nous définissons une fonction de Lagrange L puis une fonction de Hamilton H à l'aide d'une transformation de Legendre [9]. L'hamiltonien est analogue à l'énergie totale mais exprimée à l'aide d'autres variables (coordonnées et impulsions généralisées). L'hamiltonien contient de nombreux termes énergétiques tels que l'énergie cinétique T , l'énergie potentielle de gravitation P et tous les termes de l'énergie interne U (notamment l'énergie potentielle de déformation, l'énergie thermique, l'énergie chimique, l'énergie électromagnétique) :

$$H = T + P + U$$

Cette grandeur énergétique conservative doit être complétée dans le cas de systèmes réels pour tenir compte des sources de dissipation d'énergie. Parmi ces sources, il y a tous les termes classiques tels que les pertes Joules et les frottements visqueux qui peuvent être exprimés par des fonctions quadratiques de Rayleigh R [9] mais il y a également des termes plus complexes qui ont été modélisés en utilisant la thermodynamique des processus irréversibles à variables internes grâce à un potentiel de dissipation D .

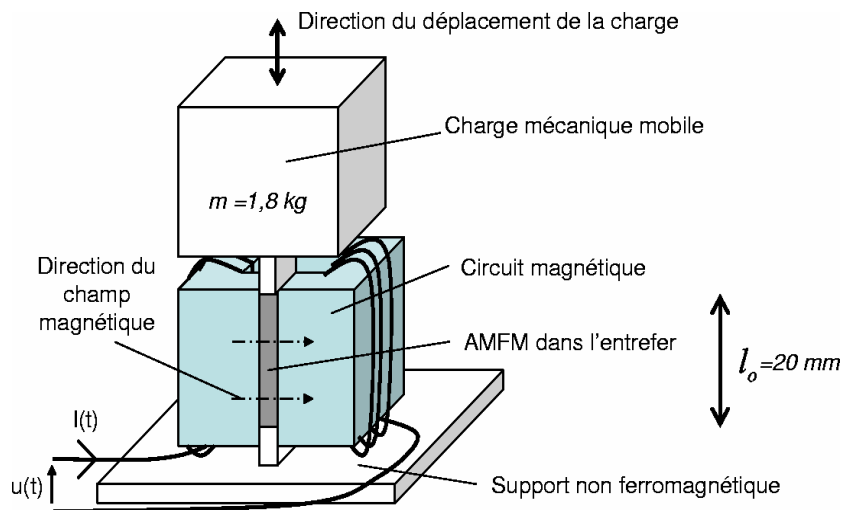


Fig. 3 : Actionneur classique utilisant un AMFM.

L'application du principe de Hamilton permet ensuite d'obtenir toutes les équations dynamiques du mouvement et des champs ainsi que les forces généralisées associées. Tous les termes de couplage thermo-magnéto-mécanique sont donc regroupés dans la définition d'un hamiltonien et des fonctions de dissipation caractérisant les processus irréversibles. L'approche est intéressante et permet d'obtenir la dynamique et la valeur des grandeurs intensives (magnétisation, contraintes, température...). Un exemple de comparaison entre les résultats expérimentaux et issus d'une simulation numérique à partir du modèle est présenté sur la figure 4.

Les principaux résultats issus de l'étude de cet actionneur peuvent être trouvés dans [10] et [11], ils ne seront donc pas détaillés ici où seuls les principaux résultats seront repris. Ces travaux ont mis en évidence un certain nombre de conclusions vérifiées expérimentalement et qui peuvent être utilisées comme des règles de conception pour les réalisations futures.

Parmi les avantages mis en évidence, le temps de réponse apparaît bien de l'ordre de la milliseconde, soit bien inférieur à celui des AMF classiques. Le temps de réponse des AMFM est en grande partie limité par le temps d'établissement des champs magnétiques dans le circuit ferromagnétique. C'est donc principalement le circuit magnétique et son alimentation qu'il est nécessaire d'optimiser si les temps de réponse doivent encore être réduits. Cette démarche relève alors du domaine de l'électrotechnique classique. Notons également que pour certaines de nos applications potentielles, c'est plutôt la dynamique mécanique de la charge à entraîner qui ralentit le système complet plutôt que le comportement du matériau et la création du champ magnétique.

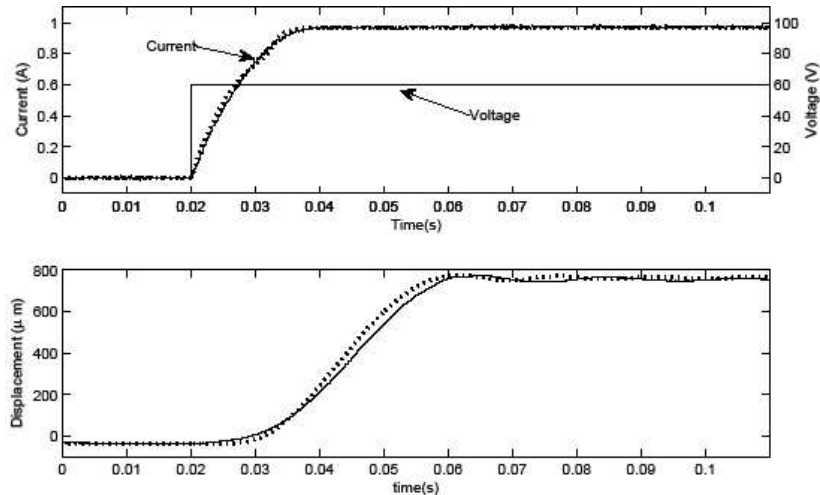


Fig. 4 : Dynamique d'un dispositif utilisant un AMFM (pointillés : simulations, traits pleins : mesures).

Un autre avantage des AMFM est leurs déformations importantes comparées aux autres matériaux actifs (piézo-électrique $\approx 0.5\%$, Terfenol D $\approx 0.2\%$). Les valeurs calculées théoriquement sont proches des valeurs expérimentales de 6 à 10% pour un réarrangement martensitique et de 4% pour une transformation de phase austénite/martensite. Cependant, un fort hystérésis magnéto-mécanique (cf. Fig. 5) complique énormément la tâche de contrôle de l'actionneur. Ce comportement est assez bien rendu par le modèle thermodynamique à variables internes que nous avons développé. Si cet hystérésis est comparable à celui des AMF classiques, il est en revanche bien supérieur à celui des autres matériaux actifs et notamment celui des matériaux piézo-électriques, c'est pourquoi il nécessite la mise en œuvre de stratégies de commande complexes qui freinent l'émergence d'applications pratiques concurrentielles.

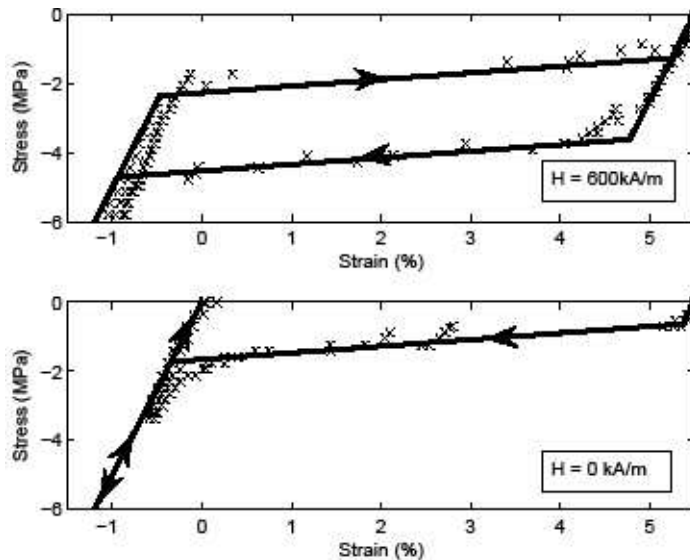


Fig. 5 : Courbe contrainte-déformation en fonction du champ magnétique appliqué dans un AMFM (croix : mesures, traits pleins : modélisation).

Nous pouvons également noter la présence d'un fort couplage des phénomènes thermiques avec la conversion d'énergie magnéto-mécanique notamment parce que l'AMFM possède également les propriétés des AMF classiques et que la magnétisation du matériau est fonction de la température. Ainsi, des problèmes d'échauffement notamment liés aux pertes Joules des bobinages du circuit magnétique peuvent élever la température de l'AMFM au delà de la température de changement de phase, ce qui annule le processus de conversion d'énergie par réorientation martensitique. De même, il faut noter qu'il n'y a pour l'instant aucun intérêt à utiliser l'AMFM en mode de conversion d'énergie par transformation de phase (fonctionnement des AMF classiques) puisque d'autres matériaux et notamment le NiTi ont des propriétés bien plus intéressantes dans ce mode de conversion. En effet, le NiTi n'a pas besoin d'être monocristallin et est donc bien moins fragile, bien moins cher et beaucoup

plus facile à mettre en œuvre.

Les variations de paramètres magnétiques et notamment la variation de réluctance en fonction du réarrangement martensitique offre la possibilité d'un fonctionnement en capteur qui a été proposé par les auteurs dans [12] ainsi que par Suorsa et al. dans [13].

APPLICATION A LA CONCEPTION D'ACTIONNEURS

Réflexion sur les règles de conception

L'étude du prototype simple a mis en évidence un certain nombre d'avantages et de défauts qui doivent être judicieusement exploités pour pouvoir concevoir des dispositifs à base d'AMFM concurrentiels ou tout du moins complémentaires des dispositifs utilisant d'autres matériaux actifs.

En premier lieu, il est évident que l'AMFM n'est pas concurrentiel pour des applications où d'autres matériaux sont bien implantés. En particulier sur des positionnements précis et de très faibles amplitudes, le choix de matériaux piézo-électriques est beaucoup plus pertinent (par exemple les tubes de microscope à force atomique). De même, pour des applications micro et macroscopiques nécessitant très peu de dynamique, les AMF classiques ou les actionneurs thermiques sont plus performants (manchons de raccordement de durites d'aviation, joints d'étanchéité, bilames thermiques). Le champ applicatif des AMFM ne peut a priori se trouver que sur des *niches* où leurs qualités peuvent être exploitées et leurs défauts *masqués*.

Par exemple, la présence d'un fort hystérésis peut-être utilement exploitée pour conserver une position stable à excitation ou alimentation nulle. Ceci permet une consommation réduite d'énergie pour des applications embarquées de type spatial ou micro. Cependant dans ce cas, il est nécessaire de supprimer le retour en position par précontrainte mécanique (création d'un offset dans la courbe de comportement) sans pour autant supprimer la capacité d'actionnement bidirectionnel. Ceci peut-être fait de manière similaire à ce qui est fait en électronique pour les amplificateurs (passage de la classe A à la classe B) en utilisant un fonctionnement en *push-pull* à l'aide de deux actionneurs simples fonctionnant en antagonisme. Cette configuration a été testée avec succès par les auteurs (cf. Fig. 6) et toutes les caractéristiques dynamiques de ce prototype seront présentées prochainement.

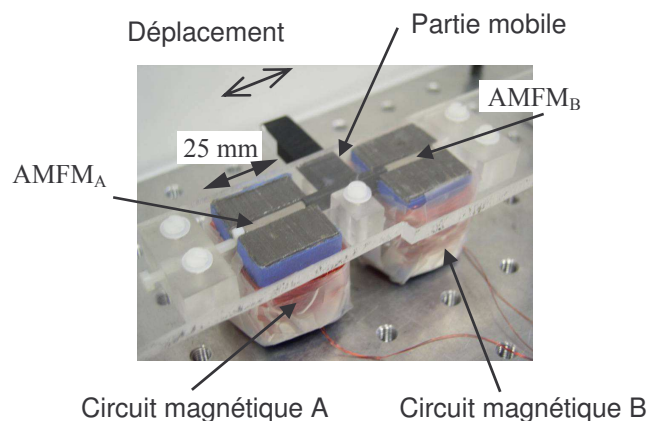


Fig. 6 : Prototype de l'actionneur push-pull.

Règles d'alimentation et de contrôle

Un autre défaut important des dispositifs à base d'AMFM est un rendement plus que médiocre. Cela est déjà le cas pour les AMF classiques mais ce défaut est encore amplifié par la nécessité de créer des champs magnétiques élevés dans des entrefers relativement importants (autour de 1 Tesla) ce qui requiert des courants élevés et donc des pertes Joules importantes dans les conducteurs des circuits bobinés. De plus, par conduction thermique, ces pertes Joules induisent une élévation de température du dispositif complet, ce qui réduit encore les performances de la conversion d'énergie par réorientation des variantes de martensite [14]. La meilleure réponse que nous avons trouvée à ce problème a été d'utiliser une commande par impulsions de courant en association avec le comportement multistable de l'actionneur. Ce type d'alimentation permet de réduire considérablement le temps moyen d'alimentation des bobinages et donc d'augmenter d'autant

les performances du dispositif à base d'AMFM.

Les propriétés particulières de ces matériaux nécessitent le développement de stratégies de contrôle adaptées. A l'heure actuelle, nous avons exploité certaines propriétés dynamiques résultant de l'hystérésis afin d'augmenter la course de notre actionneur en faisant appel à une commande hybride innovante. Celle-ci utilise des retours en arrière et des prises d'élan assez similaires aux techniques utilisées dans les pendules inversés pour les amener dans le 1/2 plan supérieur [15]. Le détail de cette technique de contrôle sera présenté prochainement dans [16].

La modélisation actuelle en termes de grandeurs énergétiques et de formulations variationnelles a également été adoptée car elle présente l'avantage d'être compatible avec des techniques de contrôle non-linéaires très récentes. Ces techniques au rang desquelles figurent les commandes par *energy shaping* [17], *Lyapunov based control* [18] et *passivity based control* [19], sont très prometteuses et méritent qu'on y porte une grande attention. C'est la direction que nous privilégions actuellement pour développer des lois de contrôle performantes et bien adaptées aux caractéristiques des AMFM.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article permet de faire une rapide synthèse des possibilités ouvertes par les AMFM pour la conception d'actionneurs. Le développement de modèles réalistes nous a permis de comprendre les caractéristiques et le comportement dynamique de ces matériaux, ses avantages et ses principaux défauts. Celles-ci sont regroupées dans le tableau suivant avec les solutions et les configurations de fonctionnement qui ont été proposées :

Avantages à exploiter	Défauts à masquer	configuration de fonctionnement préconisée
- Multistabilité	- Hystérésis - Nécessité d'une précontrainte	Fonctionnement en push-pull
- Rapidité - Multistabilité	- Champ magnétique à créer important - Sensibilité à la température	Alimentation par impulsions
- Magnétisation fonction du déplacement	- Couplage des AMFM A et B - Influence de la saturation magnétique	Utilisation de l'auto-détection (<i>self-sensing</i>) en push-pull
- Rapidité - Déformation de 6 à 10 %	- Contrainte de blocage de 2 à 3 MPa	A réserver aux applications dont les performances se situent entre les AMF et les matériaux piézo-électriques
- Rapidité - Hystérésis important	- Course trop faible - Sensibilité à la température	Commande hybride proposée dans l'article

A partir de ces travaux, des règles de conception et de commande ont été proposées ainsi que les champs d'application où il est pertinent d'utiliser un AMFM en remplacement ou en complément des autres matériaux actifs existants. Actuellement, un travail important reste nécessaire pour le développement de systèmes de contrôle plus performants et d'actionneurs viables industriellement. Des techniques de commande énergétiques sont à l'étude et devraient permettre de proposer des lois de contrôle bien adaptées au comportement particulier et complexe des AMFM.

REFERENCES

- [1] Ullakko, K., Magnetically Controlled Shape Memory Alloys: A new Class of Actuators Materials. *Journal of materials Engineering and Performance*, Vol. 5 (3), pp 405-409, (1996).
- [2] James, R. D., Wuttig, M., *Phil. Mag. A*, Vol 77, No. 5, pp. 1273 – 1299, (1998).
- [3] I. Suorsa, J. Tellinen, E. Pagounis, I. Aaltio and K. Ullakko, Applications of magnetic shape memory actuators, *8th international conference ACTUATOR, Bremen, Germany* (2002).

- [4] J. Tellinen, I. Suorsa, A. Jääskeläinen, I. Aaltio and K. Ullakko, Basic properties of magnetic shape memory, *8th international conference ACTUATOR, Bremen, Germany* (2002).
- [5] M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka, T. Takagi, A novel actuation mechanism on the basis of ferromagnetic SMA thin films, *Sensors and Actuators A*, Vol. 114, 445-450 (2004).
- [6] F. X. Wang, W. J. Li, Q. X. Zhang, X. J. Wu and C. Ge, Design and control of linear actuators made by magnetically controlled shape memory alloy, *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Mechatronics, Taipei, Taiwan* (2005).
- [7] H.H. Gatzert, M. Hahn and K. Ullakko, Characterization of magnetic shape memory (MSM) material and its application in a hybrid micro actuator, *ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany* (2006).
- [8] J. Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, C. LExcellent and N. Chaillet, Multistable actuator based on magnetic shape memory alloy, *ACTUATOR 2006, 10th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany* (2006).
- [9] H. Goldstein, *Classical Mechanics*, Addison-Wesley series in physics (1980).
- [10] J. Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie and N. Chaillet, Modeling Rearrangement Process of Martensite Platelets in a Magnetic Shape Memory Alloy Ni₂MnGa Single Crystal under Magnetic Field and (or) Stress Action, *Journal of intelligent Material Systems and Structures*, vol. 18 (3), 289-299 (2007).
- [11] J. Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent, Non-linear Hamiltonian modelling of Magnetic Shape Memory Alloy based actuators, *Sensors and Actuators A* (soumis).
- [12] J. Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent, MSMA based actuators for micro-robotic devices : modelling, design and self sensing potentials, *Workshop on Magnetic Shape Memory Alloy, Ascona, Switzerland* (2005).
- [13] I. Suorsa, E. Pagounis and K. Ullakko, Position dependent inductance based on magnetic shape memory materials, *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, 136-141 (2005).
- [14] J. Y. Gauthier, C. LExcellent, A. Hubert, J. Abadie and N. Chaillet, Magneto-thermo-mechanical modeling of Magnetic Shape Memory Alloy Ni-Mn-Ga single crystal, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (soumis).
- [15] K. J. Aström and K. Furuta, Swinging up a pendulum by energy control, *Automatica*, Vol. 36(2), 287-295 (2000).
- [16] J. Y. Gauthier, A. Hubert, J. Abadie, N. Chaillet and C. LExcellent, Original hybrid control for robotic structures using Magnetic Shape Memory Alloys actuators, *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), San Diego, CA, USA* (2007).
- [17] A. Astolfi, A. J. V. der Schaft (Eds.), *Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control, Special Issue of European Journal of Control*, Volume 10, Number 5, Hermes (2004).
- [18] R. Sepulchre, M. Jankovic, P. Kokotovic, *Constructive Nonlinear Control*, Springer-Verlag (1997).
- [19] R. Ortega, A. Loria, P. J. Nicklasson, H.S. Ramirez, *Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems*, Springer-Verlag (1998).