

## **Avis de Soutenance**

**Monsieur Hanlu ZHANG**

Lab. MSSMat, CNRS UMR8579, CentraleSupélec

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulée

### **Modélisation, simulation et optimisation des récupérateurs d'énergie cinétique miniatures avec tribo-électrets**

### **Modeling, simulation and optimization of miniature tribo-electret kinetic energy harvesters**

Soutenance prévue le **vendredi 20 décembre 2019 à 10h00 en Amphi II**

Au rez-de-chaussée du Bât. Eiffel, CentraleSupélec, 8 Rue Joliot Curie, 91190 Gif sur Yvette

#### **Composition du jury**

M. Jinbo BAI	MSSMat, CentraleSupélec	Directeur de thèse
M. Delong HE	MSSMat, CentraleSupélec	Co-encadrant
M. Philippe MOLINIÉ	GeePs, CentraleSupélec	Co-encadrant, Invité
M. Alain SYLVESTRE	Université Grenoble Alpes	Rapporteur
M. Philippe BASSET	Université Paris-Est / ESIEE Paris	Rapporteur
Mme. Yamin LEPRINCE-WANG	Université Paris-Est Marne-la-Vallée	Examinatrice
M. Olivier DOARÉ	ENSTA-Paristech	Examineur
Mme. Noëlle GOGNEAU	C2N, Université Paris-Saclay	Invitée

**Mots clés:** Récupérateurs d'énergie cinétique, Tribo-électrets, Modélisation, Simulation, Optimisation, Modification du potentiel de surface

**Résumé:** La récupération d'énergie dans l'environnement ambiant est une bonne solution d'alimentation durable et complémentaire dans certains produits électroniques grand public, réseaux de capteurs distribués sans fil, dispositifs portables ou implantables, systèmes "Internet of Things" avec beaucoup de nœuds, etc. par rapport aux batteries. Les mouvements et les vibrations sont des sources d'énergie les plus disponibles à cet effet. Les dispositifs collectant de l'énergie cinétique à petite échelle sont appelés récupérateurs d'énergie cinétique (RECs). Les RECs avec électrets (E-RECs) sont un type de RECs électrostatiques qui utilisent des électrets (diélectriques avec charges quasi permanentes) comme source de tension de polarisation, et qui peuvent générer de l'électricité grâce à l'effet d'induction électrostatique lorsque la la capacitance des E-RECs varie du fait des mouvements/vibrations. Cette thèse vise à étudier les caractéristiques de sortie transitoires des E-RECs à la fois par des simulations théoriques et des mesures expérimentales, et à optimiser l'efficacité et la puissance de sortie des E-RECs par charge triboélectrique et par d'autres méthodes adaptées à leurs caractéristiques de sortie, qui sont essentielles pour améliorer la performance des E-RECs par mouvements/vibrations.

Tout d'abord, les caractéristiques de sortie à amplitude variable d'un E-REC en mode contact-séparation (CS) dans des cycles de travail transitoires sont examinées via les résultats de la simulation basés sur un modèle de circuit équivalent détaillé. Ces caractéristiques de sortie à amplitude variable sont attribuées au décalage du cycle de transfert de charge par rapport au cycle de mouvement d'excitation. Les influences de la condition initiale et de la résistance de charge sur la variation des pics de tension de sortie d'un tribo-électret REC (TE-REC) en mode CS réalisé avec un film électret en polytétrafluoroéthylène (PTFE) one été étudiées en détail et vérifiées à la fois par simulations et expériences.

Deuxièmement, une méthode d'optimisation du temps de contact est utilisée pour améliorer la puissance de sortie et l'efficacité du TE-REC en mode CS avec une résistance de charge de 100 M $\Omega$ . L'énergie convertie théorique maximale par cycle de travail du TE-REC est analysée. Nous avons aussi étudié les influences de plusieurs facteurs défavorables qui généralement réduiraient la conversion d'énergie par cycle de travail du TE-REC. L'optimisation de l'intervalle d'air maximal et la méthode tribo-charge sont également utilisées pour améliorer la puissance moyenne sortie du TE- REC avec une surface de 4 cm  $\times$  4 cm, de  $\sim 150 \mu\text{W}$  à  $\sim 503 \mu\text{W}$ .

Troisièmement, une méthode innovante et facile a été développée pour charger le film polymère électret en éthylène propylène fluoré (FEP) par pelage de ruban adhésif, sans utiliser de source de haute tension électrique. La distribution du potentiel de la surface du film de FEP est fortement modifiée après plusieurs pelages au ruban adhésif. Par conséquent, la tension et le courant de sortie des TE-REC fabriqués avec le film FEP traités sont beaucoup améliorés. Pour un TE-REC flexible d'une surface de 64 cm<sup>2</sup> soufflé par du vent, une amélioration évidente d'environ 692% de la puissance de sortie, correspondant 2,5  $\mu\text{W}$  à environ 19,8  $\mu\text{W}$ , a été obtenue par cette méthode.

**Keywords:** Kinetic energy harvesters, Tribo-electrets, Modeling, Simulation, Optimization, Surface potential modification

**Abstract:** Harvesting energy from the ambient environment is a good sustainable and complementary power supply solution in some consumer electronics, distributed wireless sensor networks, wearable or implantable devices, "Internet of Things" systems with lots of nodes, etc. in comparison with batteries. The ubiquitous kinetic energy in various motions and vibrations is one of the most available energy sources for such a purpose. The electret kinetic energy harvesters (E-KEHs) is one type of electrostatic kinetic energy harvesters using electrets (dielectrics with quasi-permanent charges) as the biasing voltage source, which can generate electricity based on the electrostatic induction effect when the capacitance of the E-KEHs is changed by the motions/vibrations. This thesis aims to investigate the transitory output characteristics of E-KEHs by both theoretical simulations and experimental measurements and to optimize the efficiency and output power of E-KEHs by tribo-charging and other methods adapted to their output characteristics, which are significant to improving the performance of E-KEHs.

Firstly, the amplitude-variable output characteristics of a contact-separation (CS) mode E-KEH in transitory working cycles are investigated via the simulation results based on a detailed equivalent circuit model. These amplitude-variable output characteristics are attributed to the lag of the charge-transfer cycle behind the excitation motion cycle. The influences of both the initial condition and the load resistance on the variation in the output voltage peaks of a tribo-electret KEH (TE-KEH) are studied in detail and verified by both simulated and experimental data of a CS mode TE-KEH made with polytetrafluoroethylene (PTFE) electret film.

Secondly, based on the analysis of the amplitude-variable output characteristics, a contact time optimization method is used to improve the output power and efficiency of the CS mode TE-KEH with a large load resistance of 100 M $\Omega$ . The theoretical maximum output energy per working cycle of the TE-KEH is analyzed. Several usually unfavorable factors that would reduce the practical output energy per working cycle of the TE-KEH are discussed. The maximum air gap optimization and the tribo-charging methods are also used together to further improve the average output power of the 4 cm  $\times$  4 cm sized TE-KEH from  $\sim$ 150  $\mu$ W to  $\sim$ 503  $\mu$ W.

Thirdly, an innovative and facile tape-peeling tribo-charging method is developed to charge the fluorinated ethylene propylene (FEP) polymer film to make electrets without using any high voltage source. The surface potential distribution of the FEP film is apparently changed after several tape-peeling tribo-charging treatments. Consequently, the output voltage and current of TE-KEHs made with the FEP film are greatly improved. For a 64 cm<sup>2</sup> sized flexible TE-KEH to harvest kinetic energy from wind, an apparent  $\sim$ 692% improvement in the output power from  $\sim$ 2.5  $\mu$ W to  $\sim$ 19.8  $\mu$ W was obtained by the tape-peeling charging method.