

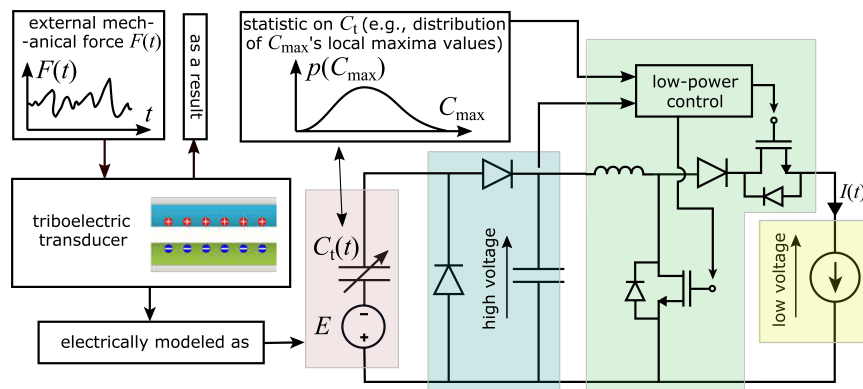
Sujet de thèse  
Université Gustave Eiffel  
Laboratoire ESYCOM (UMR CNRS 9007)

## Interfaces électriques pour les récupérateurs d'énergie mécanique triboélectriques sous excitations irrégulières

Encadrants :  
Armine Karami, Philippe Basset

### Résumé

Cette thèse propose d'étudier les interfaces électriques pour les transducteurs triboélectriques dans le contexte de la récupération d'énergie mécanique. On envisage d'étudier les deux blocs composant classiquement ces interfaces : le circuit de conditionnement et l'interface d'extraction d'énergie. Pour le circuit de conditionnement, l'étude se portera plus spécifiquement sur les circuits dits "pompe de charge", qui ont des performances satisfaisantes en termes d'énergie convertie, tout en ne nécessitant pas de contrôle actif synchronisé avec l'excitation mécanique. Pour le circuit d'extraction d'énergie, il s'agit de chercher de nouveaux couples (topologie du circuit ; algorithme de contrôle). Le circuit, le choix de composants et leur dimensionnement devront être compatibles avec les tensions relativement élevées typiquement rencontrées avec les transducteurs triboélectriques. Les algorithmes de contrôle devront permettre de maximiser la puissance moyenne convertie à partir d'excitation irrégulières ou aléatoires. Cela demandera également d'étendre la théorie des circuits de pompe de charge à ces excitations. Les recherches à mener se veulent volontiers orientées vers la théorie et la modélisation, mais la validation expérimentale sera recherchée, étant rendue possible par les bancs de mesure déjà mis en place au laboratoire.



**Figure 1** – Système complet de récupération d'énergie mécanique basé sur un transducteur triboélectrique. On représente ici un contexte dans lequel le transducteur, modélisé électriquement par le circuit  $\{C_t + E\}$ , est soumis à une excitation mécanique aléatoire, dont seules sont connues certaines propriétés statistiques. Le transducteur est polarisé par un circuit pompe de charge en fond bleu (ici une pompe de charge "redresseur", l'exemple le plus simple). Ce circuit est lui même contrôlé par une interface d'extraction (fond vert) d'énergie qui optimise l'état électrique du transducteur tout en délivrant l'énergie à basse tension à une charge utile (fond jaune). La topologie donnée ici pour le circuit d'extraction est un exemple parmi d'autres possibilités, mais on retrouve la topologie de convertisseur DC-DC. Un élément déterminant de ce circuit d'extraction d'énergie est le contrôle. Les performances du système global sont ainsi déterminées par chacun des blocs en question, comprenant l'algorithme de contrôle du circuit d'extraction d'énergie.

### Contexte

Les récupérateurs d'énergie mécanique (REM) sont des systèmes électromécaniques convertissant une partie de l'énergie mécanique fatale de leur environnement en électricité pour alimenter une charge effectuant des traitements utiles (calcul, détection, communication). Il s'agit de systèmes de petite taille ( $\leq 10 \text{ cm}^3$ ) qui convertissent des faibles puissances (typiquement  $\leq 1 \text{ mW}$  de moyenne). Les applications visées peuvent être industrielles (alimentation de capteurs pour la surveillance des structures) ou biomédicales (alimentation de dispositifs implantés).

Tout REM est composé d'un transducteur qui couple les domaines électrique et mécanique, et d'un circuit électrique pour le conditionnement du transducteur et l'extraction de l'énergie convertie. Parmi les différents types de REM, ceux basés sur les transducteurs triboélectriques (aussi appelés TENG pour *triboelectric nanogenerators*) ont fait l'objet de recherches poussées dans la dernière décennie. Ces transducteurs exploitent l'effet triboélectrique : lorsque l'excitation externe met en contact certains types de matériaux diélectriques recouvrant leurs électrodes

conductrices, une densité de charge semi-permanente apparaît à la surface des diélectriques. Cela induit des charges sur les parties conductrices des électrodes (Fig. 1). Lors du reste du cycle d'actionnement mécanique, le champ électrique résultant s'oppose convertit une partie du travail de la force d'excitation externe en électricité.

Les avantages des REM triboélectriques sont leur faible coût, une densité typique de puissance satisfaisante, un impact environnemental limité, ainsi que la possibilité d'y intégrer directement un capteur. Cependant, ces REM souffrent de la relative complexité de conception de leurs interfaces électriques. Cette interface électrique peut être divisée en deux parties : le circuit de conditionnement, et le circuit d'extraction de l'énergie (Fig. 1).

Le circuit de conditionnement est responsable de la polarisation du transducteur pendant un cycle mécanique. Parmi les circuits de conditionnement, on compte notamment les circuits *pompe de charge* [GDK15], qui ont l'avantage de ne pas nécessiter de synchronisation active avec l'excitation mécanique (exemple en Fig. 1). Le circuit d'extraction d'énergie contrôle l'état électrique du circuit de conditionnement, et abaisse la haute tension à sa sortie, caractéristique de la transduction triboélectrique, en une basse tension pouvant alimenter une charge utile. Ce circuit est commandé par un signal externe qui implémente un algorithme de contrôle devant maximiser la puissance moyenne délivrée à la charge utile.

## Positionnement et objectifs

Jusqu'à récemment, la vaste majorité des travaux sur les REM triboélectriques à l'état de l'art se sont concentrés sur l'aspect transducteur et la sciences des matériaux afférente. Il est néanmoins maintenant bien établi que l'exploitation pratique de ces transducteurs requiert autant d'attention. En effet, les performances d'un REM triboélectrique sont déterminées par la nature et les dimensions du transducteur, par l'excitation mécanique, et par l'électronique de conditionnement et d'extraction d'énergie.

Ainsi, bien que des travaux existent sur le circuit de conditionnement [LS19 ; XWB20 ; GHH18], l'état de l'art ne donne pas de règles de dimensionnement quantitatives pour ces blocs, notamment pour le cas des excitations irrégulières. De même, au-delà de certaines propositions spécifiques d'interfaces [HBG20 ; ZGB22], il n'existe pas de critères précis pour le choix du couple (interface d'extraction d'énergie ; loi de contrôle). La conception de ces interfaces souffrent par ailleurs d'une complexité pratique supplémentaire, car il faut gérer de hautes tensions (en sortie du système {transducteur + circuit de conditionnement}) sous contrainte de très faible budget énergétique.

Cette propose donc d'avancer l'état des connaissances à l'état de l'art par la poursuite des objectifs suivants :

- proposer une théorie unifiant la description des circuits "pompe de charge" conditionnant les transducteurs électrostatiques en général (et triboélectriques en particulier), et en extraire un choix optimal de topologie de pompe de charge pour un contexte applicatif donné,
- étudier les topologies des circuits d'extraction d'énergie et les contrôles asynchrones qui leurs sont associés, en prenant en compte la problématique de haute tensions et faible puissance pour le choix des composants,
- à partir des résultats précédents, proposer un flot de conception optimal pour l'ensemble {pompe de charge + circuit d'extraction + contrôle asynchrone} pour un transducteur triboélectrique donné,
- étendre les résultats au cas des excitations mécaniques irrégulières ou stochastiques, d'abord concernant l'analyse des pompes de charges, puis concernant le contrôle des circuits d'extraction d'énergie,
- réaliser un ou plusieurs démonstrateurs visant des applications réelles, en mettant en œuvre les règles de conception optimales découlant des points ci-dessus,
- enfin, suivant l'avancement, les travaux pourront dépasser le cadre seul du dimensionnement du circuit pour étudier la conception optimale *conjointe* du transducteur et de l'électronique.

En fonction de l'avancement des travaux et de l'intérêt du doctorant, on pourra se concentrer sur une partie de ces points, voire aborder l'ensemble des points non listés.

Le laboratoire ESYCOM est à la pointe des travaux sur la modélisation électrique des transducteurs triboélectriques, ainsi que sur l'analyse et la conception des interfaces électriques pour ces transducteurs. Les chercheur(e)s du laboratoire ont notamment étudié la modélisation circuit des transducteurs triboélectriques [HGL18]. Le laboratoire a également participé à des travaux visant à établir des principes unificateurs pour l'étude des circuits à pompe de charge [GDK15 ; GHH18]. Enfin, le laboratoire a aussi mené des travaux sur la réalisation du circuit d'extraction d'énergie dans des cas d'excitations régulières, au moyen d'interrupteurs à décharge plasma [ZGB22].

## Méthodologie et programme

Ce travail se décomposera de la façon suivante :

- étude bibliographique, contextualisation et prise en main du sujet,
- étude des modèles de circuits pompe de charge : généralisation des travaux antérieurs du laboratoire au cas de topologies de pompes de charges récemment découvertes,

- prise en main des modèles de simulation électromécanique couplant transducteur, circuit de conditionnement, et interface d'extraction d'énergie. Exploitation pour la validation des modèles des pompes de charge,
- prise en main des bancs expérimentaux de test des pompes de charge et exploitation pour la validation des modèles précédemment obtenus,
- étude des circuits d'extraction d'énergie, en partant des topologies classiques de convertisseurs DC-DC,
- intégration des contraintes sur les composants (tension maximale, capacité parasite) et modélisation de la consommation du circuit de contrôle.
- mise en place d'une expérience permettant le test de la chaîne complète comprenant notamment le contrôle externe du circuit d'extractoin, généré par un ordinateur temps réel
- transverse à tous les points ci-dessus : adaptation au cas d'excitations mécaniques irrégulières/aléatoires.

### Profil recherché

Étudiant issu d'une formation EEA ou physique avec un intérêt pour les aspects de modélisation. On appréciera une exposition préalable à la théorie des circuits, à l'électronique de puissance, et/ou à la commande et l'identification de systèmes, notamment dans le cas d'excitations stochastiques.

### Candidature et contact

Le dossier de candidature incluant, CV, lettres de motivation et de recommandation et l'ensemble des résultats académiques est à adresser par voie électronique à :

Armine Karami, [armine.karami@cnrs.fr](mailto:armine.karami@cnrs.fr)

### Laboratoire d'accueil

Le laboratoire ESYCOM s'inscrit dans les domaines de l'ingénierie des systèmes de communication, des capteurs et des microsystèmes pour la ville, l'environnement et la personne.

Les thèmes abordés sont plus spécifiquement :

- les antennes et propagation en milieux complexes, les composants photoniques - micro-ondes ;
- les microsystèmes pour l'analyse de l'environnement et la dépollution, pour la santé et l'interface avec le vivant ;
- les micro-dispositifs de récupération d'énergie ambiante mécanique, thermique ou électromagnétique.

### Bibliographie

- [GDK15] D. GALAYKO, A. DUDKA, A. KARAMI, E. O' RIORDAN, E. BLOKHINA, O. FEELY et P. BASSET. « Capacitive Energy Conversion With Circuits Implementing a Rectangular Charge-Voltage Cycle—Part 1 : Analysis of the Electrical Domain ». In : *IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers* 62.11 (2015), p. 2652-2663. DOI : [10.1109/tcsi.2015.2451911](https://doi.org/10.1109/tcsi.2015.2451911).
- [GHH18] A. GHAFARINEJAD, J. Y. HASANI, R. HINCHET, Y. LU, H. ZHANG, A. KARAMI, D. GALAYKO, S.-W. KIM et P. BASSET. « A conditioning circuit with exponential enhancement of output energy for triboelectric nanogenerator ». In : *Nano Energy* 51 (2018), p. 173-184.
- [HGL18] R. HINCHET, A. GHAFARINEJAD, Y. LU, J. Y. HASANI, S.-W. KIM et P. BASSET. « Understanding and modeling of triboelectric-electret nanogenerator ». In : *Nano Energy* 47 (2018), p. 401-409. DOI : [10.1016/j.nanoen.2018.02.030](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.02.030).
- [LS19] X. LI et Y. SUN. « An SSHI rectifier for triboelectric energy harvesting ». In : *IEEE Transactions on Power Electronics* 35.4 (2019), p. 3663-3678.
- [HBG20] W. HARMON, D. BAMGBOJE, H. GUO, T. HU et Z. L. WANG. « Self-driven power management system for triboelectric nanogenerators ». In : *Nano Energy* 71 (2020), p. 104642. DOI : [10.1016/j.nanoen.2020.104642](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104642).
- [XWB20] X. XIA, H. WANG, P. BASSET, Y. ZHU et Y. ZI. « Inductor-free output multiplier for power promotion and management of triboelectric nanogenerators toward self-powered systems ». In : *ACS applied materials & interfaces* 12.5 (2020), p. 5892-5900.
- [ZGB22] H. ZHANG, D. GALAYKO et P. BASSET. « General analysis and optimization of a two-stage power management circuit for electrostatic/triboelectric nanogenerators ». In : *Nano Energy* 103 (2022), p. 107816. DOI : [10.1016/j.nanoen.2022.107816](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107816).