

## HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Électronique

Année universitaire 2024/2025

Présentée et soutenue publiquement par

Kevin NADAUD

Le 15 mai 2025

### **Mise en place et utilisation de méthodes de mesures électriques linéaires et non-linéaires pour la caractérisation de matériaux fonctionnels et de dispositifs associés**

#### **Jury :**

<b>Prénom</b>	<b>NOM</b>	<b>Grade</b>	<b>Établissement d'exercice</b>
Daniel	Alquier	Professeur des universités	Université de Tours
Christelle	Aupetit-Berthelemot	Professeure des universités	Université de Limoges
Jérôme	Billoué	Professeur des universités	Université de Tours
Philippe	Ferrari	Professeur des universités	Université Grenoble Alpes
Brice	Gautier	Professeur	INSA de Lyon
Nathalie	Malbert-Saysset	Professeure des universités	Université de Bordeaux
Farid	Medjdoub	Chargé de recherche HDR	CNRS, université de Lille



## Résumé

L'Habilitation à Diriger des Recherches est l'occasion de faire le point sur les travaux depuis la thèse et aussi de se poser la question sur le domaine d'expertise qui nous caractérise.

En ce qui me concerne, le fil conducteur est la caractérisation électrique de matériaux et de dispositifs, en se basant sur des méthodes linéaires et non-linéaires. Comme cela va être présenté dans ce mémoire, l'origine de cette approche provient de ma formation initiale en électronique hyperfréquence, donc à l'origine plus proche de l'aspect instrumentation/mesure que de l'aspect matériau qui est venu par la suite.

Avant de présenter par la suite le contenu technique, je rappelle ici le contexte d'exercice depuis ma thèse de doctorat jusqu'aux différentes thématiques qui vont être abordées dans ce mémoire. Ces travaux sont bien entendu le fruit de travail collectif, et je présente une petite partie d'entre eux, à travers un aspect qui est celui que je maîtrise et que j'ai choisi comme fil conducteur.

## Contexte d'exercice

Mon parcours professionnel a commencé avec ma thèse au sein du laboratoire IETR à l'Université de Nantes, qui s'est déroulé de octobre 2012 à octobre 2015, sous la direction des professeurs Hartmut W. Gundel, Raphaël Gillard et de la docteure Caroline Borderon. Le sujet de cette thèse était l'utilisation de matériaux ferroélectriques pour des applications hyperfréquences, plus particulièrement des antennes à réseaux réflecteurs. Lors de cette thèse, j'ai pu mettre en application les connaissances en électronique hyperfréquence et en conception d'antenne issues de la formation que j'ai suivie en école d'ingénieur à l'INSA de Rennes. Le défi de cette thèse a été l'apprentissage d'un nouveau domaine de l'électronique que je n'avais pas eu l'occasion d'aborder avant, à savoir la fabrication, la caractérisation et l'utilisation de matériaux ferroélectriques. Ces compétences incluent en particulier la maîtrise des outils de caractérisation des mouvements de parois de domaines ferroélectriques par spectroscopie d'impédance. Lors de cette thèse, j'ai aussi appris à maîtriser les procédés de fabrication en salle blanche, largement utilisés en microélectronique. Les principaux enjeux concernaient la mesure des propriétés des couches minces ferroélectriques élaborées, leur optimisation en termes de pertes et de facteur d'accordabilité et leur intégration dans des cellules de réseaux réflecteurs.

Suite à cette thèse, j'ai effectué un post-doctorant d'une durée de 10 mois au sein du laboratoire XLIM, sous l'encadrement du professeur Pierre Blondy, en partenariat avec Airbus Defence & Space. Le sujet de post-doctorat était l'utilisation de MEMS (MicroElectroMechanical Systems) pour des applications hyperfréquences. Ce post-doctorat a consisté à de la simulation de MEMS, leur fabrication en salle blanche et à la caractérisation électrique des composants réalisés. Les enjeux principaux concernaient la tenue en puissance des composants, leur fiabilité ainsi qu'à la variation de capacité atteignable.

L'affectation à l'Université de Tours en tant que maître de conférences s'est faite en septembre 2016. Concernant l'aspect enseignement, j'interviens dans le département GEII à l'IUT de Tours et au sein du GREMAN (Groupe de Recherche En Matériaux Microélectronique Acoustique et Nanotechnologies) pour l'aspect recherche. Pour l'enseignement, j'interviens principalement dans les modules d'électroniques, de capteurs, d'instrumentation et de physique ainsi que dans l'encadrement des projets et dans le suivi des stages et des apprentis.

## Présentation synthétique des activités de recherche

Concernant l'aspect recherche, j'ai été amené à travailler dans l'équipe ÉCOSYM (Énergie, COmposants, SYstèmes et Microélectroniques), dans un premier temps sur la thématique de la récupération d'énergie mécanique à l'aide de nano-fils d'oxyde de zinc. Sur cette thématique, je travaille essentiellement sur les aspects de caractérisations électriques, en plus de l'encadrement des doctorants et des post-doctorants. En parallèle, j'ai continué de travailler sur la caractérisation des mouvements de parois de domaines dans les matériaux ferroélectriques avec des collaborations en interne avec les collègues du laboratoire (équipe oxyde) mais aussi avec des partenaires extérieurs.

Plus récemment, je m'implique dans la thématique de recherche sur les matériaux à large bande interdite (faisant aussi partie de l'équipe ÉCOSYM) pour des applications de conversion d'énergie et hautes fréquences.

### **Thématique récupération d'énergie**

Dans cette thématique de recherche, je m'implique principalement dans la caractérisation électrique des générateurs piézoélectriques. Au cours des premières années, j'ai amélioré la caractérisation électrique des générateurs en automatisant le banc de mesure grâce au pilotage par ordinateur des appareils (oscilloscope, ampère-mètre, résistances variables, générateur de force) à l'aide de programmes en langage python. L'automatisation du banc de caractérisation permet d'obtenir des mesures plus complètes et de faire varier les paramètres de sollicitations dans de plus larges gammes (résistance de charge, force appliquée, fréquence). En parallèle de la modification du banc, j'ai été moteur dans la modélisation électrique des générateurs. Cette modélisation a été nécessaire pour intégrer leur comportement dans une chaîne de conversion d'énergie complète (redressement et conditionnement puis stockage).

### **Thématique matériaux ferroélectriques**

En parallèle des travaux sur la récupération d'énergie, j'ai continué à travailler sur les caractérisations électriques des matériaux ferroélectriques. Les matériaux ferroélectriques sont des matériaux fortement non-linéaires et donc nécessitant des méthodes de mesures particulières. Les mesures électriques sur ces matériaux peuvent se faire à forts champs électriques (au dessus du champ coercitif) ou à faibles champs électriques (en dessous du champ coercitif).

Dans cette thématique je me suis concentré sur la mise place d'outils et de méthodes de caractérisation non-linéaires spécifiques aux ferroélectriques. Cela a consisté notamment à implémenter des méthodes de caractérisation forts champs, relativement classiques, avec les équipements présents au sein du laboratoire. La seconde partie de mon travail a consisté en la mise en place des méthodes à faibles champs qui sont beaucoup moins courantes et font partie désormais d'une spécificité du laboratoire. Ces méthodes et les outils d'analyses des données associées (principalement des codes python) font maintenant partie des méthodes de routine. Cette thématique a commencé lors de ma thèse mais a pris toute son ampleur les dernières années par la mise en place de ces outils au sein du GREMAN.

### **Thématique matériaux à large bande interdite**

Depuis 2021, je suis impliqué également dans la thématique de recherche sur les matériaux semi-conducteurs à large bande interdite. Cette thématique de recherche est présente dans le laboratoire depuis de nombreuses années. Elle a été renforcée récemment par la proximité de l'entreprise STMicroelectronics et le lancement d'une ligne de production de composants à base de nitrure de gallium (GaN). Cette implication se traduit par le démarrage du projet Européen GaN4AP ainsi que de la thèse de Zihao Lyu, sur le projet région GaNPIN. Ce projet a commencé en novembre 2021 et concerne la fabrication et la caractérisation de diodes à base de GaN pour des applications hyperfréquences.