

Sujet de stage de M2 informatique/EEA
Durée 6 mois, début au plus tard au 1^{er} avril 2021

Apprentissage machine appliqué à la recherche de trajectoires optimales pour la récupération d'énergie mécanique à micro-échelle

Encadrant : Armine Karami
Laboratoire ESYCOM
UMR 9007 (CNAM/CNRS/Université Gustave Eiffel)

Résumé

Ce stage s'intéresse à la recherche d'algorithmes de traitement statistique de séries temporelles pour la récupération d'énergie mécanique à micro-échelle. On cherche des algorithmes permettant d'effectuer une sélection en temps réel des extrema d'une fonction d'entrée, de sorte à maximiser une quantité d'énergie convertie par le système, laquelle dépend de la suite d'extrema sélectionnée. La sélection optimale requiert une estimation de certaines propriétés du futur de chaque entrée mécanique donnée, lesquelles doivent être inférées par un modèle statistique ajusté sur des échantillons du même processus de génération des vibrations. L'impératif de faible consommation des futures implémentations matérielles est une contrainte supplémentaire pour le choix de ces algorithmes. Le profil recherché est celui d'un étudiant niveau M2 en informatique, électronique/EEA, ou physique, intéressé par l'apprentissage statistique, en particulier pour le traitement de séries temporelles, et qui possède des bases en électricité et en mécanique. Le stage pourra être suivi d'une thèse de doctorat.

1 Introduction à la récupération d'énergie mécanique à micro-échelle

1.1 Contexte et motivations

Les progrès technologiques ont permis d'abaisser drastiquement la consommation des fonctions de mesure, calcul, et communication des systèmes électroniques miniatures. Dès lors, il est envisageable de rendre ces systèmes autonomes en énergie, en les alimentant par conversion d'une partie de l'énergie présente dans leur environnement immédiat. Les récupérateurs d'énergie mécanique (REM) permettent de convertir en énergie électrique une partie de l'énergie mécanique communiquée au système {électronique à alimenter + REM} par les vibrations ambiantes. Les niveaux de consommation visés vont du microwatt au milliwatt. Parmi les applications possibles, on peut citer les nœuds de réseaux de capteurs sans fil pour la surveillance de structures, ou les dispositifs médicaux implantés.

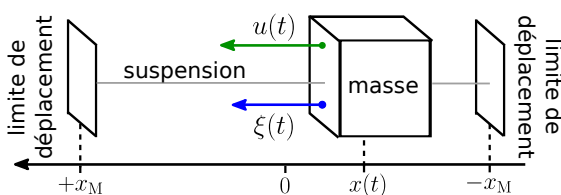


Figure 1 – Modèle simplifié d'un REM inertiel à un degré de liberté (axe Ox). La force $\xi(t)$ est l'excitation externe d'entrée, la force $u(t)$ représente la force de transduction responsable de la conversion d'énergie. La masse mobile se déplace entre les extrémités $\pm x_M$ et sa position à l'instant t est $x(t)$.

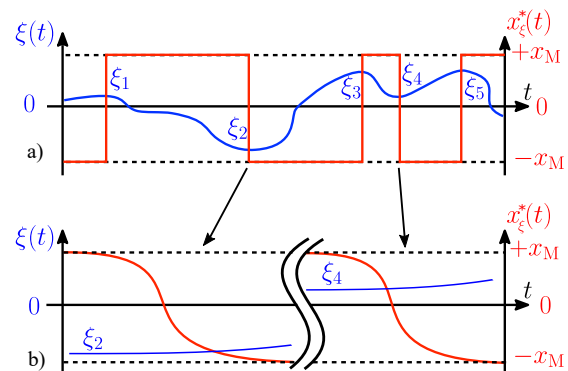


Figure 2 – Trajectoire optimale $x_{\xi}^*(t)$ à implémenter pour approcher les limites de la conversion d'énergie électromécanique à partir d'une entrée $\xi(t)$. (a) Trajectoire avec des exemples d'extrema ξ_n (b) Zoom sur la commutation de position au voisinage de deux extrema

Les REM miniatures inertiels sont composés d'une partie mécanique bâtie autour d'une masse mobile (elle-même élément d'un résonateur mécanique) d'un transducteur électromécanique (qui peut être électrostatique, piézoélectrique ou électromagnétique), et d'une partie électrique de conditionnement du transducteur. Le modèle le plus simple de REM inertiel est donné en Fig. 1.

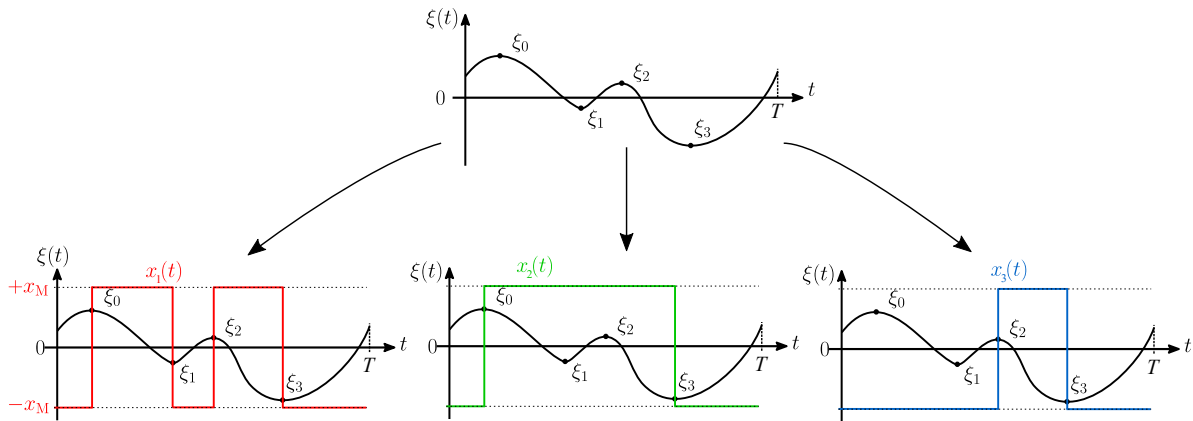


Figure 3 – Un exemple d'extrait d'excitation $\xi(t)$ est donné en haut, et trois trajectoires possibles à basculement sont données en bas.

1.2 Récupération d'énergie mécanique proche-limites

Des travaux récents ont permis de montrer que l'énergie convertie par un REM peut être maximisée de sorte à atteindre les limites physiques de la conversion pour une entrée mécanique et une taille de dispositif donnés [HT15]. On montre que pour atteindre ces limites, le REM doit activement contrôler la dynamique de sa masse mobile, de sorte qu'elle suive une trajectoire particulière consistant en une commutation de position de la masse mobile, d'une extrémité du système à l'autre, à chacun des extrema de la force externe. La masse doit être gardée à chaque extrémité entre les extrema. Un exemple de cette trajectoire est donné en Fig. 2. Ce contrôle est synthétisé par la force de transducteur, elle-même réalisée par l'interface électrique du REM. Il doit être implémenté de façon adiabatique, en minimisant les pertes dues aux forces dissipatives électriques et mécaniques.

Les REM conçus selon ce principe sont appelés REM "proche-limites". Ils répondent en théorie au problème majeur de la faible performance des REM inertiels soumis à des vibrations irrégulières et/ou de basses fréquences, car ce principe peut s'appliquer à des entrées mécaniques arbitraires, résultant en l'atteinte de la limite physique de la conversion. Cette compatibilité avec des excitations mécaniques arbitraires/basses fréquences demeure l'un des principaux défis dans le domaine de la récupération d'énergie mécanique à micro-échelle.

1.3 Sélection optimale d'extrema pour la récupération d'énergie mécanique proche-limites

Des études préliminaires sur la faisabilité des REM proche-limites montrent qu'il peut en fait être bénéfique, voire indispensable, d'amender la loi de contrôle globale de sorte à ignorer certains extrema de la force externe et ne pas y effectuer le basculement de position de la masse mobile [KJB19]. Cela est dû au coût énergétique associé à chaque basculement. Effectuer cette sélection en temps réel et de façon optimale en termes d'énergie totale récupérée requiert de concevoir un algorithme prenant la décision de basculement en fonction d'informations statistiques *a priori* sur les entrées mécaniques auxquelles le système sera soumis [GKB19].

Cette sélection d'extrema doit s'appuyer sur un *a priori* sur le futur de l'entrée mécanique, et ce en temps réel, à la détection de chaque extrema. Cet *a priori* sera déduit d'un modèle statistique ajusté (entraîné) sur des échantillons de vibrations obtenus en conditions similaires. En effet, la sélection optimale ne peut se faire qu'en connaissance de l'intégralité de la vibration d'entrée (impossible de façon causale donc physique). La Fig. 3 donne un exemple simple qui illustre ce fait : selon le modèle du coût énergétique associé à un basculement, la trajectoire optimale peut être par exemple $x_1(t)$, $x_2(t)$ ou $x_3(t)$. La sélection optimale des extrema de commutation demande donc une connaissance du futur de l'entrée. Par exemple, si $x_2(t)$ est optimal, il faut savoir au moment où ξ_1 est détecté qu'on ne veut pas basculer.

2 Travail à effectuer

L'objectif du stage est de proposer des algorithmes optimisés de sélection d'extrema pour la récupération d'énergie mécanique proche-limites. Pour cela, il faudra :

- déterminer un modèle des coûts énergétiques associés à un basculement de position, à partir de l'architecture physique du REM,
- recueillir des données de vibrations d'entrées dans différents contextes d'applications,
- proposer un algorithme de calcul *a posteriori* du choix optimum d'extrema,

- appliquer cet algorithme aux données de vibrations récoltées pour évaluer la quantité d'énergie convertible et ainsi évaluer la faisabilité d'un REM proche-limites dans chacun des contextes,
- rechercher des algorithmes de sélection d'extrema en temps réel, basés sur des méthodes statistiques ou d'apprentissage machine pour les séries temporelles, tirant parti des régularités des entrées de vibration,
- étudier le compromis entre performances et complexité pour amender les algorithmes retenus, en prévoyant d'éventuels coûts énergétiques liés à leur implémentation matérielle.

On pourra mettre l'accent sur l'une ou l'autre des parties en fonction du profil et des intérêts du stagiaire. Ce dernier pourra s'appuyer sur les travaux précédemment cités ainsi que [SGK20].

3 Environnement scientifique

Le stagiaire recruté mènera ses recherches au laboratoire ESYCOM, sur le site du laboratoire situé sur le campus de l'Université Gustave Eiffel (Champs-sur-Marne, à 3 minutes du RER A Noisy-Champs). Le laboratoire est en pointe sur le sujet de la récupération d'énergie mécanique par transducteurs électrostatiques micro-électromécaniques (MEMS) et triboélectriques, depuis plus d'une décennie.

Par ailleurs, des collaborations au sein du laboratoire sont à prévoir avec Philippe Basset (Professeur ESIEE à Paris), et hors du laboratoire avec Dimitri Galayko (maître de conférences à Sorbonne Université), ainsi qu'avec Jérôme Juillard (professeur à CentraleSupélec).

4 Profil recherché

Le candidat doit être en dernière année de master ou d'école d'ingénieurs, et y suivre une formation en informatique, en sciences de l'ingénieur électronique/EEA (électronique, électrotechnique, automatique), ou équivalent. Les candidats de formation en ingénierie mécanique ou en physique sont aussi encouragés à candidater.

Des bases en apprentissage machine et/ou en statistiques seront fortement appréciées. Une expérience dans la modélisation de processus stochastiques et/ou l'analyse de séries temporelles sera aussi très utile.

Le candidat doit avoir une maîtrise de base du langage Python et des bibliothèques de fonctions mathématiques associées (numpy, scipy, ...). Une expérience avec les bibliothèques spécifiques à l'apprentissage machine sera appréciée (PyTorch ou TensorFlow). Des connaissances en simulation de circuits SPICE et/ou de systèmes multi-physiques à paramètres localisés (e.g., Verilog-A ou VHDL-AMS) sont aussi un plus. Le candidat doit par ailleurs posséder les bases de calcul scientifique guidant un usage raisonné de ces outils.

Le stage pourra être suivi d'une thèse de doctorat sur la récupération d'énergie mécanique proche-limites.

5 Contact

Les candidats potentiels sont invités à contacter Armine Karami (contact ci-dessous) pour plus d'informations, ou pour déposer leur candidature (lettre de motivation + CV).

Armine Karami
Chargé de recherche CNRS
Laboratoire ESYCOM
armine.karami@univ-eiffel.fr

6 Bibliographie

- [HT15] A. H. HOSSEINLOO et K. TURITSYN. « Fundamental limits to nonlinear energy harvesting ». In : *Physical Review Applied* 4.6 (2015), p. 064009.
- [GKB19] D. GALAYKO, A. KARAMI, P. BASSET et E. BLOKHINA. « AI Opportunities for Increased Energy Autonomy of Low-Power IoT Devices ». In : *2019 26th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. IEEE. Nov. 2019.
- [KJB19] A. KARAMI, J. JUILLARD, E. BLOKHINA, P. BASSET et D. GALAYKO. *Electrostatic Near-Limits Kinetic Energy Harvesting from Arbitrary Input Vibrations*. 2019. arXiv : 2002.07086 [physics.app-ph].
- [SGK20] A. SOKOLOV, D. GALAYKO, M. P. KENNEDY et E. BLOKHINA. « Near-Limit Kinetic Energy Harvesting From Arbitrary Acceleration Waveforms : Feasibility Study by the Example of Human Motion ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 219223-219232.