



HAL
open science

Système de récupération d'énergie thermique à base de matériaux magnéto-caloriques

Smail Ahmim, Morgan Almanza, Alexandre Pasko, Frédéric Mazaleyrat,
Martino Lobue

► **To cite this version:**

Smail Ahmim, Morgan Almanza, Alexandre Pasko, Frédéric Mazaleyrat, Martino Lobue. Système de récupération d'énergie thermique à base de matériaux magnéto-caloriques. SGE 2018 3ème édition du Symposium de Génie Electrique,, Jul 2018, Nancy, France. hal-02087120v1

HAL Id: hal-02087120

<https://hal.science/hal-02087120v1>

Submitted on 1 Apr 2019 (v1), last revised 28 Oct 2020 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Système de récupération d'énergie thermique à base de matériaux magnéto-caloriques

Smail AHMIM¹, Morgan ALMANZA¹, Alexandre PASKO¹, Frédéric MAZALEYRAT¹, Martino LOBUE¹

¹SATIE, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France

RESUME – Les générateurs thermomagnétiques convertissent le flux de chaleur en énergie électrique. Le matériau magnéto-calorique (MMC) réalise un cycle thermodynamique entre deux sources de chaleur ce qui produit une variation d'aimantation du matériau. Cette énergie (variation d'aimantation) est ensuite transformée en énergie mécanique via les forces magnétiques et enfin en énergie électrique via un transducteur électromécanique. Le dimensionnement du cantilever permettant l'auto-oscillation du MMC entre les deux sources de chaleur nous a permis de déduire la vitesse au cours des déplacements. Ainsi à partir du modèle où le transducteur est découplé de la partie mécanique, nous avons à l'aide de simulation par éléments finis estimé l'aptitude d'un transducteur piézoélectriques (PZT 5a) et de bobines à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le système à base de piézoélectriques et de bobines récupèrent seulement 0,025 % et 0,018% respectivement de l'énergie mécanique disponible (116 mJ/cm³). Finalement quelques pistes seront soulevées pour expliquer les faibles valeurs obtenues et les stratégies possibles pour y remédier

Mots-clés—*Matériaux*

Magnéto-calorique, Thermomagnétique, Récupération d'énergie thermique, Energie.

1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le nombre de systèmes connectés est en augmentation constante. Certains de ces systèmes sont autonomes, souvent de petites tailles (mm à cm), ayant besoin de source d'énergie. L'omniprésence de source de chaleur de bas niveau (petites différences de température, de l'ordre de dizaine de degrés au plus) rend les systèmes de récupération d'énergie thermique, des bons candidats pour alimenter ces dispositifs autonomes. Encore, faut-il obtenir les puissances requises afin d'alimenter ces systèmes.

Il a été montré que les générateurs thermoélectriques peuvent produire assez de puissance pour alimenter un micro-système (10 μ W), et ceci avec de faibles écarts de températures [1]. Le développement de nouvelles générations de matériaux magnéto-caloriques (MMC) pour des applications de réfrigération donne un renouveau aux systèmes de récupération d'énergie thermique en utilisant ces matériaux. Dans les applications de réfrigération, on utilise l'effet magnéto-calorique c'est à dire le changement des propriétés thermiques des matériaux (i.e. température, entropie) associé à l'application d'un champ magnétique. L'effet étant réversible, les propriétés thermiques retournent à

leurs valeurs initiales lors de la désaimantation. Les générateurs thermomagnétiques, utilisent l'effet pyromagnétique c'est-à-dire la variation d'aimantation en fonction de la température. On réalise ainsi des cycles thermodynamiques pour convertir la variation de température en variation d'aimantation. Cette variation est ensuite convertie en énergie mécanique et enfin en énergie électrique.

D'ailleurs plusieurs prototypes de thermo-génération en utilisant les MMC ont été réalisés [2,3]. Ujihara, M., G. P. Carman, et D. G. Lee [2], qui ont réalisé un générateur thermomagnétique avec une densité de puissance estimée entre 1,85 et 3,61 mW/cm² pour une différence de température entre la source froide et chaude nommée, $\Delta T_{res}=50$ K. Gueltig Marcel et al. [3] Sont arrivés à réaliser un générateur avec une densité 122 mW/cm³ pour un $\Delta T_{res}=140$ K. De notre part [4], on a montré que pour un écart de température ΔT_{res} de 3 K entre la source chaude (T_{ch}) et la source froide (T_f), un générateur magnéto-calorique peut produire 10 mW pour 1 cm³ de MMC.

Ujihara et al. [2] ont étudié la première chaîne de conversion thermique-mécanique. A. Rendon et al. [5], quant à eux, ont étudié la deuxième chaîne de conversion mécanique-électrique. Dans ce papier, on se pose le problème de concevoir un système avec une structure d'Halbach et un MMC. On commence par aborder la conversion thermique-mécanique en étudiant le système mécanique (ressort) et ainsi résoudre la question de l'auto-oscillation. Ensuite, on s'attardera sur la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, en utilisant deux différentes approches, à savoir, les bobines et les matériaux piézoélectriques.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET CONVERSION THERMIQUE-MECANIQUE

Le générateur thermomagnétique est composé d'une source chaude, d'une source froide et d'un MMC suspendu sur un ressort (cf. Figure 1). Le MMC se déplace entre les deux sources chaude et froide.

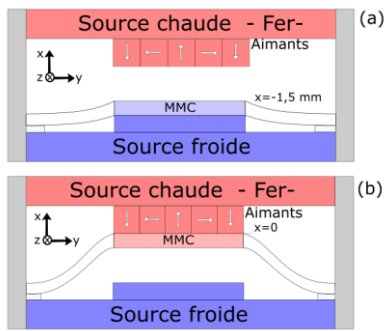


Figure 1 : Générateur thermomagnétique, (a) le MMC est en contact avec la source froide, (b) le MMC est en contact avec la source chaude.

La source du champ magnétique est placée au niveau de la source chaude. Elle est réalisée à l'aide d'une structure d'Halbach plane (cf. Figure 1). Cette structure est constituée à partir d'un assemblage d'aimants en NdFeB aimantés suivant l'épaisseur. Chaque aimant est un parallélépipède de 3 mm x 3 mm x 10 mm. La structure d'Halbach permet de confiner le champ sous la source chaude. Ainsi lorsque le MMC est en contact avec la source chaude, le champ d'induction appliqué atteint 1 T. Lorsque le MMC est en contact avec la source froide le champ appliqué est de 0,1T.

Le MMC ($\text{La}(\text{Fe}_2\text{Si})_{13}\text{H}$) de 6 mm de largeur, 1 mm d'épaisseur et 10 mm de profondeur, est posé sur un matériau déformable, qui joue le rôle d'un ressort. Les ressorts doivent permettre de contre balancer la force magnétique produite par la source de champ permettant ainsi le démarrage (auto-oscillation) de la structure. Le coefficient de raideur ainsi que la position au repos du ressort sont respectivement notés k et x_0 .

Le thermogénérateur réalise un cycle en quatre étapes, comportant deux adiabatiques et deux iso-champs (cycle de Brayton magnétique).

- Etape 1 : Le MMC est en contact avec la source froide (cf. Figure 1 (a)), il est ferromagnétique. Les forces magnétiques sont légèrement plus importantes que la force de rappel du ressort (cf. Etape 1. Figure 2), le MMC est attiré par les aimants vers la source chaude. Pendant son déplacement le MMC est aimanté et sa température augmente (cf. Figure 3). Le déplacement est suffisamment rapide pour parler d'aimantation adiabatique.
- Etape 2 : Le MMC est en contact avec la source chaude (cf. Figure 1 (b)), sa température augmente jusqu'à atteindre celle de la source chaude, ce qui provoque la diminution de l'aimantation (cf. Figure 3). En conséquence, Les forces magnétiques appliquées diminuent (cf. Figure 2). Le MMC reçoit un flux thermique de la source chaude à champ magnétique appliqué constant (cf. Figure 3), on parle d'échange iso champ.
- Etape 3 : Le MMC est toujours en contact avec la source chaude, il est paramagnétique. La force de rappel du ressort est alors légèrement plus importante que les forces magnétiques (cf. Etape 3. Figure 2), le MMC se déplace vers la source froide et perd quelque degrés (cf. Figure 3). Le déplacement est suffisamment rapide pour parler de désaimantation adiabatique.

- Etape 4 : Une fois que le MMC est en contact avec la source froide (cf. Figure 1 (a)). Il se refroidit jusqu'à atteindre la température de la source froide, en conséquence, son aimantation augmente (cf. Etape 4. Figure 3). Le MMC cède un flux thermique vers la source froide à champ magnétique constant (cf. Etape 4. Figure 3), on parle d'échange iso champ.

La figure 2 représente la variation de l'aimantation en fonction du champ appliqué pour différentes températures variant de 292 K à 302 K, le cycle réel est représenté par des lignes continues. Dans nos calculs on néglige les variations d'aimantation associées à la variation de température adiabatique $\Delta T_{\text{adiabatique}}$ (étapes 1 et 3). Cette approximation correspond au cycle représenté en pointillés sur la figure 2. La figure 3, représente les forces magnétiques (F_{mag}) à $T=292$ K et 302 K ainsi que la force de rappel du ressort (F_r).

Pour obtenir l'auto-oscillation du système, il faut réunir les conditions suivantes : Pour passer de l'étape 4 à l'étape 1 (cf. Figure 2), on doit avoir une température telle que $F_{\text{mag}} > F_r$ lorsque le MMC se situe au niveau de la source froide, soit $x=-1,5$ mm dans notre cas. Pour passer de l'étape 2 à l'étape 3 (cf. Figure 2), on doit avoir une température telle que $F_{\text{mag}} < F_r$ lorsque le MMC se situe au niveau de la source chaude, soit $x=0$ mm.

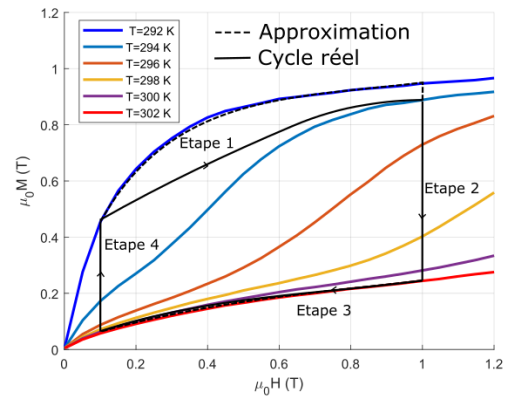


Figure 2 : Cycle thermodynamique du point de vue magnétique. Variation de l'aimantation en fonction du champ appliqué pour $T=292$ K, $T=294$ K, $T=296$ K, $T=298$ K, $T=300$ K et $T=302$ K. Le cycle réel est représenté par les lignes continues et l'approximation utilisée pour les calculs est représentée en pointillés.

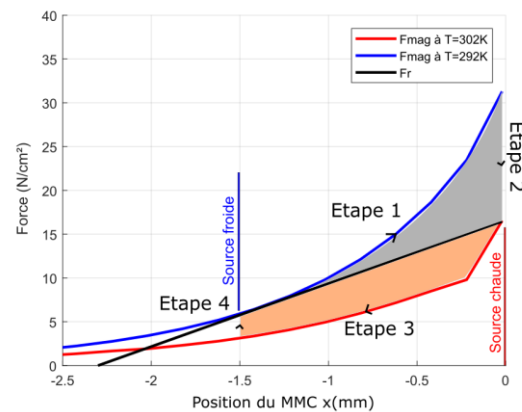


Figure 3 : Cycle thermodynamique du point de vue mécanique. Les forces magnétiques (F_{mag}) à 292 K et 302 K et la force de rappel du ressort (F_r) en fonction de la position du MMC 'x'. Les quatre étapes de fonctionnement sont représentées.

3. PROPRIETES DU RESSORT

Le ressort est la pièce mécanique qui permet au MMC de se remettre en contact avec la source froide et ainsi compléter le cycle. Il doit, donc, être bien dimensionné.

Dans cette étude nous avons fait le choix, de simuler le ressort par une poutre en polypropylène fixée de ses deux extrémités. Le polypropylène est un matériau assez flexible (le module de Young est de 1,38 GPa) qui nous permet d'avoir la flèche et le coefficient de raideur dont nous avons besoin. Une ouverture sous forme de cercle a été faite au milieu de la poutre pour permettre le contact thermique entre le MMC et la source froide. Les caractéristiques de la poutre sont représentées dans le tableau 1. Nous tenons à préciser que ce dimensionnement a été fait pour le système décrit dans la partie 2 avec un MMC dont la perméabilité relative $\mu_r=2$.

Tableau 1 : Caractéristiques de la structure

Paramètre	Valeur	Unité
Longueur L	58,6	mm
Largeur b	26,6	mm
Epaisseur h	1,2	mm
Diamètre de l'ouverture D	8	mm
Limite élastique σ	58	MPa

Une simulation sous ANSYS nous a permis de calculer les forces-déplacements de la poutre et ainsi déterminer le coefficient de raideur de la poutre $k= 5970 \text{ N/m}$.

Pour un déplacement maximal de 3,04 mm, la contrainte équivalente (Von-Mises) que subit la poutre atteint une valeur maximale de 50 MPa ce qui est inférieur à la limite élastique.

Nous pouvons ainsi conclure que la poutre choisie (cf. Figure 4) est bien adaptée à notre application.

4. RECUPERATION DE L'ENERGIE

Pendant les étapes 1 et 3, le MMC accumule de l'énergie cinétique (les aires grise et orange de la Figure 3) qu'un transducteur doit être en mesure de convertir en énergie électrique. L'équation (1) montre que l'énergie magnétique peut être convertie en énergie cinétique ou bien récupérée par le transducteur

$$F_{mag} dx - F_r dx = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) - \delta W_{récupération} \quad (1)$$

avec m la masse du MMC, v sa vitesse et $\delta W_{récupération}$ le travail effectué par des bobines ou des piézoélectriques. Dans notre étude, la récupération d'énergie $W_{récupération}$ est petite devant l'énergie cinétique.

4.1. Estimation de l'énergie mécanique récupérable avec des bobines

En plus de la récupération de l'énergie mécanique, les bobines nous permettent aussi de récupérer l'énergie

magnétique (variation d'aimantation) durant les deux étapes 2 et 4 (cf. Figure 2), mais celle-ci reste faible par rapport à l'énergie mécanique.

La tension induite $u(t)$ de la bobine est donnée par :

$$u(t) = \frac{d\Phi}{dt} = p * v * \int_0^{L_i} \frac{dB}{dx} dl \quad (2)$$

avec p La profondeur, $\frac{d\Phi}{dt}$ La variation temporel du flux, L_i

La longueur des lignes L1, L2, L3 et L4.

La puissance reçue par la charge

$$P_{ch} = \frac{R_{ch}}{(R_{ch}+R_{cu})^2} u(t)^2 \quad (3)$$

avec R_{ch} La résistance de charge, R_{cu} la résistance interne de la bobine, est maximum pour $R_{cu}=R_{ch}$. La puissance totale reçue par la charge

$$P_{chmax} = \frac{u(t)^2}{4R_{cu}} \quad (4)$$

Est donc la moitié de la puissance fournie par le générateur. Cette grandeur dépend du volume de cuivre utilisé (volume du fil conducteur), comme le montre l'équation (6)

$$P_{max} = 2 * P_{chmax} = \frac{u^2}{2R_{cu}} \quad (5)$$

$$P_{max} = \left(\frac{d\Phi}{dt}\right)^2 * \left(\frac{s}{2\rho L}\right) = \left(\frac{d\Phi}{dt}\right)^2 * \left(\frac{V}{2\rho L^2}\right) \quad (6)$$

avec P_{max} La puissance maximale délivrée par une bobine, s La section d'une bobine d'une seule spire, L La longueur d'une seule spire, ρ La résistivité du cuivre et V Le volume du fil conducteur.

Un grand nombre de configurations sont envisageables (cf. Figure 4), sans être exhaustif nous avons tenté de cerner les paramètres importants à partir de quelques configurations simulées mais aussi de déterminer les positions de bobines les plus favorables.

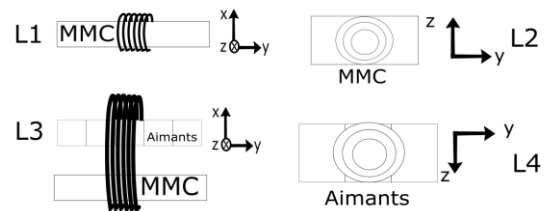


Figure 4 : Différents emplacements de bobines. L1, bobines placées autour du MMC. L2, bobines placées sur le MMC. L3, bobines placées autour de la structure. L4, bobines sont placées sous les aimants.

Par rapport à nos techniques de fabrication l'épaisseur de cuivre est de $70 \mu\text{m}$ avec une section carrée. La longueur varie en fonction de la position de la bobine.

Différent paramètres ont été modifiés afin de comprendre leurs effets, à savoir, la taille des aimants et la perméabilité relative du MMC. Deux différentes tailles des aimants ont été utilisées. Une structure d'Halbach (1) de $3\text{mm} \times 15\text{mm} \times 10\text{mm}$ et une autre appelée (2) de $1\text{mm} \times 15\text{mm} \times 10\text{mm}$. Deux différentes valeurs de perméabilité relatives ont été utilisés : 2 et 200. Les résultats de simulation sont représentés par la

Figure 5. Les densités représentées sont par unités de volume du MMC.

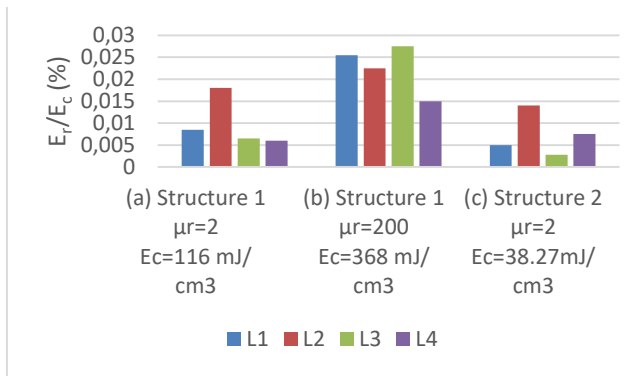


Figure 5 : Les rapports énergies récupérées (E_r)- énergies cinétiques (E_c) des bobines L1, L2, L3 et L4 dans les trois cas : (a) Structure 1 et $\mu_r=2$, (b) Structure 1 et $\mu_r=200$ et (c) Structure 2 et $\mu_r=2$.

Il n'est pas surprenant qu'en augmentant le champ magnétique, soit la masse d'aimant, ou en augmentant la canalisation du champ, soit la perméabilité, nous augmentons l'énergie récupérée. Par contre, les valeurs atteintes restent relativement faibles ce qui peut s'expliquer par un volume du conducteur faible devant les énergies à convertir, compte tenu d'une structure qui n'est pas initialement conçu pour réaliser un actionneur linéaire. Dans notre cas d'étude, à savoir, le système 1 avec $\mu_r=2$, la position de bobine la plus performante reste L2 avec 0,021 mJ/cm³ d'énergie produite.

C'est encore possible d'améliorer l'énergie récupérée en augmentant le volume du cuivre comme le montre l'équation (5). Cependant, on ne peut pas considérer le volume du conducteur comme une variable ajustable sans considérer l'effet que son augmentation aurait sur le comportement thermique du système.

4.2. Estimation de l'énergie mécanique récupérable avec des piézoélectriques

Dans cette partie on étudie le système de récupération de l'énergie en utilisant des matériaux piézoélectriques. Pour cette étude uniquement la structure 1 avec $\mu_r=2$ a été pris en compte.

Dans la perspective de comparer ce modèle à celui utilisant des bobines, un modèle 3-D en éléments finis a été créé sous ANSYS. Quatre patches piézoélectriques ont été collés sur une poutre en polypropylène (cf. Figure 6).

Les matériaux piézoélectriques utilisés sont des PZT 5a [6]. Chaque patch piézoélectrique fait 20mm de largeur, 10mm de longueur et 3mm d'épaisseur.

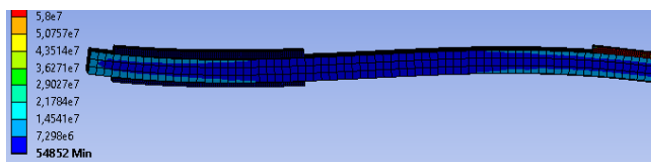


Figure 6 : Le système de récupération d'énergie en flexion. Le système étant symétrique on a représenté uniquement une partie. Les contraintes équivalentes de Von-Mises σ sont représentées. Les contraintes dans les piézoélectriques sont de l'ordre de 50 MPa.

L'énergie produite par un patch piézoélectrique est estimée par la formule suivante [5] :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r L_p b_p}{h_p} V^2 \quad (7)$$

avec V la tension générée, ϵ_r la permittivité relative et h_p l'épaisseur du patch.

V est la tension générée par un patch et est directement déterminée par simulation. Dans notre cas $V=9,3$ V. Comme on a quatre patches :

$$E_{tot} = 2CV^2 = 1,73 \mu J$$

A partir de cette équation on obtient une énergie de 1,73 μJ ce qui correspond à une densité d'énergie de 0,03 mJ par cm³ de MMC. La valeur d'énergie trouvée est du même ordre de grandeur que la valeur qu'on trouve dans [5].

Le système de récupération à l'aide des piézoélectriques dans ce cas est plus performant que la bobine L2.

5. CONCLUSIONS

Dans cette étude nous avons abordé la conversion thermique-mécanique. En respectant les conditions d'auto-oscillations, nous avons dimensionné la pièce maîtresse de cette chaîne de conversion ; le ressort. La conversion mécanique-électrique, quant à elle, a nécessité des modèles de simulations numériques. Dans le cas des bobines, un modèle en éléments finis nous montre que la position optimale est L2 (bobine placée sur le MMC) avec une énergie récupérée de 0,02 mJ/cm³ qui représente 0,018 % de l'énergie mécanique disponible. Toujours en se basant sur les simulations, les matériaux piézoélectriques donnent des ordres de grandeurs similaires, avec une énergie récupérée de 0,03 mJ/cm³ mais qui représente seulement 0,025 % de l'énergie mécanique disponible, ce qui reste faible. Dans le cas des bobines, le $\frac{d\theta}{dt}$ n'est pas très important et soit cela vient du gradient du champ soit de la vitesse. Nous devons aussi augmenter la quantité de cuivre utilisée. Pour les matériaux piézoélectriques, nous présenterons les raisons de ces faibles valeurs d'énergies récupérées en comparaison des énergies disponibles.

6. REFERENCES

- [1] N.S.Hudak and G.G.Amatucci, "Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, no. 10, p. 101301, May 2008.,
- [2] Ujihara, M., G. P. Carman, et D. G. Lee. « Thermal Energy Harvesting Device Using Ferromagnetic Materials ». *Applied Physics Letters* 91, n° 9, 2007.
- [3] M. Gueltig *et al.*, « High-Performance Thermomagnetic Generators Based on Heusler Alloy Films », *Advanced Energy Materials*, vol. 7, n° 5, p. 1601879, mars 2017.
- [4] Morgan Almanza, Alexander Pasko, Frédéric Mazaleyrat, Martino Lobue. First vs second order magnetocaloric material for thermomagnetic energy conversion. *IEEE Transactions on Magnetics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017.
- [5] A. Rendon, S. Basrou, L. Tima, et A. F. Viallet, « Conception et optimisation d'un générateur piézoélectrique à déclenchement thermomagnétique », p. 6.
- [6] <https://bostonpiezooptics.com/ceramic-materials-pzt>.