



**HAL**  
open science

# Récupérateur d'énergie vibratoire utilisant une raideur non-linéaire

Javier Rios Quesada, Cyril Drezet

► **To cite this version:**

Javier Rios Quesada, Cyril Drezet. Récupérateur d'énergie vibratoire utilisant une raideur non-linéaire. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065386

**HAL Id: hal-01065386**

**<https://hal.science/hal-01065386v1>**

Submitted on 18 Sep 2014

**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.

# Récupérateur d'énergie vibratoire utilisant une raideur non-linéaire

Cyril DREZET, Javier RIOS QUESADA

Femto-ST – Moving Magnet Technologies S.A.(MMT)

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre de la récupération d'énergie vibratoire, nous avons étudié l'apport d'une non-linéarité mécanique dans un système de récupération. Nous nous sommes intéressés à un générateur électromagnétique composé d'un ressort magnétique non-linéaire par nature couplé à un générateur monophasé linéaire. L'étude qui a été faite nous a permis de pointer les avantages et les inconvénients de ce type de structures ainsi que de mettre en évidence les paramètres importants pour le calcul du dispositif.

**MOTS-CLÉS** – Récupération d'énergie vibratoire – Aimants permanents – Raideur non-linéaire

## 1. Introduction

La récupération d'énergie (ou « Energy Harvesting ») consiste à exploiter des sources d'énergie de « bas niveau » (échauffements, vibrations...) présentes dans un système pour améliorer son rendement ou pour alimenter des sous-systèmes qui deviennent, au mieux, autonomes.

Parmi toutes les sources d'énergie récupérable, les vibrations mécaniques sont une des plus étudiées et utilisées à l'heure actuelle [1]. De manière générale, les récupérateurs d'énergie vibratoire sont basés sur des systèmes résonants dont la fréquence de travail est réglée sur la fréquence de la source. Ceci implique une analyse poussée de la source vibratoire suivie d'un réglage fin de la fréquence de résonance pour récupérer le maximum d'énergie.

L'extraction de l'énergie mécanique vibratoire se fait alors par le biais de différents phénomènes physiques comme par exemple: la piézoélectricité [2,3] ; l'électromagnétisme [4,5] ; l'électrostatique [6] ; la magnétostriction [7] ; voire un mélange de ces phénomènes [8].

Lors de ce projet, on travaillera avec des récupérateurs électromagnétiques qui sont bien adaptés aux basses fréquences [9]. Nous présenterons d'abord la structure de l'actionneur et la manière d'obtenir une raideur non-linéaire. Ensuite nous présenterons le modèle qui a été fait. Et finalement les résultats des mesures effectuées qui ont permis la validation du modèle.

## 2. Structure d'un récupérateur d'énergie à raideur non linéaire

### 2.1 Raideur non linéaire et ses effets

Une structure utilisant une suspension magnétique à raideur non-linéaire a été proposée par Mann et Sims [10] (cf. Figure 1) et utilisé pour un récupérateur par Zhu et Zu [8], par exemple. Le but principal de la structure proposée est de pouvoir régler la fréquence de travail de manière simple sans être contraint par des tolérances qui renchérissent la fabrication industrielle de ces récupérateurs.

Toutefois, la présence de la non-linéarité permet d'obtenir, dans certaines conditions de fonctionnement, un phénomène de « hardening » dans la caractéristique en fréquence du récupérateur (cf. Figure 1). Ceci implique une possible augmentation de la bande fréquentielle utile du récupérateur avec un décalage vers les hautes fréquences. La présence de la non-linéarité provoque aussi un dédoublement de la caractéristique avec un attracteur haut intéressant pour la récupération d'énergie et un attracteur bas qu'il faudra éviter. Les sauts d'un attracteur vers l'autre se font pour des fréquences différentes qui permettent d'obtenir une hystérésis.

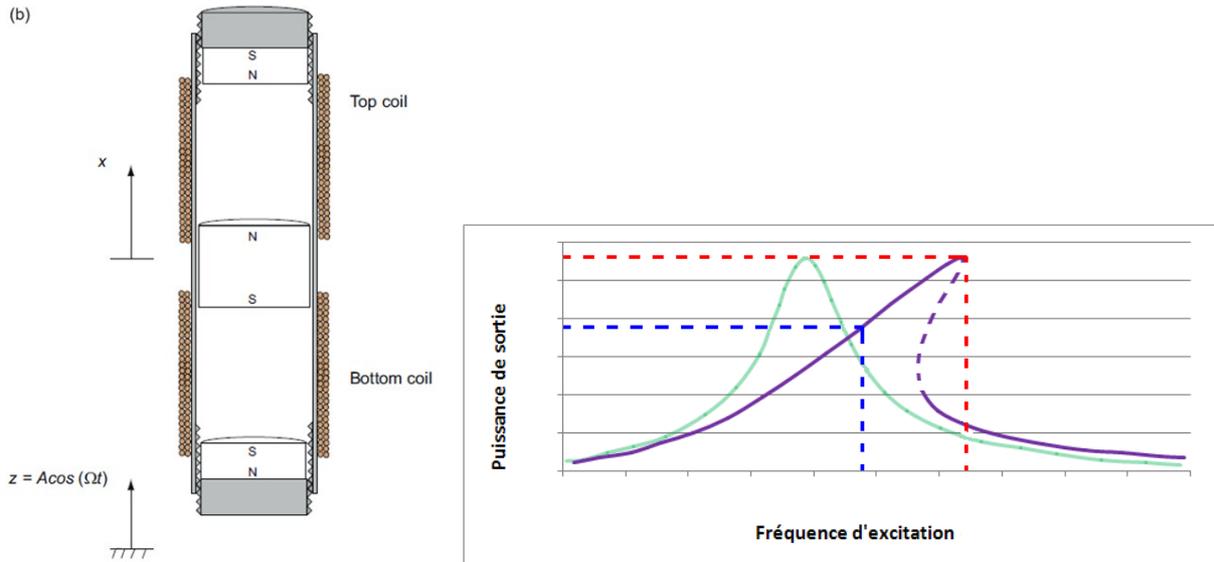


Figure 1 : Récupérateur d'énergie conçu par Mann et Sims [10]

La structure se compose de 2 aimants fixes et un aimant mobile en opposition avec les aimants fixes en lévitation. On obtient ainsi une raideur magnétique non linéaire puisque la force de répulsion augmente fortement lorsque l'aimant mobile se rapproche d'un des aimants fixes. Cette raideur non linéaire peut être approchée sous certaines conditions par un polynôme d'ordre 3.

Toutefois, la variation de flux dans une structure de ce genre n'est pas suffisamment importante pour pouvoir récupérer de l'énergie de manière significative. Ainsi, nous proposons de garder l'idée de la raideur non-linéaire, mais de l'intégrer dans un actionneur qui, lui, présente un coefficient de couplage électromécanique plus important.

## 2.2 Structure proposée par MMT

Nous utilisons donc, comme base de travail, la structure d'un actionneur linéaire monophasé breveté par MMT [11]. Nous plaçons 2 aimants sur la partie mobile en vis-à-vis et en opposition avec 2 aimants fixes (cf. Figure 2)

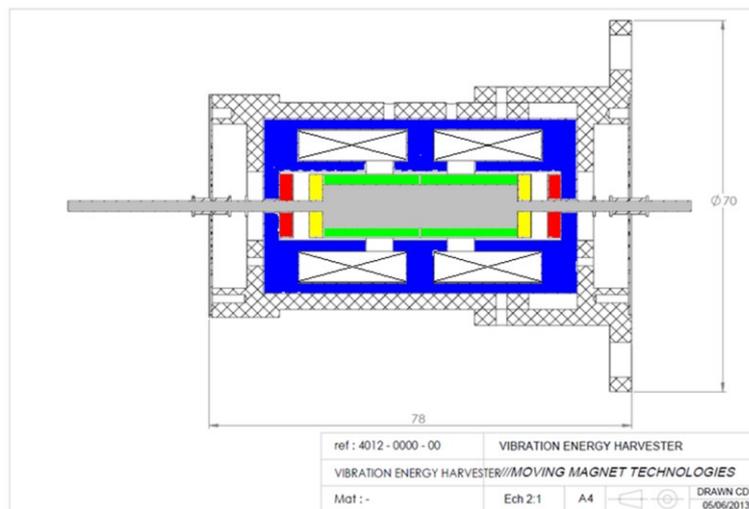


Figure 2 : Structure de récupérateur d'énergie proposée par MMT

Pour réduire les forces de frottement le mobile sera suspendu à l'aide de 2 ressorts plats présentant une raideur axiale faible et une raideur radiale importante pour contrer la force radiale d'attraction des aimants.

## 2.3 Modèle

Dans un premier temps nous considérerons une charge résistive aux bornes du récupérateur. De ce fait, le système présenté sur la Figure 3 peut être décrit par un système d'équations différentielles liées et non linéaires (1).

$$\begin{cases} \ddot{y} + c \dot{y} + k_1 y + k_3 y^3 + \gamma i + mg = m A \cos(\Omega t) \\ L \frac{di}{dt} + (R_L + R_i) i - \alpha \dot{y} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Dans laquelle,  $y$  correspond à la position du mobile,  $c$  au coefficient de frottement visqueux,  $k_1$  et  $k_3$  aux raideurs linéaire et non linéaire,  $\gamma$ , le coefficient de couplage électromécanique,  $i$  le courant dans les bobinages,  $m$  la masse du mobile,  $A$  le module de l'accélération des vibrations de pulsation  $\Omega$ .  $L$  l'inductance de l'actionneur,  $R_i$  la résistance de l'actionneur et  $R_L$  la résistance de charge.

Du fait de cette non-linéarité et des contraintes imposées par les hypothèses d'une résolution analytique par la méthode des échelles multiples, nous avons préféré résoudre ce système avec un outil tel que Matlab/Simulink alimenté par des résultats issus de simulations électromagnétiques par éléments finis (Flux2D-Flux3D).

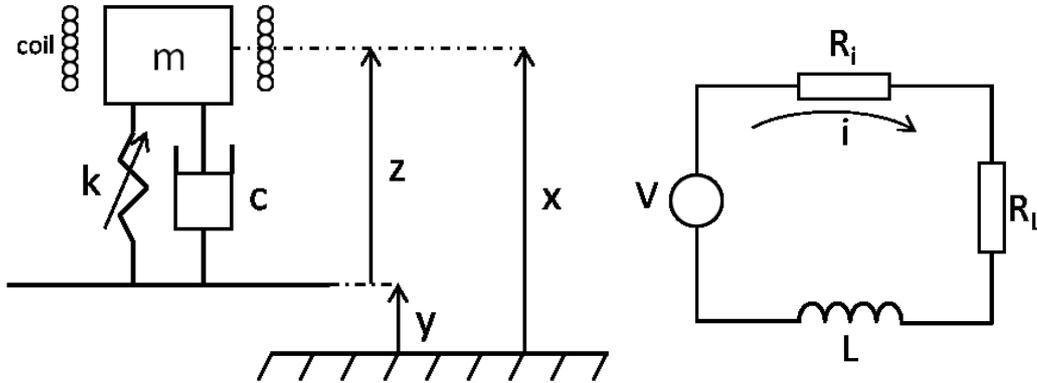


Figure 3 : Modélisation du récupérateur d'énergie

### 3. Mesures d'un prototype de récupérateur d'énergie

#### 3.1 Construction d'un prototype

Pour valider les résultats du modèle, nous avons construit un prototype de façon à mettre en évidence le phénomène de « hardening » tout en étant le plus performant possible (minimisation de l'amortissement mécanique, optimisation du couplage électromagnétique). De ce fait, outre la suspension du mobile, nous utiliserons un matériau fritté pour le stator (Somaloy) et des aimants frittés.

De manière arbitraire, nous avons fixé ses dimensions à celle d'une pile LR20 (diamètre 33mm et de hauteur 58mm) et la course à  $\pm 3$  mm.

#### 3.2 Résultats de mesure

##### 3.2.1 Mesures statiques

Les résultats de la mesure statique du prototype sont à comparer avec les résultats de simulations effectuées sur le logiciel Flux 2D.

Les résultats obtenus sont en accord avec ce qui avait été simulé.

##### 3.2.2 Mesures dynamiques

Les mesures dynamiques du récupérateur mis en évidence le phénomène de « hardening » et l'inconvénient d'avoir des frottements trop élevés dans un récupérateur d'énergie ce qui implique des accélérations très importantes. La comparaison avec le modèle dynamique permet un bon accord des résultats une fois déterminé le coefficient des frottements visqueux.

### 4. Conclusion

La confrontation des mesures en statique et en dynamique avec le modèle a permis de valider celui-ci. Le modèle sera utilisé par la suite pour établir des règles de conception qui permettront une optimisation globale de la structure des récupérateurs d'énergie, en prenant compte de données comme la largeur fréquentielle et la plage d'amplitude des vibrations visées et le coût des solutions proposées.

### 5. Références

- [1] F. Cottone « Introduction to vibration energy harvesting », NiPS Energy Harvesting Summer School, 2011.
- [2] H. A. Sodano, G. Park, et D. J. Inman, "Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting;" Strain, 2004.
- [3] J. Ajitsaria, S. Y. Choe, D. Shen, et D. J. Kim, "Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation;" Smart Materials and Structures, April 2007.

- [4] P. Glynne Jones, "An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor Systems;" Sensors and Actuators A : Physical, February 2004.
- [5] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O'Donnell, C. R. Saha, et S. Roy, "A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting;" Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007.
- [6] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan et J. H. Lang, "Vibration-to-electric energy conversion;" IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI), 2001.
- [7] T. Ueno et S. Yamada, "Performance of Energy Harvester Using Iron-Gallium Alloy;" IEEE transactions on magnetics, 2011.
- [8] Zhu Y. et Zu J, "A magnetoelectric Generator for Energy Harvesting From the Vibration of magnetic levitation;" IEEE Transactions on Magnetics, 2012.
- [9] Arroyo E., « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes », Grenoble, 2012.
- [10] B.P. Mann and N.D.Sims « Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation », Journal of Sound and Vibration, 2008.
- [11] « Actionneur électromagnétique comportant une structure statorique à trois pôles de longueurs différentes et distributeurs pneumatiques mettant en œuvre de tels actionneurs » Brevet : FR 2 682 542 - 1991