

Microgénérateurs Electriques Thermo-Magnéto-Mécaniques utilisant des Alliages à Mémoire MultiPhysique

Contexte

La prolifération des dispositifs électroniques nomades et des capteurs et réseaux de capteurs sans fil a levé un enjeu important concernant leur alimentation électrique. Ce défi est d'autant plus important pour les systèmes dans des environnements inaccessibles et/ou relativement sévères, où les batteries typiquement utilisées présentent des performances fortement dégradées (courant de décharge) et ne peuvent être facilement remplacées.

Au cours de la dernière décennie, le principe d'utiliser les sources d'énergie directement disponibles dans l'environnement du dispositif converties sous forme électrique a émergé pour donner naissance au concept de « **récupération d'énergie** » ([1], [2]). Plus particulièrement, la **source thermique** est particulièrement intéressante à considérer car disponible dans de nombreux environnements. Malheureusement, les dispositifs classiques, basés sur des éléments thermoélectriques, sont très peu efficaces du fait de leur conductivité thermique élevée, conduisant à des capacités de conversion d'énergie faibles. Récemment, l'utilisation de **matériaux à transition de phase** a permis de mettre en évidence, de manière préliminaire, la possibilité de disposer de micromoteurs thermiques (« heat engines ») capable de transformer un flux de chaleur constant en vibrations, permettant de mieux convertir l'énergie thermique sous forme électrique, en passant par le domaine mécanique ([4], [5], [6], [7]), ouvrant la voie à une possible rupture scientifique et technologique pour la conversion de gradients thermiques sous forme électrique.

Objectifs de la thèse

L'objectif général de cette thèse de doctorat en science de l'ingénieur consiste en la **conception d'un microgénérateur d'énergie électrique à partir d'une source thermique** utilisant des **transitions de phase** dans des matériaux dédiés. L'originalité de l'approche se décline en trois axes :

1. Une utilisation de **transitions de phase multiphysiques** (mécanique et magnétique, conduisant au concept d'AMMP – « **Alliages à Mémoire MultiPhysique** ») pour améliorer les performances de microgénérateurs basés sur des **micromoteurs thermiques** (amélioration de l'énergie entrant dans le dispositif).
2. Une utilisation de **plusieurs effets de conversion d'énergie** (piézoélectrique, pyroélectrique, électromagnétique) et développement de l'**interface électrique d'extraction multisource** associée (augmentation des capacités de conversion).
3. **Analyse des chemins et transferts énergétique** pour assurer la meilleure concertation des différentes sources d'énergie vers les matériaux de conversion associés (optimisation globale).

Cette thèse s'inscrit dans la forte coopération franco-japonaise entre l'UdL/INSA-Lyon/ECL et l'université de Tohoku au Japon en incluant également l'université KIT en Allemagne, dans le cadre du projet MISTRAL.

Mots-clefs

Conversion d'énergie électrique, récupération d'énergie, ferromagnétisme, alliage à mémoire de forme.

Démarche scientifique

Pour développer les axes scientifiques précédemment exposés, la thèse s'appuiera sur :

- **L'adaptation du dispositif existant** : dans une précédente collaboration les laboratoires FRIS de Tohoku et IMT de KIT ont développé un micromoteur thermique permettant de faire vibrer une poutre à haute fréquence à partir d'un gradient thermique (Figure 1 - [6]). L'objectif sera alors de développer plus en avant cette structure par l'**inclusion d'autres effets de conversion** (piézoélectrique et/ou pyroélectrique par exemple) afin de rendre le maximum de parties du dispositif électroactif. Cette partie soulèvera également la problématique de **récupération d'énergie multi-effets**, pour laquelle une interface électronique dédiée ([12], [13], [14]) sera développée.

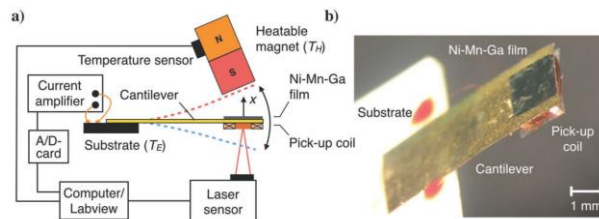


Figure 1. Micromoteur actuel ([6]).

- **Développement d'un nouveau dispositif** : toujours dans l'optique d'un dispositif incorporant au maximum des éléments électroactifs, un nouveau dispositif tirant directement partie de l'**aspect multiphysique des AMMP** sera envisagé, par exemple en utilisant ces matériaux sous la forme d'une bobine jouant le rôle d'un ressort, qui pourra également convertir par effet de Lenz l'énergie par couplage électromagnétique. Cette conception sera précédée par une **phase de caractérisation** du ressort à couplage multiphysique, en considérant l'effet thermomécanique, thermomagnétique et enfin hybride thermo-magnéto-mécanique.

Contributions originales attendues

L'aspect novateur du projet permettra de poser les bases de **matériaux à mémoire multiphysique**, combinant ainsi plusieurs disciplines, avec des retombées au sein de la communauté permettant d'étendre l'application de ces matériaux à d'autres domaines que la récupération d'énergie.

Sur ce dernier point, l'**analyse fine et la maîtrise des flux d'énergie** apporteront à la communauté des méthodes et résultats de première importance afin de dimensionner et comparer des systèmes similaires à ceux envisagés dans le cadre de la thèse. L'aspect multiphysique, couplant jusqu'à quatre domaines de la physique (mécanique, thermique, magnétique et électrique) va au-delà des couplages généralement considérés pouvant conduire à des leçons enrichissantes sur les compromis de fonctionnement optimaux.

La compréhension précise du fonctionnement du micromoteur permettra également de comprendre les mécanismes permettant de transformer une **source (thermique) continue en une source (vibratoire) dynamique**. Les concepts identifiés pourront probablement être étendus à d'autre type de conversion DC-AC multiphysique ou au sein d'un seul domaine.

Finalement, d'un point de vue pragmatique, les retombées du projet se manifesteront en une **technologie alternative remplaçant avantageusement les éléments thermoélectriques** (ces derniers étant notamment limités par leur forte conduction thermique) pour alimenter de petits dispositifs électronique à partir de gradients thermiques.

Profil du candidat recherché

L'aspect **multiphysique et pluridisciplinaire** du projet demandera un profil sensible aux phénomènes couplés et aux aspects énergétiques. Une bonne connaissance du **génie électrique** au sens large et des dispositifs électroniques en particulier sera nécessaire pour le bon déroulement du doctorat. Des **bases de mécanique et de thermique** ainsi que des notions en élaboration de matériaux seront un atout indéniable dans le processus de sélection. Des candidatures montrant un Master en Génie Electrique ou en Energétique (liste non exhaustive) seront donc particulièrement appréciées. Enfin, le candidat devra montrer des **capacités de modélisation**, ainsi que des compétences particulières en termes d'**expérimentation**.

Le projet s'inscrivant dans une collaboration internationale tripartite, la **maîtrise de l'anglais** est obligatoire ainsi que des capacités d'intégration et de communication de premier plan.

Compétences qui seront développées au cours du doctorat et Perspectives professionnelles après le doctorat

La compétence principale visée par le doctorat sera de développer une **sensibilité et une connaissance approfondie des interfaces entre différents domaines de la physique**, et notamment les différentes interactions et échanges (notamment conversion d'énergie) d'un domaine à l'autre. Le candidat développera en parallèle des connaissances et compétences dans la **conception et analyse de systèmes globaux**, tout en acquérant de solides aptitudes dans chacun des domaines concernés par ces systèmes (électricité, électromagnétisme, thermique, mécanique).

La **sensibilité multiphysique** développée dans le cadre du doctorat permettra au candidat, à l'issue de sa thèse, d'offrir un profil à l'éventail très large, capable d'**appréhender un système complexe dans son ensemble tout en ayant les capacités d'approfondir les différentes parties** constituant ce système. Cette sensibilité multiphysique étant très appréciée dans le milieu académique mais aussi industriel, cela permettra au doctorant d'avoir un profil attractif quelle que soit sa volonté.

Financement

La thèse sera potentiellement financée par une bourse ministérielle de l'INSA de Lyon ; cette **possibilité de financement dépendant fortement de la qualité du candidat** (audition de la part de l'Ecole Doctorale EEA).

Dossier de candidature

Le dossier de candidature **complet** (CV, lettre de motivation, copie du diplôme, relevés de notes, éventuelle(s) lettre(s) de recommandation) est à faire parvenir à mickael.lallart@insa-lyon.fr.

Seules les candidatures en lien avec le sujet seront considérées.

Références bibliographiques sur le sujet de thèse

- [1] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi and A. M. Sastry, *Powering MEMS portable devices: a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems*, Smart Mater. Struct. 17 (2008) 043001.
- [2] K. V. Selvan and M. S. M. Ali, *Micro-scale energy harvesting devices: review of methodological performances in the last decade*, Renew. Sustain. Energy Rev. 54 (2016) 1035-47.
- [3] G. Sebald, D. Guyomar and A. Agbossou, *On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting*, Smart Mater. Struct. 18 (2009) 125006
- [4] M. Ujihara, G. P. Carman and D. G. Lee, *Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials*, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 093508.
- [5] M. Gueltig, H. Ossmer, M. Ohtsuka, **H. Miki**, K. Tsuchiya, **T. Takagi** and **M. Kohl**, *High frequency thermal energy harvesting using magnetic shape memory films*, Adv. Ener. Mater. 4 (2014) 751-758.
- [6] M. Gueltig, F. Wendler, H. Ossmer, M. Ohtsuka, **H. Miki**, **T. Takagi**, **M. Kohl**, *High-Performance Thermomagnetic Generators Based on Heusler Alloy Films*, Adv. Energy Mater. (2016) 1601879.
- [7] **M. Kohl**, **H. Miki**, **M. Lallart**, M. Gueltig, M. Ohtsuka, *Miniature-Scale Energy Generation by Magnetic Shape Memory Alloys - ELyT Global Project MISTRAL – Materials and structure design Simulation and modeling*, ELyT Workshop 2018, March 6-8, 2018 La Gentilhommière, Satillieu, France.
- [8] **M. Lallart**, L. Wang, G. Sebald, L. Petit and D. Guyomar, *Analysis of thermal energy harvesting using ferromagnetic materials*, Phys. Lett. A. 378 (2014) 3151-3154.
- [9] M. Matsumoto, M. Ohtsuka, **H. Miki** and **T. Takagi**, *Progress of ferromagnetic shape memory alloy research*, J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech. 8 (2000) 445-453.
- [10] Y. Sutou, Y. Imano, N. Koeda, T. Omori, R. Kainuma, K. Ishida and K. Oikawa, *Magnetic and martensitic transformations of NiMnX(X=In,Sn,Sb) ferromagnetic shape memory alloys*, Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 4358-4360.
- [11] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito, Y. Sutou, H. Morito, S. Okamoto, O. Kitakami, K. Oikawa, A. Fujita, T. Kanomata, K. Ishida, *Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation*, Nature 439 (2006) 957-960.
- [12] D. Guyomar, G. Sébald, S. Pruvost, **M. Lallart**, A. Khodayari and C. Richard, *Energy Harvesting From Ambient Vibrations and Heat*, J. Intel. Mat. Syst. Struct. 20 (2009) 609-624.
- [13] **M. Lallart**, *Nonlinear Technique and Self-powered Circuit for Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Under Unloaded Cases*, Energy Conv. Mag. 133 (2017) 444-457.
- [14] **M. Lallart**, W.-J. Wu, Y. Hsieh and L. Yan, *Synchronous Inversion and Charge Extraction (SICE): a Hybrid Switching Interface for Efficient Vibrational Energy Harvesting*, Smart Mater. Struct. 26 (2017) 115012.