

PhD position

Title: Particulate Multiphysics Modelling of the Seebeck Effect for Ambient Energy Harvesting – Application to Structural Health Monitoring (SHM) Systems

Keywords: Seebeck effect, energy harvesting, thermoelectric generators, multiphysics modeling, statistical physics, particle physics, metamaterials.

Ambient energy harvesting represents a promising solution for the autonomous power supply of sensors used in Structural Health Monitoring (SHM) systems. One of the most relevant thermal phenomena for this application is the Seebeck effect, which enables the conversion of a temperature difference between two conductive materials into an electrical potential difference. This phenomenon offers opportunities for energy generation from low-grade thermal sources, such as those found in industrial environments, natural surroundings, or civil infrastructures.

Although the Seebeck effect has been extensively investigated in the field of thermoelectric materials, its specific application to ambient energy harvesting for the self-powering of sensors in SHM systems remains relatively underexplored. Existing studies demonstrate that small-scale thermoelectric modules can be designed to harvest ambient heat, including that generated by environmental temperature variations, thermal gradients within structures, or temperature fluctuations induced by changing environmental conditions.

In this context, the integration of thermoelectric power supply devices for sensor operation [1], and particularly the exploitation of the Seebeck effect, offers a sustainable and maintenance-free solution. However, the accurate modelling of the Seebeck effect—accounting for sensor geometry, thermal environment, and material properties—remains a major challenge.

Current thermal energy harvesting models applied to SHM systems, such as those based on thermodynamic or electrothermal approaches, require further improvements to accurately predict system performance under varying conditions and real-world environments [2]. While several studies have focused on the experimental aspects of these systems, relatively few have addressed comprehensive modelling approaches that consider not only the Seebeck effect but also the coupled thermal and electrical interactions within an integrated SHM system.

The primary objective of this thesis is to develop a comprehensive and accurate modeling and simulation approach for the Seebeck effect applied to ambient energy harvesting, specifically for Structural Health Monitoring (SHM) systems. This work will be structured around three main research axes:

- Multiphysics modeling and simulation (statistical and particle physics) [3]: Development of a hybrid thermal–electrical model describing the conversion of thermal energy into electrical energy via the Seebeck effect, while accounting for thermal losses and physical constraints within SHM structures.
- Optimization of thermoelectric metamaterials: Investigation of thermoelectric materials suited to the operating conditions of monitored structures. This includes an analysis of Seebeck coefficients, thermal and electrical conductivities of available materials, as well as the impact of material selection on overall system performance.
- Implementation in SHM systems: Design of an SHM sensor prototype powered by the Seebeck effect and evaluation of its efficiency under real monitoring conditions [4]. This prototype will serve as a testbed for validating the proposed theoretical models.

In conclusion, this thesis aims to advance the modelling of the Seebeck effect for ambient energy harvesting in SHM sensor applications, where reliable power supply is critical to system functionality and long-term reliability. By leveraging advanced thermal and electrical modelling techniques, the proposed work seeks to optimize the energy efficiency of thermoelectric devices integrated into wireless SHM sensors. Furthermore, it will analyze the operational conditions under which such systems can function autonomously over

extended periods, thereby contributing to the sustainability and cost-effectiveness of SHM systems.

Environnement : COSYS/SII (Université Gustave Eiffel) & Inria

Candidate profile: Master 2 student or engineering school student or equivalent in the fields of multiphysics modeling, numerical simulation, applied mathematics. Desired skills and qualities: - Interest in structural dynamics - Strong foundation in mathematics - Motivation for numerical modeling in mechanics - Curiosity about artificial intelligence and programming (Python, MATLAB) - Autonomy, rigor, and scientific mindset

Application: Online on the Gustave Eiffel University website ([lien](#)). The deadline to apply is 15/04/2026.

Contact :

- Romain NOËL : romain.noel@univ-eiffel.fr
- Christophe DROZ : christophe.droz@inria.fr
- Julien LE SCORNEC : julien.le-scornec@univ-eiffel.fr

References

- [1] H. Xie, Y. Zhang, et P. Gao, « Thermoelectric-Powered Sensors for Internet of Things », *Micromachines*, vol. 14, n° 1, p. 31, janv. 2023, doi: 10.3390/mi14010031.
- [2] K. Huang et F. Edler, « Multiphysics Simulation of Seebeck Coefficient Measurement », *J. Electron. Mater.*, vol. 51, n° 6, p. 3276-3287, juin 2022, doi: 10.1007/s11664-022-09577-9.
- [3] S. Zahiri, Z. Xu, Y. Hu, H. Bao, et Y. Shen, « A semi-Lagrangian method to solve the nongray phonon Boltzmann transport equation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 138, p. 267-276, août 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.056.
- [4] V. N. Kürschner, A. W. Spengler, et K. V. Paiva, « Thermoelectric energy harvesting associated with heat pipes for monitoring highways weather conditions », *Discov. Mech. Eng.*, vol. 3, n° 1, p. 24, août 2024, doi: 10.1007/s44245-024-00056-5.

Offre de thèse

Titre : Modélisation multiphysique particulière de l'effet Seebeck pour la récupération d'énergie – application pour systèmes de surveillance des structures (SHM)

Mots clé : Effet Seebeck, Récupération d'énergie, Générateurs thermoélectriques, Modélisation multiphysique, Physique statistique, Physique particulière, Méta-matériaux

La récupération d'énergie ambiante représente une solution prometteuse pour l'alimentation autonome des capteurs dans les systèmes de surveillance de santé des structures (SHM - Structural Health Monitoring). L'un des phénomènes thermiques les plus intéressants pour cette application est l'effet Seebeck, qui permet de convertir la différence de température entre deux matériaux conducteurs en une différence de potentiel électrique. Ce phénomène offre des possibilités de générer de l'énergie à partir de sources thermiques faibles, comme celles présentes dans les environnements industriels, environnementaux ou dans les infrastructures. L'effet Seebeck qui a été largement étudié dans le domaine des matériaux thermoélectriques, mais son application spécifique à la récupération d'énergie ambiante pour l'auto-alimentation des capteurs dans le cadre des systèmes SHM reste relativement peu explorée. Les recherches existantes montrent qu'il est possible de concevoir des modules thermoélectriques de petite taille capables de capter la chaleur ambiante, comme celle générée par la température ambiante, les gradients thermiques dans les structures ou encore les variations de température dues à des conditions environnementales fluctuantes.

En ce sens, l'intégration de dispositifs d'alimentation thermoélectriques pour l'alimentation des capteurs [1], et en particulier l'exploitation de l'effet Seebeck, offre un potentiel de solution durable et sans entretien. Cependant, la modélisation de l'effet Seebeck, tenant compte de la géométrie des capteurs, de l'environnement thermique et des propriétés des matériaux utilisés, reste un défi majeur.

Les modèles existants de récupération d'énergie thermique dans les systèmes SHM, tels que ceux fondés sur la thermodynamique ou l'électrothermique, nécessitent des améliorations pour mieux prédire les performances dans des conditions variées et dans des environnements réels [2]. Plusieurs études se sont concentrées sur les aspects expérimentaux de ces systèmes, mais peu ont abordé une modélisation complète, prenant en compte non seulement l'effet Seebeck, mais aussi les interactions thermiques et électriques dans un système intégré SHM.

Le principal objectif de cette thèse est de développer une approche de modélisation et de simulation complète et précise de l'effet Seebeck pour la récupération d'énergie ambiante, spécifiquement appliquée aux systèmes SHM. Ce travail s'articulera autour de trois axes principaux :

- Modélisation/simulation multi-physique (physique statistique et particulière) [3] : Élaboration d'un modèle hybride thermique-électrique qui décrit la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique via l'effet Seebeck, tout en tenant compte des pertes thermiques et des contraintes physiques dans les structures SHM.
- Optimisation des méta-matériaux thermoélectriques : Étude des matériaux thermoélectriques adaptés aux conditions des structures surveillées. Cela comprendra une analyse des coefficients de Seebeck, de la conductivité thermique et électrique des matériaux disponibles, ainsi que des impacts de leur choix sur les performances du système.
- Implémentation dans les systèmes SHM : Conception d'un prototype de capteur SHM alimenté par effet Seebeck et évaluation de son efficacité dans des conditions réelles de surveillance [4]. Ce prototype servira de banc d'essai pour la validation des modèles théoriques.

En conclusion, la présente thèse propose d'explorer la modélisation de l'effet Seebeck pour la récupération d'énergie ambiante dans le cadre des capteurs SHM, dont l'alimentation est cruciale pour le bon fonctionnement et la fiabilité des systèmes de surveillance. En s'appuyant sur des techniques avancées de modélisation thermique et électrique, cette thèse cherchera à optimiser l'efficacité énergétique des dispositifs thermoélectriques intégrés dans des capteurs sans fil pour SHM. En outre, elle analysera les conditions dans

lesquelles ces systèmes peuvent fonctionner de manière autonome sur de longues périodes, contribuant ainsi à la durabilité et à la rentabilité des systèmes SHM.

Environnement : COSYS/SII (Université Gustave Eiffel) & Inria

Profil du candidat : Étudiant en Master 2 ou en école d'ingénieur ou équivalent dans les domaines de la modélisation multiphysique, physique statistique et particulaire, des méta-matériaux. Compétences et qualités souhaitées : - Intérêt pour la dynamique des structures - Bases solides en mathématiques - Motivation pour la modélisation numérique en mécanique - Curiosité pour l'intelligence artificielle et la programmation (Python, MATLAB) - Autonomie, rigueur et esprit scientifique.

Candidature : En ligne sur le site de l'Université Gustave Eiffel ([lien](#)). La date limite pour candidater est le 15/04/2026.

Contacts :

- Romain NOËL : romain.noel@univ-eiffel.fr
- Christophe DROZ : christophe.droz@inria.fr
- Julien LE SCORNEC : julien.le-scornec@univ-eiffel.fr

Références

- [1] H. Xie, Y. Zhang, et P. Gao, « Thermoelectric-Powered Sensors for Internet of Things », *Micromachines*, vol. 14, n° 1, p. 31, janv. 2023, doi: 10.3390/mi14010031.
- [2] K. Huang et F. Edler, « Multiphysics Simulation of Seebeck Coefficient Measurement », *J. Electron. Mater.*, vol. 51, n° 6, p. 3276-3287, juin 2022, doi: 10.1007/s11664-022-09577-9.
- [3] S. Zahiri, Z. Xu, Y. Hu, H. Bao, et Y. Shen, « A semi-Lagrangian method to solve the nongray phonon Boltzmann transport equation », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 138, p. 267-276, août 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.056.
- [4] V. N. Kürschner, A. W. Spengler, et K. V. Paiva, « Thermoelectric energy harvesting associated with heat pipes for monitoring highways weather conditions », *Discov. Mech. Eng.*, vol. 3, n° 1, p. 24, août 2024, doi: 10.1007/s44245-024-00056-5.