

## Characterization at the nanometer scale of the electromechanical conversion properties of piezoelectric nanostructures: methodologic developments and instrumentation

**Laboratories:** Group of Electrical Engineering of Paris (GeePs)  
 Center for Nanosciences and Nanotechnologies (C2N)

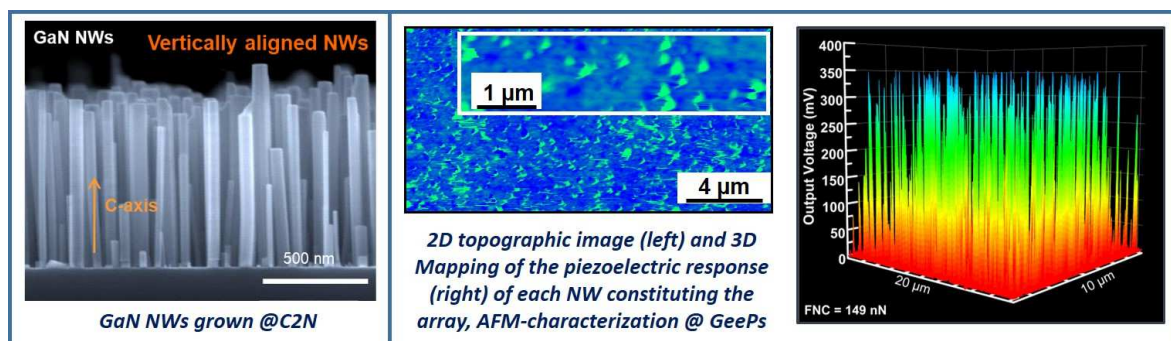
**Supervisor:** Frédéric Houzé, [frederic.houze@geeps.centralesupelec.fr](mailto:frederic.houze@geeps.centralesupelec.fr)  
 Pascal Chretien, [pascal.chretien@geeps.centralesupelec.fr](mailto:pascal.chretien@geeps.centralesupelec.fr)

**Co-supervisor:** Noelle GOGNEAU, [noelle.gogneau@c2n.upsaclay.fr](mailto:noelle.gogneau@c2n.upsaclay.fr)

### Description and objective

With the unbridled multiplication of mobile electronic devices, often connected and increasingly miniaturized, the development of compact and autonomous energy sources represents a major challenge. Technological advances in micro-nano-fabrication offer new prospects for designing and developing autonomous power systems based on the harvesting of renewable energies. From this point of view, nanomaterials with exalted piezo-, ferro-, or triboelectric properties due to their dimensions, appear to be a very promising solution for converting mechanical energy present around the device to be powered in the form of vibrations, mechanical deformations, body movements, wind, etc. into electrical energy. The development of generators integrating such nanomaterials is the subject of a vast research project started in January 2020 involving laboratories within the "LabEx NanoSaclay", an interdisciplinary cluster dedicated to nanosciences and nanotechnology.

Optimising the development and the nanostructuring of these materials requires a decisive step upstream to finely characterize the conversion properties at the proper scale of the considered nano-objects (nanowires, nanoparticles, etc.). During previous work devoted to the study of piezoelectric nanowires of GaN, two of the consortium's laboratories, GeePs and C2N, have demonstrated that the implementation of a conductive tip AFM with specifically adaptations is a tool of choice to apply a mechanical stress on nanowires individually and measure the piezoelectric conversion resulting from their local deformation. This advanced nanocharacterization tool combines the advantages of the nanometric resolution of the AFM with the high-sensitivity real-time electrical measurements of a "Resiscope" module modified to follow the evolution of the voltage generated by the nanowires across a given resistive load. Two configurations were used in a first approach: (i) scanning of the tip on the sample in permanent contact mode, allowing mapping the piezo-generated voltage when the nanowires are stressed in flexion, and (ii) current-voltage spectroscopy localized on few nanowires to finely study the Schottky tip/nanowire contact. Recently, a new configuration has been implemented, based on scanning in intermittent, low frequency contact mode of pulsed force type; this innovation gives access to piezo-generation mapping under well controlled axial compression of the nanowires.



This last configuration, unique in the world and whose first results are particularly promising will serve as a basis for the new methodological and instrumental developments planned in the thesis. Two main axes will be addressed:

- To fully exploit the possibilities of the intermittent mode, by simultaneously measuring the local mechanical properties of nanomaterials (Young's modulus, deformation...) and thus to study, for the first time, the fine correlations between the mechanical, electrical and conversion properties of active nanomaterials;

- To quantify more realistically the energy harvested. For this purpose, a new electronic structure of the Resiscope module will be developed in order to measure, not a voltage at the terminals of a resistor, but the quantity of charges generated by the nanomaterials in response to their mechanical inputs. This new evolution of the AFM-Resiscope module should ultimately make it possible to characterize the electromechanical coupling properties of the nanowires and nanoparticles of the various materials considered in the project, and thus to guide the development of generators for particular applications.

**Profile and skills required:** Required qualification include a Master 2 degree (or an Engineering School Diploma) with a specialization in Sensors, Measurement and Instrumentation. The candidate must also have a good background in Nanosciences and Nanotechnologies and/or Materials Physics, as well as a strong appeal for experimental work and data analysis. A previous experience using Atomic Force Microscopy (AFM) would be a significant benefit. Qualities such as rigour, pragmatism, enjoy teamwork, but also autonomy are expected. Good skills in scientific English will be essential for the promotion of the work (writing articles, participation in conferences).

## Caractérisation à l'échelle nanométrique des propriétés de conversion électromécanique de nanostructures piézoélectriques : développements méthodologiques et instrumentaux

**Laboratoires :** laboratoire de Génie électrique et électronique de Paris (GeePs)  
Centre de Nanosciences et Nanotechnologies (C2N)

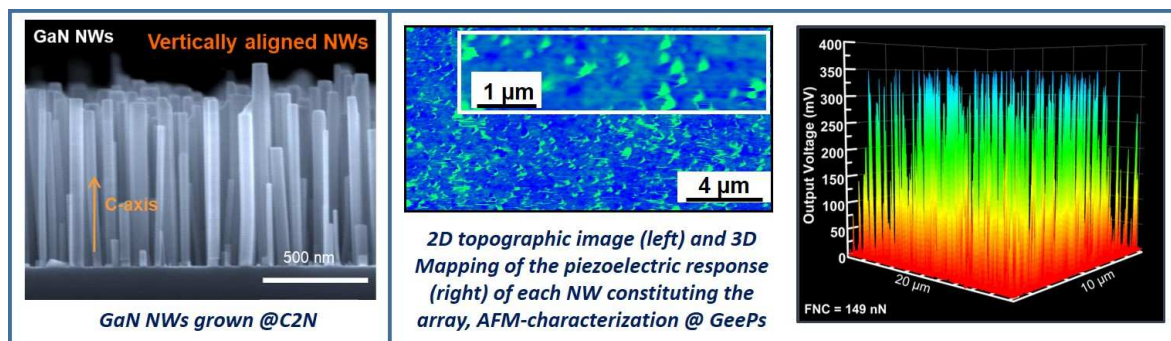
**Encadrants :** Frédéric Houzé, [frederic.houze@geeps.centralesupelec.fr](mailto:frederic.houze@geeps.centralesupelec.fr)  
Pascal Chretien, [pascal.chretien@geeps.centralesupelec.fr](mailto:pascal.chretien@geeps.centralesupelec.fr)

**Co-encadrant :** Noelle GOGNEAU, [noelle.gogneau@c2n.upsaclay.fr](mailto:noelle.gogneau@c2n.upsaclay.fr)

### Description et objectifs

Avec la multiplication effrénée d'objets électroniques nomades souvent connectés et de plus en plus miniaturisés, le développement de sources d'énergie compactes et autonomes représente un enjeu majeur. Les avancées technologiques en micro-nano-fabrication offrent de nouvelles perspectives pour concevoir et mettre au point des systèmes d'alimentation autonomes basés sur la récupération des énergies renouvelables. De ce point de vue, des nanomatériaux dont les propriétés piézo-, ferro-, ou triboélectriques sont exaltées du fait de leurs dimensions, apparaissent comme une solution très prometteuse pour convertir en énergie électrique l'énergie mécanique présente autour du dispositif à alimenter sous forme de vibrations, déformations mécaniques, mouvements du corps, vent, etc. Le développement de générateurs intégrant de tels nanomatériaux fait l'objet d'un vaste projet de recherche démarré en janvier 2020 réunissant 6 laboratoires du LabEx NanoSaclay.

Optimiser l'élaboration et la nanostructuration de ces matériaux requiert en amont une étape décisive de caractérisation fine des propriétés de conversion, à l'échelle des nano-objets considérés (nanofils, nanoparticules...). Lors de travaux antérieurs consacrés à l'étude de nanofils piézoélectriques de GaN, deux des laboratoires du consortium, GeePs et C2N, ont démontré que la mise en œuvre d'un AFM à pointe conductrice spécifiquement adapté constitue un outil de choix pour solliciter individuellement les nanofils et mesurer la conversion piézo-électrique résultant de leur déformation locale. Cet outil de nanocaractérisation avancé combine les avantages de la résolution nanométrique de l'AFM et des mesures électriques en temps réel à haute sensibilité d'un module « Résiscope » modifié pour suivre aux bornes d'une charge résistive donnée l'évolution de la tension générée par les nanofils. Deux configurations ont été exploitées dans un premier temps : (i) le balayage en mode contact permanent de la pointe sur l'échantillon, permettant la cartographie de la piézogénération lorsque les nanofils sont sollicités en flexion, et (ii) la spectroscopie courant tension en s'arrêtant localement sur quelques nanofils pour étudier finement le contact Schottky pointe/nanofil. Récemment, une nouvelle configuration a été mise en œuvre, basée sur un balayage en mode contact intermittent basse fréquence de type force pulsée, donnant accès cette fois à une cartographie de la piézo-génération sous une compression axiale bien contrôlée des nanofils.



Cette dernière configuration, unique au monde et dont les premiers résultats sont particulièrement prometteurs, va servir de base aux nouveaux développements méthodologiques et instrumentaux envisagés dans la thèse. Deux axes principaux seront abordés :

- Exploiter pleinement les possibilités du mode intermittent, en mesurant simultanément aux propriétés électriques, les propriétés mécaniques locales des nanomatériaux (module d'Young, déformation...) et donc d'étudier, pour la première fois, les corrélations fines entre les propriétés mécaniques, électriques et de conversion des nanomatériaux actifs ;

- Quantifier de manière plus réaliste l'énergie récoltée. Pour cela, une nouvelle structure électronique du module Resiscope sera développée afin de mesurer non plus une tension aux bornes d'une résistance mais la quantité de charges générées en réponse aux sollicitations mécaniques appliquées aux nanomatériaux. Cette nouvelle évolution du module AFM-Resiscope devra permettre in fine de caractériser les propriétés de couplage électromécanique des nanofils et nanoparticules des différents matériaux considérés dans le projet, et ainsi d'orienter l'élaboration des générateurs pour des applications particulières.

**Profil et compétences recherchées :** Titulaire d'un Master 2 (ou d'un diplôme d'École d'ingénieur) avec spécialisation en Capteurs, Mesures et Instrumentation, le (la) candidat(e) doit avoir également de bonnes connaissances en Nanosciences et Nanotechnologies et/ou en Physique des Matériaux, ainsi qu'un goût prononcé pour le travail expérimental et le traitement de données. Une expérience en microscopie à force atomique (AFM) serait un plus fortement apprécié. Des qualités telles que rigueur, pragmatisme, goût du travail en équipe, mais aussi autonomie sont attendues. Une bonne maîtrise de l'anglais scientifique est indispensable pour la valorisation des travaux (rédaction d'articles, participation à des conférences).