



# GeePs

Génie électrique et électronique de Paris

## LABORATOIRE GEEPS THÈSES 2018



université  
PARIS-SACLAY



GeePs UMR CNRS 8507 CentraleSupélec Université Paris-Saclay  
Sorbonne Université

## Abdoulaye Sarr

### Amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un actionneur électrique à réluctance variable

Le travail proposé dans cette thèse porte sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la sûreté de fonctionnement de la Machine à Réluctance Variable (MRV). D'abord, nous avons présenté la commande de la MRV en modes moteur et générateur débitant sur bus continu. Pour le mode moteur, on cherche à réguler la vitesse de rotation et le couple, alors qu'en mode générateur, l'objectif de la commande est de maintenir constante la tension du bus malgré les fluctuations de la vitesse et de la charge. Une démarche itérative est proposée pour la maximisation du rendement global. Trois paramètres de réglage ont été choisis : L'angle d'amorçage ( $\Psi$ ), l'angle de conduction ( $\Theta_p$ ) et le courant de référence des phases ( $I_{ref}$ ). L'efficacité de l'algorithme est évaluée à travers des simulations et des tests expérimentaux. Un rendement global maximal de 70% est atteint pour des vitesses et couples élevés. Ensuite, on s'est intéressé à la connexion de la Génératrice à Réluctance Variable (GRV) au réseau alternatif monophasé ou triphasé dans le cadre d'une application éolienne. La tension continue à la sortie de la GRV est convertie en une tension alternative par un convertisseur DC-AC. Le premier objectif est de maintenir la tension du bus continu à sa valeur nominale; le second est de contrôler la qualité du courant injecté dans le réseau. En monophasé, trois types de correcteur sont testés pour réguler le courant sinusoïdal (un correcteur PI, un correcteur Résonant et un correcteur Proportionnel-Résonant). En triphasé, une commande VQ dans le référentiel de Park est adoptée: La tension du bus continu est contrôlée à travers le courant  $i_d$  et la puissance réactive est contrôlée par le courant  $i_q$ . Les résultats de simulation montrent qu'on obtient des courants quasi-sinusoïdaux avec un taux de distorsion harmonique inférieur à 1% aussi bien en monophasé qu'en triphasé. Enfin, pour améliorer la sûreté de fonctionnement de l'actionneur et réduire les coûts liés à l'utilisation de capteurs mécaniques, trois stratégies de commande sans capteur de position sont présentées. La première est basée sur la technique d'injection. La deuxième repose sur l'estimation du flux. La troisième s'appuie sur les observateurs adaptatifs. On trouve que la technique d'injection et la méthode basée sur la mesure du flux fonctionnent de façon complémentaire. La première est efficace en basses vitesses et ne dépend pas de la charge, la deuxième est performante en hautes vitesses et pour des charges élevées. L'observateur adaptatif proposé assure une convergence exponentielle de la position malgré le modèle analytique simplifié de l'inductance utilisé pour la synthèse. Son principal avantage réside dans sa robustesse aux variations paramétriques et au couple de charge qui est estimé.

**Mots-Clés :** MRV, Correcteur résonant, Optimisation, Commande sans capteur, Observateurs adaptatifs, GRV

### Improvement of the functional safety of a Switch Reluctance Actuator

The work proposed here focuses on the improvement of the energy efficiency and the safety of the Switched Reluctance Machine (SRM). First, the control of the SRM in motor and generator modes is presented. In motor mode, the speed and the torque are regulated, while in generator mode, the objective is to keep constant the DC bus voltage. An iterative optimization algorithm is proposed for maximizing the global efficiency. The analysis of the electromechanical energy conversion has shown that there is an optimal combination of the control variables - turn on angle ( $\Psi$ ), conduction angle ( $\Theta_p$ ) and reference current ( $I_{ref}$ ) – to maximize the efficiency. The strategy is evaluated using intensive numerical simulations and experimental validation. Thanks to the optimization, the global efficiency reaches 70% almost from half the nominal speed to the maximum speed. Then, the Switched Reluctance Generator (SRG) is used as an AC generator for a Wind Energy Conversion (WEC) application. The produced DC power is converted into AC power by means of voltage inverter and delivered to the AC grid. The first issue of the WEC control is to maintain constant the output DC voltage despite the wind speed variations and the load uncertainty. The second issue is to control the quality of the current. In single-phase AC network, three controllers are tested to regulate the AC current (PI controller, Resonant controller, Proportional-Resonant controller). In three-phase AC network, a VQ control in Park's frame is adopted: The DC bus voltage is controlled through the direct current and the reactive power injected into the grid is controlled through the quadrature current. Simulation results show that quasi-sinusoidal currents with a harmonic distortion rate less than 1% are obtained in both cases. Finally, we address the problem of sensorless control. In fact, the control of the SRM requires that the rotor position is known. A mechanical encoder is used generally to measure the position. The elimination of this position sensor would reduce the cost and packaging requirements of the drive. Three methods to estimate the rotor position are presented. The first one named inductance-method is an active as it is based on the pulse injection technique. The second one named flux-method is a passive one as it used the current measurement. The third one is based on the state observers for the flux, position, and velocity and load torque estimation. The simulations results have shown that the inductance-based method is efficient in low speed region and the flux-based one is more efficient in high-speed region. It is also shown that, observers are exponentially convergent even when a simple analytical modelling, that neglects saturation effect, is used to design the observer.

**Keywords:** Adaptive observer, Sensorless control, Optimisation, Resonant controller, SRG, SRM

## Ahmed Abudabbousa

### Approche pour la mesure de la différence de temps (TDOA) à partir de trames OFDM

Cette thèse présente une solution originale permettant d'extraire, à partir de signaux de communication OFDM, l'information liée à la différence de temps d'arrivée (TDOA) entre deux émetteurs très proches et un récepteur. Cette méthode, qui s'avère super-résolutive, permet d'extraire des TDOA en dessous de la limite de Rayleigh fixée par la bande passante utile. Dans ce travail, nous effectuons, à l'aide d'une sortie simple à entrées multiples, la caractérisation et la modélisation des canaux pour l'estimation TDOA. En gérant ces réponses ce canal de fréquence de canal de différentes manières, nous minimisons différentes fonctions de coût exprimées comme la différence entre la réponse de canal mesurée et un modèle direct prédéfini. Pour la validation, la simulation basée sur différentes topologies présente des résultats soulignant la propriété de super-résolution d'une telle approche. La performance de l'estimation TDOA proposée est comparée à la bande inférieure de Cramer-Rao. Les effets de la propagation par trajets multiples sont pris en compte et certaines solutions proposées sont discutées et simulées. De plus, la partie expérimentale de ce travail valide à la fois les modèles directs et inverses dans différentes configurations de canaux.

**Mots-Clés :** TDOA, OFDM, MISO, CSI

### OFDM based Time Difference Of Arrival Estimation

This thesis presents an original solution for extracting, from OFDM communication signals, the information related to the time difference of arrival (TDOA) between two closed transmitters and one receiver. This solution, which shows to be super-resolution, makes it possible to extract TDOA below the Rayleigh limit set by the useful bandwidth. In this work, we perform, using a Multiple Inputs Simple Output, channel characterization and modeling for TDOA estimation. By handling these channel frequency responses in different ways, we minimize different cost functions expressed as the difference between measured channel response and a predefined direct model. For validation, the simulation based on different topologies exhibit results is compared to the Cramer Rao Lower Band. The effects of the multipath are taken into account and some proposed solutions are discussed and simulated. Moreover, the experimental part of this work validates the direct and inverse models in different channel configurations.

**Keywords:** TDOA, OFDM, MISO, CSI

## Alexandre Mas

### Convertisseur analogique-numérique large bande avec correction mixte

Les besoins en débit d'information à transmettre ne cessent de croître. Aussi la généralisation des émetteurs-récepteurs large-bande implique l'intégration de solutions sur une technologie silicium CMOS afin que leur coût soit compatible avec une application grand public. Si l'intégration massive des traitements numériques est facilitée par les dernières technologies CMOS, la fonction de conversion analogique-numérique est quant à elle plus difficile. En effet, afin d'optimiser l'étage frontal analogique, le convertisseur analogique-numérique (CAN) doit répondre à des contraintes très fortes en termes de largeur de bande (de l'ordre du GHz) et de résolution (de 10 à 14 bits). Les convertisseurs analogique-numérique basés sur l'entrelacement temporel (CAN-ET) connaissent un essor remarquable car ce sont aujourd'hui les seuls à pouvoir répondre aux deux contraintes énoncées ci-dessus. Cependant, cette structure de CAN reste sensible aux défauts d'appariement entre ses différentes voies de conversion et voit ses performances limitées par la présence de raies parasites liées à des erreurs statiques (offset et gain) et dynamiques (skew et bande passante). Pour réduire l'impact des erreurs dynamiques, nous avons implémenté une calibration mixte en technologie FD-SOI 28nm. Dans une première partie, un état de l'art portant sur les différentes techniques de minimisation et de compensations analogiques des erreurs de skew et bande passante est réalisé. A partir de cette étude, nous proposons différentes techniques analogiques pour compenser les désappariements de bande passante et de skew. Pour compenser le skew, nous profitons des avantages de la technologie FD-SOI en modulant fortement la tension de la face arrière d'un ou plusieurs transistor(s) d'échantillonnage. Concernant l'erreur de bande passante, nous proposons d'ajuster la résistance équivalente du T/H en adaptant la résistance à l'état passant des transistors d'échantillonnage de cinq manières différentes. Pour définir parmi toutes les compensations proposées celle qui est la plus adaptée à nos besoins, nous comparons différents critères de performance. Après avoir identifié la meilleure compensation de skew et de bande passante, nous avons, dans une dernière partie, implémenté une calibration mixte des erreurs statiques et dynamiques où l'estimation numérique est basée sur la méthode des Moindres Carrés.

**Mots-Clés :** Conversion Analogique-Numérique (CAN), Calibration mixte, Entrelacement temporel, Technologie silicium FD-SOI

### Mixed calibration for high speed analog-to-digital converters

Data transmission requirements are ever more stringent, with respect to more throughput, less power consumption and reduced cost. The cable TV market is where broadband transceivers must continuously innovate to meet these requirements. In these transceivers, the analog front-end part must be adapted to meet the increasingly tighter specifications of the newest standards. A key bottleneck is the Analog-to-Digital Converter (ADC), which must reach a sampling rate of several Gigasamples per second at effective conversion resolutions in the range of 10 to 14 bits. Among the possible choices, converters based on Time-Interleaving (TI-ADC) are experiencing remarkable growth, and today they appear to be the best candidates to meet the two constraints set out above. However, TI-ADCs are hampered by mismatches between its different conversion channels, which result in degraded performance due to the appearance of mismatch spurs in the frequency domain, arising both from static errors (gain and offset mismatch) and dynamic (skew and bandwidth) errors. To reduce these errors, we have investigated a mixed-domain calibration strategy for TI-ADCs in 28nm FDSOI technology. We strongly focused the analog compensation of dynamic errors. This report begins with a review of the state-of-the-art w.r.t. the mismatch reduction and analog compensation techniques for both dynamic errors. Based on these results, we then introduce a variety of analog techniques aimed at compensating the bandwidth and skew mismatches. In order to compensate for the skew, we make the most of the FD-SOI technology by tightly regulating the voltage of the back gate of one or several sampling transistors. For the bandwidth error, we recommend that the T/H equivalent resistor be adjusted, adapting the on-resistor of the sampling transistors using up to five different techniques. Once the most appropriate skew and bandwidth compensations were identified, we ultimately implemented a mixed calibration of static and dynamic errors along with a digital calculation based upon the "Least-Squares" method.

**Keywords:** Analog to Digital Converter (ADC), Mixed Calibration, Time Interleaved, FDSOI technology

## Amine Rabehi

### Système électromagnétique de détection de nanoparticules magnétiques dans une structure microfluidique pour l'immunodétection

La détection et quantification d'agent biologique occupe une place prépondérante dans la prévention et la détection des dangers possibles pour la santé publique (épidémie ou pandémie), l'environnement ainsi que d'autres risques contextuelles (bioterrorisme, armes biologique ou chimiques...etc.). Par conséquent, le développement d'un système portable et à moindre coût permettant de détecter ces dangers constitue l'axe de recherche pluridisciplinaire de la collaboration entre différents laboratoires de l'UPMC (Paris 6) et « RWTH university » à Aachen en Allemagne. Dans ce projet, nous avons étudié les aspects pluridisciplinaires d'un microsystème (LoC) électromagnétique de détection immunologique basé sur l'utilisation de nanoparticules magnétiques (MNP). En raison de leur extractabilité et de leur triabilité, les MNP sont adaptées à l'examen d'échantillons biologiques, servant de marqueurs pour des réactions biochimiques. La plupart des techniques classiques de détection existantes sont basées sur des méthodes colorimétrique, fluorescence ou électrochimique qui souffrent en majorité de problème de temps d'analyse et de sensibilité. A cet égard, Les méthodes d'immuno-détection magnétiques constituent une alternative prometteuse. Cette détection est effectuée à l'aide des MNP qui sont spécifiquement bio-fonctionnalisés en surface afin d'être liée à la cible (virus, anticorps...etc). La nouvelle méthode magnétique de mélange de fréquence permet la détection et la quantification de ces MNP avec une grande dynamique. Dans cette thèse, l'effort est dirigé vers la miniaturisation de ce système. Pour ce faire, nous avons développé un ensemble d'outils analytiques et de simulations multiphysiques afin d'optimiser les dimensions des parties électromagnétique (bobines planaires) et microfluidiques. Par la suite, des prototypes de cette structure de détection à partir de bobines en circuits imprimés et de réservoirs microfluidiques en PDMS sont dimensionnés et réalisés. Les performances de ces prototypes ont été évaluées en termes de limite de détection de MNP, linéarité et plage dynamique. En outre, ces prototypes ont permis de valider les outils de dimensionnement réalisés. Une limite de détection de nanoparticules magnétiques de 15ng/mL a été mesurée avec un volume d'échantillon de 14  $\mu$ L correspondant à une goutte de sang. Finalement, la validation du système quant à l'immuno-détection est abordée avec un état de l'art et le développement d'une procédure de fonctionnalisation biochimique de surface ainsi que des premiers tests pour sa validation.

**Mots-Clés :** Détection de pathogènes, Lab-on-Chip, Détection magnétique, Technique de mélange de fréquences, Immunodétection, Microfluidique

### Electromagnetic microsystem for the detection of magnetic nanoparticles in a microfluidic structure for immunoassays

The detection and quantification of a biological agent or entity has become paramount to anticipate a possible health threat (epidemic or pandemic), environmental threat or to combat other contextual threats (bioterrorism, chemical and biological weapons, drugs). Consequently, developing a portable cost effective device that could detect and quantify such threats is the research focus of the joint multidisciplinary project between UPMC (Paris 6) laboratories and RWTH university in Aachen, Germany. In the framework of this project, we have studied the multidisciplinary aspects of an electromagnetic microsystem for immunologic detection based on magnetic nanoparticles (MNP) in a microfluidic lab-on-chip (LoC). Because of their extractability and sortability, magnetic nanoparticles are adapted for examination of biological samples, serving as markers for biochemical reactions. So far, the final detection step is mostly achieved by well-known immunochemical or fluorescence-based techniques which are time consuming and have limited sensitivity. Therefore, magnetic immunoassays detecting the analyte by means of magnetic markers constitute a promising alternative. MNP covered with biocompatible surface coating can be specifically bound to analytes, cells, viruses or bacteria. They can also be used for separation and concentration enhancement. The novel frequency mixing magnetic detection method allows quantifying magnetic nanoparticles with a very large dynamic measurement range. In this thesis, emphasis is put on the miniaturized implementation of this detection scheme. Following the development of analytical and multiphysics simulations tools for optimization of both excitation frequencies and detection planar coils, first multilayered printed circuit board prototypes integrating all three different coils along with an adapted microfluidic chip has been designed and realized. These prototypes have been tested and characterized with respect to their performance for limit of detection (LOD) of MNP, linear response and validation of theoretical concepts. Using the frequency mixing magnetic detection technique, a LOD of 15ng/mL for 20 nm core sized MNP has been achieved with a sample volume of 14  $\mu$ L corresponding to a drop of blood. Preliminary works for biosensing have also been achieved with a state of the art of surface functionalization and a developed proposed biochemical immobilization procedure and preliminary tests of its validation.

**Keywords:** Pathogen sensing, Lab-On-Chip, Magnetic detection, Frequency mixing technique, Immunoassay, Microfluidic

## Artem Baranov

### Cellules solaires à multijonctions par intégration monolithique de nitrures dilués sur substrats d'arséniure de gallium (GaAs) et de silicium (Si) : études des défauts.

Les cellules solaires à multi-jonctions de type III-V possèdent des rendements de conversion de l'énergie très élevés (46%). Cependant, les méthodes de fabrication généralement utilisées sont complexes et coûteuses, notamment pour les cellules solaires non monolithiques associées par des techniques de collage et à structure inversée. Cette thèse vise à augmenter les rendements de conversion des cellules solaires monolithiques à l'aide de méthodes prospectives. Le travail est focalisé sur l'étude des défauts électroniquement actifs dans les matériaux constituant les cellules solaires au moyen de techniques photoélectriques et capacitatives, et il peut être scindé en trois parties. La première partie traite des cellules solaires à simple jonction avec des couches absorbantes non dopées d'alliages InGaAsN de 1 eV de bande interdite de différentes épaisseurs obtenues sous forme de super-réseaux (InAs / GaAsN) par épitaxie à jets moléculaires (MBE) sur des substrats de GaAs. Pour des épaisseurs inférieures à 1200 nm, la concentration de défauts est négligeable et n'affecte pas fortement les propriétés photoélectriques, tandis que pour une épaisseur de 1600 nm, la forte concentration de défauts détectés réduit la durée de vie des porteurs photogénérés, et conduit à une baisse significative du rendement quantique externe et des performances de la cellule. La deuxième partie du travail est consacrée à l'étude de cellules solaires à une et plusieurs jonctions avec des couches actives de (In)GaP(As)N obtenues par MBE sur des substrats respectifs de GaP et de Si. Nous avons trouvé que les cellules solaires de type p-i-n avec des couches actives de GaPAsN non dopé présentaient de meilleures performances que les cellules solaires de type p-n avec des couches actives de GaPAsN dopé n. De plus, les cellules solaires avec une couche d'absorbeur en GaPAsN non dopé présentent de meilleures propriétés photoélectriques et des concentrations de défauts plus faibles que celles avec un absorbeur obtenu à partir de super-réseaux InP / GaPN. Plusieurs niveaux de défauts ont été détectés dans la bande interdite de ces matériaux et leurs paramètres ont été décrits en détail. Nous avons montré qu'un traitement de post-croissance approprié pouvait améliorer la qualité électronique des couches et des cellules solaires. Une cellule solaire à triple jonction a été fabriquée avec des couches actives d'absorbeurs de GaPAsN et de GaPN non dopées. La valeur élevée de la tension de circuit ouvert (>2,2V) atteste du fonctionnement des 3 sous-cellules, mais la performance globale est limitée par les faibles épaisseurs de couches d'absorbeurs. Enfin, la troisième partie du travail est consacrée à l'étude de couches de GaP obtenues sur des substrats de Si à des températures inférieures à 400 ° C par une méthode originale de dépôt de couches atomiques assistée par plasma (PE-ALD). En effet, celle-ci utilise un équipement de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma et elle repose sur l'interaction de la surface avec les atomes de Ga et P provenant respectivement du triméthylgallium et de la phosphine qui sont injectés alternativement. Nous avons également fait croître des couches en utilisant un processus continu (fournissant simultanément les atomes P et Ga) et observé que leurs propriétés électriques et structurales étaient moins bonnes que celles obtenues par la méthode PE-ALD proposée. Nous avons exploré l'influence des conditions de croissance sur les hétérostructures GaP / Si. Nous avons constaté qu'une faible puissance de plasma RF conduit à de meilleures propriétés photoélectriques, structurales et à moins de défauts, grâce à une meilleure passivation du substrat de silicium. En outre, nous avons démontré que, contrairement à des résultats de la littérature utilisant des procédés MBE, la technique PE-ALD n'affecte pas ou très peu les propriétés électroniques des substrats de silicium et aucune désactivation des dopants n'a été observée.

**Mots-Clés :** Composés III-V, Cellules, Hétérostructures

### Multijunction Solar Cells from Monolithic Integration of Dilute Nitrides on Gallium Arsenide (GaAs) and Silicon (Si) Wafers : defect studies

Multi-junction solar cells based on III-V compounds have reached very high power conversion efficiencies (46%). However, the fabrication methods that are generally used are complex and expensive for non-monolithic bonded and inverted solar cells. This thesis is devoted to the study of prospective methods to increase the efficiency of monolithic solar cells. The work is focused on the study of electronically active defects in the materials constituting the solar cells by means of photoelectric and capacitance techniques (admittance spectroscopy, DLTS,...) and it can be divided into three parts. The first part deals with single-junction solar cells wherein the absorber is made of i-layers of 1 eV bandgap InGaAsN compounds with various thicknesses grown as sub-monolayer digital alloys (SDA) of InAs/GaAsN by molecular-beam epitaxy (MBE) on GaAs wafers. The cell with 900 nm thick InGaAsN exhibits the best photovoltaic performance and no defects could be evidenced from capacitance techniques. When the thickness is increased to 1200 nm, defects were detected, but their concentration is low so it did not strongly affect the photoelectric properties. Further increase to 1600 nm of the layer thickness was shown to lead to a higher defect concentration causing a change in the band diagram of the structure and lowering the lifetime of photogenerated carriers. This could explain the drastic drop of the external quantum efficiency, and the overall poor

performance of the solar cell. The second part is devoted to the study of single- and multi-junction solar cells with active layers of (In)GaP(As)N grown by molecular beam epitaxy (MBE) on GaP and Si wafers, respectively. More precisely, the active layers were either quaternary alloys of GaPAsN or SDAs of InP/GaPN. We found that p-i-n type solar cells with active layers of i-GaPAsN showed better performance than p-n type solar cells with active layers of n-GaPAsN due to higher EQE values. Moreover, solar cells with an i-GaPAsN absorber layer show better photoelectric properties and lower defect concentrations, than those with an SDA InP/GaPN absorber layer. Different defect levels were detected by capacitance methods in these materials and their parameters were described in detail. We showed that a suitable post-growth treatment could improve the electronic quality of the GaPAsN layer and the solar cell properties. Also, a triple-junction solar cell was fabricated with active layers of i-GaPAsN and i-GaPN. All subcells were found to be operating, leading to a large open circuit voltage ( $>2.2$  V), but the overall performance is limited by the low value of the quantum efficiency due to low thicknesses of i-layers that should be increased for better absorption. Finally, the third part is devoted to the study of GaP layers grown on Si wafers at temperatures below 400 °C using an original method called plasma-enhanced atomic-layer deposition (PE-ALD). Indeed, it uses a plasma-enhanced chemical vapor deposition equipment and it is based on the alternate interaction of the wafer surface with Ga and P atoms coming from injected trimethylgallium and phosphine, respectively. We also grew layers using a continuous process (providing simultaneously the P and Ga atoms) and observed that their electric and structural properties were poorer than that grown by the proposed PE-ALD method. The influence of growth conditions on the GaP/Si heterostructures was explored. We found that low RF-plasma power leads to better photoelectric, structural and defect-related properties, due to a better passivation of the silicon wafer. In addition, we demonstrated that, contrary to results reported in the literature using MBE processes, our growth process does not affect the electronic properties of phosphorous doped n-Si wafers, while slight changes were observed in boron-doped p-Si wafers containing Fe-related defects, however without deactivation of the doping nor strong degradation of the electronic properties.

**Keywords:** Solar cells, III-V compounds, Heterostructures



## Audrey Michard

### Conception et caractérisation d'un transmetteur électro-optique dans une plateforme photonique sur silicium visant des communications très haut débit

La photonique sur silicium connaît depuis plusieurs années un fort développement avec la démonstration d'importants résultats concernant les interconnexions optiques. En effet, l'explosion du trafic de données au sein des centres de données a nécessité de trouver une solution annexe aux interconnexions métalliques afin de supporter de très hauts débits de transmission, tout en assurant une faible consommation énergétique et un coût raisonnable. Les applications de la photonique se situent d'une part dans le domaine des communications à longue distance entre équipements dont les standards actuels visent un débit de 400 Gb/s, et d'autre part dans le domaine des calculateurs à haute performance afin de réaliser les interconnexions courte distance entre un processeur et une banque de mémoires. STMicroelectronics s'est lancé depuis 2012 dans le développement d'une plateforme photonique sur silicium sur wafers de 300mm. Les principaux objectifs sont : la conception des composants optiques passifs et actifs pour réaliser un transceiver élémentaire à un débit de 20 Gb/s, l'intégration accrue des dispositifs électro-optiques afin de constituer un interposeur photonique, la capacité à gérer plusieurs longueurs d'onde. Dans ce contexte, le sujet de cette thèse porte sur la mise au point d'un circuit de qualification proposant l'intégration d'un transmetteur électro-optique à l'échelle de la puce. Cette solution tire bénéfice de l'architecture de l'assemblage en trois dimensions des éléments constitutifs au sein de l'interposeur et permet de traiter l'hétérogénéité des composants électriques et optiques. Dans ces travaux, nous proposons dans un premier temps d'étudier le modulateur optique. Celui-ci repose sur l'utilisation d'un anneau résonant dont la bande passante est optimisée afin de permettre des débits jusqu'à 50 Gb/s. Dans un second temps, nous décrivons la conception du driver électrique en technologie CMOS 55nm et expliquons le compromis mis en jeu entre la vitesse et la puissance consommée par le transmetteur. Les deux dispositifs sont fabriqués sur des plateformes distinctes, puis caractérisés et analysés par rapport à leur modèle respectif. Puis, nous réalisons une première intégration du transmetteur complet via un assemblage wire-bonding, ce qui nous permet de valider son fonctionnement et d'identifier les difficultés d'une telle co-intégration. Enfin, la dernière partie de la thèse est consacrée à la préparation d'un démonstrateur intégrant, dans un assemblage 3D à base de micro-piliers en cuivre, un lien électro-optique capable de transmettre 16 canaux à 20 Gb/s. Le multiplexage en longueurs d'onde déployé dans ce lien devrait permettre d'atteindre un débit total de 320 Gb/s. De plus, l'étude énergétique du système permet de s'assurer que l'interconnexion finale respectera les contraintes de consommation de puissance.

**Mots-Clés :** Photonique sur silicium, Circuit de qualification, Microélectronique, Intégration hybride

### Design and characterization of an electro-optic transmitter in a silicon photonics platform for high data rate communications

Stimulated by a series of important breakthrough, silicon photonics has been experiencing a significant development for several years. Indeed, due to exponential growth of data traffic inside datacenters, an alternative solution to metallic interconnects has been proposed to address very high transmission rates while ensuring a low energy consumption and a reasonable cost. Promising applications are in the field of both long- and short-distance optical communications. Long-range interconnects between datacenter equipment currently target an aggregate throughput of 400 Gb/s while short-reach interconnects are involved in high performance computers between a processor and a memory bank. STMicroelectronics has been developing a silicon photonic platform on 300 mm wafers since 2012. The main objectives are: the design of passive and active optical components to achieve an elementary 20 Gb/s transceiver, the increased integration of electro-optic devices to form a photonic interposer, the ability to manage several wavelengths. In this context, this PhD report deals with a testchip development at wafer level, proposing the integration of an electro-optic transmitter. This solution benefits from the three dimensions assembly architecture of the dies within the photonic interposer and can handle the heterogeneity of electrical and optical components. This work first proposes to study the optical modulator which is based on a ring resonator. The ring bandwidth is optimized to operate up to 50 Gb/s. Secondly, the 55nm CMOS electrical driver design is described and the trade-off between transmitter speed and power consumption is highlighted. Both devices are fabricated on distinct technological platforms, then characterized and analyzed with respect to their respective models. A first integration of the complete transmitter is assembled through wire-bonding method, which enables to validate the transmitter operation. Finally, the last part of the report is devoted to the preparation of a 3D demonstrator based on micro-copper pillars assembly. The demonstrator integrates a wavelength division multiplexed link with 16 channels, which is expected to achieve a total throughput of 320 Gb/s. In addition, the system study enables to ensure that the final interconnect will respect power consumption constraints.

**Keywords:** Silicon photonics, Testchip, Microelectronics, Hybrid integration



## Camelia Skiribou

### Canal de propagation 5G et mécanisme de contrôle d'intégrité : application à la localisation sûre des rames dans un tunnel

Le développement de toute nouvelle technologie sans fil passe par une phase de simulation système, afin d'identifier les paramètres qui impactent la qualité de transmission et de définir les limites du réseau. Ces simulateurs doivent reposer sur des modèles de canaux précis et réalistes permettant de mieux prédire les indicateurs de performance du système. La future génération des réseaux mobiles 5G, en cours de standardisation pour un déploiement en 2020, n'en est pas une exception. Afin d'assurer une communication optimale en termes de ressources énergétiques et spectrales, la nouvelle génération des terminaux 5G doit être également en mesure de connaître en permanence son environnement. Cela repose sur l'implémentation d'un système de localisation, notamment dans les milieux contraints où les systèmes de positionnement satellitaires ne sont pas disponibles. Dans le domaine des transports, un exemple assez récurrent est celui des tunnels. Ce type d'environnement est caractérisé par le phénomène de guidage d'onde dû à sa structure géométrique et des propriétés des matériaux de ses murs. Une extension des modèles de propagation développés pour les systèmes 5G s'avère nécessaire, afin de prendre en considération ce cas d'usage. Le modèle proposé dans le cadre de cette thèse adopte une approche hybride pour reproduire l'effet du canal dans une chaîne de localisation. Dans un premier temps, les paramètres de propagation sont calculés par un simulateur à tracé de rayons. Les données déterministes obtenues sont analysées afin d'identifier les lois statistiques qui les régissent. Cela permet de créer une base de données contenant pour chaque paramètre la distribution qui lui correspond. Cette dernière est utilisée pour générer d'une manière stochastique les coefficients du canal utiles à notre système de localisation, à savoir l'amplitude et le retard relatifs à chaque trajet. La réponse impulsionnelle du canal servira à estimer la distance entre les deux antennes de transmission. En fonction des conditions de propagation ainsi que de la position du récepteur, trois sources d'erreur peuvent compromettre la précision de cette distance. Elles sont liées à sa largeur de bande, son seuil de détection, et à l'obstruction éventuelle du trajet direct. L'implémentation d'un mécanisme de contrôle d'intégrité s'annonce comme une solution prometteuse pour améliorer les performances de notre système. Ce dernier consiste à identifier les mesures aberrantes ne répondant pas aux contraintes imposées par l'application, puis de les exclure ou les corriger en fonction de la stratégie adoptée par le récepteur. Dans ce contexte, nous proposons d'exploiter la diversité spatiale d'un système SIMO (pour Single Input Multiple Output) à deux antennes de réception afin d'identifier les conditions de propagation du canal. La première étape de notre approche a pour but d'augmenter la résolution temporelle des deux réponses impulsionnelles du système. Ces dernières sont reconstruites dans le domaine fréquentiel sur une très large bande grâce à une technique de « compressed sensing ». Elles sont ensuite classifiées selon un critère temporel. Celui-ci représente la différence des temps de propagation du signal dans chacun des deux canaux, et il est obtenu par l'intercorrélation des réponses impulsionnelles reconstruites. L'approche proposée permet d'améliorer la fiabilité de l'information de localisation dans le tunnel et de réduire l'erreur liée à la bande limitée du système et à l'absence du trajet direct. Une implémentation expérimentale de la chaîne de localisation basée sur des signaux OFDM donne lieu à des erreurs d'estimation de distance au moins six fois inférieures à celles reportées par l'approche classique, ou même à celles relatives aux autres techniques d'identification basées sur les tests statistiques. Cet algorithme constitue, avec le modèle hybride du canal, les deux contributions majeures de ce travail de thèse [...]

**Mots-Clés :** Systèmes 5G, Modélisation du canal, Propagation guidée, Localisation en tunnel, Identification du LOS, Diversité spatiale

### 5G Propagation channel and integrity control mechanism : Application to a reliable localization of trains in tunnels

System level simulations are crucial in the development phase of any emerging wireless technology. It allows to identify the key factors that affect the transmission quality and to define the network limits. The used simulators must then be based on accurate and realistic channel models to better predict the system performances. In this context, several researches had been interested to the development of new models that take into account the emerging propagation scenarios introduced by the fifth generation of mobile communications (5G) that will be commercialized by 2020. In order to optimize the spectral and energetic resources use, the mobile terminals of this next generation should be constantly aware of their environment. This relies on the implementation of a location system, especially in constrained environments where satellite positioning systems are not available. In the field of transport, a rather recurrent example of these scenarios is that of tunnels. Although they are indoor environments, this type of environment is characterized by the phenomenon of wave guiding due to its geometric structure and the properties of the materials of its walls. Thus, an extension of the propagation models developed for the 5G systems is then necessary, in order to take into account this use case. We propose in this thesis a hybrid approach to reproduce the effect of the channel in a localization system. First, we calculate the propagation parameters by a

ray-tracing simulator. It accurately describes the behavior of the radio waves inside the tunnel; nevertheless, it is expensive in terms of computing time. Then we analyze the obtained deterministic data to identify their statistical laws, and we store both of them in a database to stochastically generate the channel coefficients needed for our ranging system, namely the amplitude and the delay relative to each path. The impulse response of the channel will finally be used to estimate the distance between the two transmission antennas. Depending on the propagation conditions as well as the position of the receiver, three sources of error can compromise the accuracy of this distance. For a ranging system based on the time metric, they are related to the bandwidth, the detection threshold, and the obstruction of the direct path. The implementation of an integrity control mechanism seems to be a promising solution to improve the performance of our system. It then consists of identifying the outliers that do not meet the constraints imposed by the application, then excluding or correcting them according to the strategy adopted by the receiver. In this context, we propose to exploit the spatial diversity of a SIMO (Single Input Multiple Output) system with two reception antennas in order to identify the propagation conditions of the channel. The first step of our approach aims to increase the temporal resolution of the two impulse responses of the system. Being sparse, they are reconstructed in the frequency domain over a very wide band using a compressed sensing technique. Then we classify them according to a temporal criterion, which represents the time difference of propagation of the signal in each channel, and we obtain it by the inter-correlation of reconstructed impulse responses. The proposed approach not only improves the reliability of the ranging information in the tunnel, but also reduces the error related to the limited bandwidth of the system and the obstruction of the direct path. An experimental implementation of the ranging system based on OFDM signals gives rise to distance estimation errors at least six times lower than those reported by the classical approach, or even to those issued from other identification techniques based on statistical tests. This algorithm and the hybrid model of the channel are then the two major contributions of this thesis work [...]

**Keywords:** 5G Systems, Channel modeling, Guided Propagation, Tunnel location, LOS identification, Space diversity

## Duccio Delfini

### Développement de récepteurs hétérodynes multi-pixels pour les futures missions spatiales

L'observation du milieu interstellaire est très importante aux fréquences mm / (sub) mm / THz pour comprendre comment se forment les étoiles et les planètes. De telles observations dépendent des récepteurs hétérodynes. Ces instruments atteignent une résolution spectrale très élevée en convertissant un signal haute fréquence à une fréquence plus basse. Dans un récepteur hétérodyne, le signal collecté est superposé sur un signal artificiel, bien connu, monochromatique, généré par l'oscillateur local (OL), donc ce signal artificiel est plus ou moins la fréquence du signal du ciel. Le mélangeur produit le signal de la fréquence du battement. Cette fréquence est équivalente à la différence entre le OL et la fréquence du signal du ciel. Ainsi, le signal du ciel est traduit à une fréquence plus basse, pour qu'il soit facile à amplifier et détecter. Habituellement, les récepteurs hétérodynes ont seulement un pixel spatial avec de nombreux canaux en fréquences. Notre objectif est de développer des réseaux de centaines de pixels. Pour faire cela, certains composants de l'hétérodyne doivent être repensés radicalement, tels que l'antenne de réception et le diviseur de faisceau OL. En effet, l'antenne réceptrice est généralement constituée d'une antenne à double fentes sur une lentille, ou d'une antenne cornet. Par contre, ces antennes ne sont pas les meilleurs choix pour des réseaux de nombreux pixels car elles doivent être usinées et montées individuellement. Au lieu de cela, il est commode de développer des structures planaires qui peuvent être facilement produites toutes ensemble. En particulier, nous avons conçu et simulé des réseaux d'antennes patch, de réseaux de transmission, et de plaques de zone. Le réseau d'antennes patch consiste d'un réseau de patches métalliques reliés par une ligne microruban et séparés du plan de masse par un substrat diélectrique. Cette configuration profite du facteur du réseau pour réduire la largeur de faisceau du signal collecté. Cependant, nos simulations nous montrent que la bande RF des réseaux d'antennes patch est étroite. Pour cette raison, nous avons analysé la possibilité d'utiliser une autre solution : le réseau de transmission. C'est un réseau de plusieurs cellules qui déphase une onde afin de transformer son front de phase de forme planaire en forme sphérique. Le but de la matrice de transmission est de focaliser le faisceau collecté vers une antenne et mélangeur à double fentes. La thèse démontre qu'un effet de focalisation satisfaisant est atteint sur une ligne. Nous avons fabriqué un tel réseau de transmission et l'avons testé en laboratoire. En raison des petites dimensions de quelques millimètres, ces tests sont difficiles à réaliser. Au sein de l'erreur de mesure, la conception et les simulations sont cohérentes. Une troisième option (d'une lentille planaire) a été étudiée dans la thèse : la plaque de zone. C'est un type particulier de réseau de transmission qui ne présente que deux déphasages de  $0^\circ$  et  $180^\circ$ . La plaque de zone focalise bien, mais est peu efficace. La dernière partie de la thèse introduit un type de diviseur de faisceau particulier qui permet une division du faisceau du signal OL vers un réseau de quatre mélangeurs très serrés. Diviser le faisceau avec des angles suffisamment petits est très difficile avec les réseaux de Fourier et Dammann classiques. Pour cette raison la méthode que nous avons proposée pour concevoir un tel diviseur est très novatrice. En effet, il permet la formation de motifs de faisceaux de forme arbitraire, qui ne sont pas limités par les ordres de diffraction. Les simulations montrent des efficacités allant jusqu'à 80% qui sont très bonnes en comparaison avec les réseaux classiques. En résumé, dans cette thèse, j'ai essayé plusieurs moyens radicalement différents pour simplifier les récepteurs hétérodynes et ouvrir la voie aux grandes matrices hétérodynes avec des centaines de pixels.

**Mots-Clés :** Instrumentation astronomique, Récepteur hétérodyne, Téraherz

### Development of multipixel heterodyne imaging arrays for future space missions

The observation of the interstellar medium is very important at mm/(sub)mm/THz frequencies to understand how stars and planets form. Generally such observations rely on heterodyne receivers. These are instruments that achieve very high spectral resolution by down converting a high frequency signal towards a lower frequency one. In a heterodyne receiver the incoming signal is superimposed onto an artificial, well-known, monochromatic signal generated by the local oscillator (LO), chosen to be close to the frequency of the sky signal. The mixer produces the beat frequency signal. It has a frequency equivalent to the difference between the LO and sky signal frequency. Thus the sky signal is translated to a lower frequency, and it is easier to amplify and detect. Usually heterodyne receivers have only one spatial pixel with many frequency channels. Some prototypes have been realized recently with few pixels. Our objective is to develop arrays of hundreds of pixels. In order to do that, some components which compose the heterodyne receiver must be radically rethought, such as the receiving antenna and the LO beam divider. Indeed the receiving antenna generally consists of a double slot antenna on a lens, or a horn antenna. Such antennas are not the best choice for arrays of many pixels since they have to be machined and mounted individually. Instead it is convenient to develop planar structures which can be easily produced in bulk in a single process. In particular we designed and simulated arrays of patch antennas, transmit-arrays and zone plates. The array of patch antennas consists of an array of metallic patches connected via a microstrip line and separated from the ground plane by a dielectric substrate. This configuration takes advantage of the array factor to reduce the beamwidth of the incoming signal in place of the lens. However our

simulations showed the array of patch antennas to be quite narrowband for a general purpose application, and quite difficult to realize. For this reason we also analyzed the possibility to use another solution such as the transmit-array. It is an array of several cells which provide a certain phase shift to an incoming wave in order to transform its phase front from planar to spherical. The purpose of the transmit-array is to focus the incoming beam towards a double slot antenna and a mixer placed below it. The simulations showed that a good focusing effect can be reached on a line. We fabricated such a transmit-array and tested it in the laboratory. Because of the small dimensions of a few millimeters these tests are difficult to carry out. Within the measurement error design and simulations are consistent. A third option of a planar lens was studied in the thesis: the zone plate. This is a particular kind of transmit-array which presents only two phase shift of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ . The zone plates focus well, but are unfortunately not very efficient. The final part of the thesis introduces a particular kind of beam divider which allows beam splitting of the LO signal towards an array of four very closely packed mixers. To split the beam with such small relative angles is very difficult with the classical Fourier and Dammann grating, for this reason the method we proposed to design such a beam divider is very innovative. Indeed it allows the forming of arbitrary shaped beam patterns, which are not limited by the diffraction orders. Simulations show efficiencies up to 80% which are very good in comparison with classical gratings. In summary in this thesis I have tried several radically different approaches to simplify heterodyne receivers and made a first step towards for large heterodyne arrays with hundreds of pixels.

**Keywords:** Astronomical Instrumentation, Heterodyne Receivers, Terahertz, Electronics, Array Antennas

## Eléonore Taurou

### Utilisation des transistors GaN dans les chargeurs de véhicule électrique

Le but de cette thèse est de concevoir un chargeur de véhicule électrique avec une forte densité de puissance car il doit être embarqué dans le véhicule. La thèse se focalise sur le deuxième étage du chargeur qui comporte un transformateur. Cet élément représente une part importante du volume total du convertisseur. Pour réaliser cela, une nouvelle technologie de transistor est utilisée : les transistors GaN. Ces composants induisent des pertes par commutation plus faibles que les transistors classiquement utilisés ce qui permet d'augmenter la fréquence de découpage. Cette fréquence est un levier pour améliorer la densité de puissance des convertisseurs. Cependant la fréquence est également responsable de pertes dans d'autres composants comme le transformateur et les inductances. Pour augmenter efficacement cette densité, la topologie du convertisseur doit être conçue pour réduire les contraintes sur ces composants. La thèse comporte trois parties. Tout d'abord, le comportement des transistors GaN est évalué et différentes topologies sont analysées pour en déduire une structure de chargeur qui minimise les pertes dans le transformateur. Ensuite, un dimensionnement compact de transformateur est réalisé à l'aide d'une étude paramétrique et des simulations par éléments finis. Enfin, un prototype de ce deuxième étage du chargeur est réalisé et testé pour évaluer ses performances et son volume.

**Mots-Clés :** Transistors GaN, Chargeur, Véhicule électrique, Haute densité de puissance, Transformateur, Convertisseur à résonance

### Use of GaN transistors in electric vehicles chargers

Improvement of power density is a big challenge for embedded electric vehicle chargers. Goal of the study is to reduce the volume of the DCDC charger which contains a bulky transformer. The key point is to use wide band gap transistors (GaN) to increase the charger switching frequency. High switching frequency can improve power density but the inconvenient is the increase of switching and transformer losses. The PhD dissertation is organized in three steps. First step is the definition of a charger topology. This topology is optimized to reduce transformer losses. Second part of the study is the theoretical design of a high power density transformer. A complete transformer parametric model is presented with Finite Element Analysis. Third part presents the prototype and test results of the charger DC-DC. Electrical behavior, volume and efficiency results are discussed in this part.

**Keywords:** GaN Transistor, Charger, Electric vehicle, High power density, Transformer, Resonant converter

## Fallilou Diop

### Analyses probabilistes pour l'étude des réseaux électriques de distribution

Les mutations observées sur le système électrique (production décentralisée, véhicules électriques, stockage, micro réseau...) font émerger des problématiques d'ordres économiques et techniques dans la gestion de ce dernier. Parmi eux, l'impact sur les niveaux de tension et de courant de neutre des réseaux de distribution. Le but de cette thèse est d'étudier des modèles probabilistes pour estimer ces impacts. L'incertitude sur la puissance PV produite et sur l'utilisation des VE implique la nécessité de développer des modèles probabilistes de consommation et de production d'électricité. Deux modèles différents de production et de consommation ont été étudiés : L'un basé sur l'approximation de données historiques par une densité de probabilité, l'autre reposant sur la répartition des données en groupes définis par un profil type et une probabilité d'occurrence. Des techniques de load flow probabilistes ont été étudiées dans cette thèse pour prendre en compte l'effet intermittente de la production PV et l'incertitude sur la consommation. Une technique basée sur la méthode de simulation Monte Carlo, une deuxième basée sur l'approximation PEM et une dernière basée sur l'utilisation du clustering appelée méthode pseudo Monte Carlo. Après avoir comparé la pertinence des méthodes sur deux réseaux test, la méthode pseudo Monte Carlo est appliquée, pour son gain en temps de simulation et son adaptabilité, dans un cas d'application qui porte sur l'estimation de la probabilité de dépassement des limites du courant de neutre en fonction du déséquilibre de production PV installée.

**Mots-Clés :** Smart Grid, Production décentralisée et réseau de distribution, Modèle probabilistic, Optimisation recharge véhicule électriques, Gestion de la demande

### Probabilistic load flow computation for unbalanced distribution grids with distributed generation

The current changes on the electrical system bring out economic and technical issues in the management of the latter. Among these issues, the impact of distributed generation and VEs on the technical constraints of the distribution network. The aim of this thesis is to study probabilistic models to estimate the impacts of photovoltaic production and electrical vehicles on medium and low voltage distribution networks. Two different probabilistic models of production and consumption were studied : one based on the fitting of historical data by one probability density function, the other one based on the data clustered in groups defined by a standard profile and a probability of occurrence. Three probabilistic load flow technics have been studied in this thesis. The first is based on the Monte Carlo simulation method, the second is based on the PEM approximation method and the last, based on the use of clustering, is called pseudo Monte Carlo method.

**Keywords:** Smart Grid, Distributed generator and low voltage electrical distribution network, Probabilistic model, Electrical vehicles charges, Demand side management

## Ghida Al Achkar

### Modélisation électromagnétique et homogénéisation de composites tissés pour applications en compatibilité électromagnétique.

Les matériaux composites sont largement utilisés dans l'industrie automobile comme pièces de structure. Alliant légèreté et bonnes propriétés mécaniques, ils ont remplacé les métaux classiquement adoptés dans la fabrication de moyens de transport. Toutefois, l'emploi des matériaux composites doit tenir compte de leur comportement électromagnétique. En effet, les composites à fibres conductrices, généralement moins conducteurs que les métaux, engendrent une interaction avec les ondes électromagnétiques, différente de celle introduite par les alliages métalliques. Il s'avère donc important de développer des outils de modélisation permettant de mieux appréhender le comportement électromagnétique de matériaux composites, et d'éclairer les changements qu'apportent ces matériaux sur la distribution des champs, provenant d'une multitude de sources externes, au voisinage des systèmes mécatroniques. Par ailleurs, l'étude du comportement électromagnétique de matériaux composites permet de tirer parti de leurs propriétés mécaniques attractives afin d'alléger les boîtiers de blindage en gardant un niveau d'atténuation conforme aux normes de l'industrie. Cependant, la modélisation numérique de structures composites de grande taille, telles que les boîtiers de blindage, bien que classiquement adoptée pour les structures métalliques, est rendue complexe par le fait que les composites présentent des hétérogénéités à l'échelle microscopique, et que leurs mécanismes de blindage diffèrent de ceux des conducteurs homogènes. Le calcul numérique s'avère envisageable une fois le composite remplacé par un matériau homogène ayant une réponse identique face à une sollicitation électromagnétique. Ainsi, au travers de ce travail de thèse, nous proposons une technique d'homogénéisation permettant d'estimer les propriétés électriques équivalentes que nous appliquons aux composites à fibres conductrices unidirectionnelles et tissées. Les résultats obtenus sont utilisés pour la simulation numérique d'un boîtier de blindage.

**Mots-Clés :** Mécatronique automobile, Matériaux composites, Propriétés électromagnétiques, Homogénéisation, Compatibilité électromagnétique, Boîtier de blindage

### Electromagnetic modeling and homogenization of woven composite materials for electromagnetic compatibility applications.

Composite materials are widely used in the automotive industry as structural components. By combining lightness and robust mechanical properties, they are increasingly replacing the conventionally used metallic alloys, for the manufacturing of vehicle parts. However, the use of composite materials is not without consequences on the electromagnetic behavior of these parts. Since carbon fiber reinforced composites are generally worse conductors of electricity than metals, they interact differently with the electromagnetic waves which surround them. It is therefore important to develop modeling tools to better understand the electromagnetic behavior of composite materials. This is to explain the changes that these materials bring to the distribution of waves, generated by a multitude of external sources, in the vicinity of mechatronic systems. On the other hand, the study of the electromagnetic behavior of composite materials makes it possible to determine the possibility of taking advantage of their attractive mechanical properties in order to further reduce the weight of electromagnetic shielding enclosures while maintaining a level of attenuation in accordance with the standards of the industry. However, numerical modeling of large composite structures, such as shielding enclosures, although conventionally adopted for metal structures, is hindered by the fact that composites exhibit heterogeneities at the microscopic scale. The numerical calculation becomes possible once the composite is replaced by a homogeneous material that exhibits an identical response to an identical electromagnetic solicitation. In this work, we present a homogenization technique, based on finite element simulation and an optimisation method, that computes an estimate of the equivalent electrical properties of unidirectional and woven fiber reinforced composites. The results are then used to simulate the shielding effectiveness of an enclosure constructed by combining composite materials and metallic alloys.

**Keywords:** Automotive mechatronics, Composite materials, Electromagnetic properties, Homogenization, Electromagnetic compatibility, Shielding enclosure



## Giacomo Galli

### Etude des décharges partielles dans une chambre à fission haute température

Le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) a en charge la conception d'un réacteur à neutrons rapides de quatrième génération. L'instrumentation neutronique de ce futur réacteur s'appuiera sur des chambres à fission placées en cuve. Ces chambres à fission à haute température (CFHT) devront fonctionner à pleine puissance à une température comprise entre 400°C et 650°C. Un bilan récent de la technologie CFHT a révélé que certains points sont à améliorer afin d'en garantir une plus grande fiabilité. En particulier, on recherche une meilleure compréhension du phénomène de décharges partielles. Celles-ci engendrent des impulsions non discernables de celles produites par les fragments de fission du dépôt fissile. Par ailleurs, elles pourraient accélérer le vieillissement des isolants minéraux. En s'appuyant sur une démarche expérimentale et théorique, ce travail de thèse a apporté plusieurs résultats. Les tests sur les différentes chambres à fission ont permis de caractériser les signaux de DP, vis à vis des signaux neutroniques et de trouver une méthode efficace de discrimination DP-neutron. De la même manière, les signaux DP ont été localisés et une solution technologique a été proposée et mise en oeuvre avec succès pour les éliminer. Un outil de calcul pour la simulation des impulsions neutroniques a été conçu et testé avec succès. Une expérience sur l'effet de la température sur la courbe de Paschen, dans un volume de gaz fermé, a été conçue et réalisée en donnant les premiers résultats intéressants.

**Mots-Clés :** Décharge partielle, Réacteur nucléaire rapide refroidi au sodium, Chambre à fission, Haute température, Effet de point triple, Loi de Paschen

### Study of partial partial-discharge-induced pulses in a high temperature fission chambers

The Commission for Atomic and Alternative Energy (CEA) is in charge of the fourth generation fast neutron reactor design. The instrumentation for neutron flux measurement of this future reactor will be based on fission chambers placed in-core. These high temperature fission chambers (HTFC) will have to operate at full reactor power, and thus at a temperature between 400°C and 650°C. A recent review of HTFC technology has revealed that some points need improvement to ensure greater reliability. In particular, a better understanding of the phenomenon of partial discharges (PD), which are observed in the fission chambers at high temperature, is needed. These PD pulses are indistinguishable from those produced by the products of fission caused by collision with neutrons with the fissile deposit within the chambers. In addition, they could accelerate aging of the ceramic insulators used in the chambers. Based on both experimental and theoretical approaches, this PhD work found several results. Tests on different fission chambers made it possible to characterize the DP signals vis-a-vis the neutron signals and to find an operational DP-neutron discrimination method. The DP signals were localized and a technological solution was proposed and successfully implemented to eliminate them. A calculation tool for neutron pulse simulation was also designed and tested successfully. An experiment on the effect of temperature on the Paschen curve, in a closed gas volume, was designed and carried out giving initial interesting results.

**Keywords:** Partial discharge, Sodium-cooled fast reactors, Fission chamber, High temperature, Triple point effect, Paschen's law

## Halim Elie Tannous

### La rééducation fonctionnelle à domicile

La rééducation fonctionnelle classique comprend des séances thérapeutiques, des exercices à domicile et des mouvements avec ou sans l'aide de thérapeutes. Cette approche classique souffre de nombreuses limitations, en raison de l'incapacité de l'expert à suivre les séances à domicile du patient et du manque de motivation du patient pour répéter les exercices sans retour. Les jeux sérieux ont été présentés comme une solution à ces problèmes. Premièrement, des exergames ont été développés à l'aide d'une méthodologie de codesign, où patients, experts et développeurs ont pris part aux procédures de conception. Le capteur Kinect a été utilisé pour capturer la cinématique en temps réel au cours de l'exercice. Ensuite, une fusion de données a été étudiée entre le capteur Kinect et les unités de mesure inertielles, afin d'augmenter la précision de l'estimation de l'angle des articulations, à l'aide d'une approche système de systèmes. Le système a été évalué par des patients avec différentes pathologies au cours de multiples campagnes d'évaluation. Les résultats obtenus montrent que les jeux sérieux peuvent être une solution pour des pathologies spécifiques. En outre, les experts ont été convaincus de la pertinence clinique de ce dispositif et ont estimé que les données proposées étaient suffisantes pour évaluer la situation du patient. La mise en place de tels systèmes maximiserait l'efficacité du programme de réadaptation. D'autre part, ce système permettrait également de réduire les limitations actuellement présentes dans les programmes de rééducation classiques, permettant aux patients de visualiser leurs mouvements et aux experts de suivre l'exécution de l'exercice à domicile.

**Mots-Clés :** Monitoring en temps réel, Rééducation à domicile, Serious games

### Interactive and connected rehabilitation systems for e-health

Conventional musculoskeletal rehabilitation consists of therapeutic sessions, home exercise assignment, and movement execution with or without the assistance of therapists. This classical approach suffers from many limitations, due to the expert's inability to follow the patient's home sessions, and the patient's lack of motivation to repeat the same exercises without feedback. Serious games have been presented as a possible solution for these problems. This thesis was carried out in the eBioMed experimental platform of the Université de technologie de Compiègne, and in the framework of the Labex MS2T. The aim of this thesis is to develop a real-time, serious gaming system for home-based musculoskeletal rehabilitation. First, exergames were developed, using a codesign methodology, where the patients, experts and developers took part in the design and implementation procedures. The Kinect sensor was used to capture real-time kinematics during each exercise. Next, data fusion was implemented between the Kinect sensor and inertial measurement units, to increase the accuracy of joint angle estimation, using a system of systems approach. In addition, graphical user interfaces were developed, for experts and patients, to suit the needs of different end-users, based on the results of an end-user acceptability study. The system was evaluated by patients with different pathologies through multiple evaluation campaigns. Obtained results showed that serious games can be a good solution for specific types of pathologies. Moreover, experts were convinced of the clinical relevance of this device, and found that the estimated data was more than enough to assess the patient's situation during their home-based exercise sessions. Finally, during these three years, we have set the base for a home-based rehabilitation system that can be deployed at home or in a clinical environment. The implementation of such systems would maximize the efficiency of rehabilitation program, while saving the patient's and expert's time and money. On the other hand, this system would also reduce the limitation that are currently present in classical rehabilitation programs, allowing the patients to visualize their movements, and the experts to follow the home exercise execution.

**Keywords:** Functional rehabilitation, Serious games, Real-time monitoring, Rehabilitation at home, Multisensory fusion

## Joanna Njeim

### Caractérisation physique et électrique de dispositifs à base de graphène CVD : vers l'électronique flexible à base de graphène à grande échelle

Depuis une dizaine d'années, le graphène s'est rapidement révélé être un matériau très prometteur dans le domaine de l'électronique flexible et communicante. Dans cette optique, la technique de dépôt chimique en phase vapeur a permis la synthèse de graphène sur de grandes surfaces, rendant ainsi possible la commercialisation de dispositifs à base de graphène. Cependant, les procédés de fabrication ne sont pas tous clairement acquis à chaque étape afin de relever les défis les plus fondamentaux dans ce domaine. Dans ce travail de thèse, une caractérisation chimique et structurale a été réalisée étape par étape afin d'étudier les propriétés du graphène CVD, et les étapes les plus importantes ont été abordées afin d'ouvrir la voie à des dispositifs RF flexibles à base de graphène sur du parylène. Nous avons constaté que les techniques classiques permettant l'obtention de grandes surfaces doivent encore fournir des propriétés d'homogénéité sur le même feuillet. Cela met en évidence la nécessité d'encapsuler le graphène. Le parylène C a été étudié comme substrat potentiel pour les dispositifs à base de graphène et des dispositifs RF à des longueurs de grille inférieures à 60 nm ont été fabriquées, ce qui montre que la combinaison parylène/graphène pourrait constituer une solution très propice à l'obtention de dispositifs avec des performances reproductibles.

**Mots-Clés :** Graphène, Parylène, Transistor à effet de champ, Caractérisation électrique, Caractérisation physique, Électronique radiofréquence

### Physical and electrical characterization of CVD graphene devices : towards large scale and flexible graphene electronics

Throughout these few years, graphene has been rapidly proven to be a very promising material in the field of flexible and communicating electronics. Moreover, the chemical vapor deposition technique has allowed the synthesis of large-scale graphene, making the commercialization of graphene-based devices possible. Nevertheless, the fabrication process has not quite been understood at every step in order to overcome the most fundamental challenges in this field. In this work, a step-by-step structural and chemical characterization has been performed to study the properties of CVD-grown graphene, and the most crucial steps have been tackled in order to pave the way for flexible RF graphene-based devices on parylene substrates. We have found that the common large-scale techniques have yet to yield homogeneous graphene properties on the same sheet which results in wafer-scale graphene-devices with different performances. This highlights the need to encapsulate graphene. Parylene C was studied as a potential substrate for graphene devices, and sub-60 nm gate lengths RF devices have been fabricated, showing that the parylene-graphene combination could indeed be a very propitious solution to obtaining reproducible device performance.

**Keywords:** Graphene, Parylene, Radiofrequency electronics

## Juliette Le Hir

### Conception mixte d'un capteur d'images intelligent intégré à traitements locaux massivement parallèles

Les capteurs intelligents permettent aux systèmes embarqués d'analyser leur environnement sans transmission de données brutes, consommant ainsi moins d'énergie. Ce mémoire présente donc un travail sur un imageur intégrant du traitement d'image. Deux figures de mérite sont introduites pour classer l'état de l'art des imageurs intelligents en fonction de leur versatilité et de leur préservation de la surface photosensible. Cela met en évidence un compromis que ce travail essaie d'améliorer en explorant une approche par macropixels. En effet, en regroupant les éléments de calculs (PEs) pour plusieurs pixels, les traitements sont à la fois massivement parallèles et potentiellement plus versatiles à surface photosensible donnée. Une adaptation du filtrage spatial et du filtrage temporel en adéquation avec une architecture par macropixels est proposée (sous-échantillonnage par 3x3 pixels et par 2x2 pixels respectivement), et validée fonctionnellement. Une architecture d'imageur en macropixels asymétriques est donc présentée. Le PE conçu est un circuit analogique à capacités commutées, programmable par un contrôle numérique extérieur à la matrice. Son dimensionnement est discuté pour des compromis entre surface et précision des calculs, avant d'être implémenté en calcul approximatif pour notre cas. La matrice proposée a été simulée en vue extraite et présente des images de résultats de détection de contours ou de différence temporelle corrects, avec un facteur de remplissage de 28%.

**Mots-Clés :** Microélectronique, Conception mixte analogique/numérique, Imageur intelligent, Traitement d'image

### Mixed co-design for an integrated smart image sensor with massively parallel local image processing

Smart sensors allow embedded systems for analysing their environment without any transmission of raw data, which consumes a lot of power. This thesis presents an image sensor integrating image processing tasks. Two figures of merit are introduced in order to classify the state of the art of smart imagers regarding their versatility and their preservation of photosensitive area. This shows a trade-off that this work aims at improving by using a macropixel approach. By merging processing elements (PEs) between several pixels, processing tasks are both massively parallel and potentially more versatile at given photosensitive area. An adaptation of spatial and temporal filtering, matching such an architecture is proposed (downsampling by 3x3 and 2x2 pixels respectively for each processing task) and functionally validated. An architecture of asymmetric macropixels is thus presented. The designed PE is an analog switched capacitor circuit that is controlled by out-of-matrix digital electronics. The sizing of the PE is discussed over the trade-off between accuracy and area, and implemented in an approximate computing approach in our study. The proposed matrix of pixels and PEs is simulated in post-layout extracted views and shows good results on computed images of edge detection or temporal difference, with a 28% fill factor.

**Keywords:** Microelectronics, Mixed-Signal, Smart image sensor, Vision system, Image processing

## Kevin Malleron

### Modélisation multiphysique, caractérisation et conception de transducteurs magnétoélectriques pour l'alimentation de capteurs biomédicaux autonomes

Afin d'éviter une opération de remplacement de la batterie d'un dispositif biomédical, nous proposons d'utiliser une technique innovante de rechargement sans fils utilisant des matériaux magnétoélectriques. L'effet magnétoélectrique extrinsèque est principalement issu de la combinaison de deux phénomènes : piézoélectricité et magnétostriction. L'idée est de réaliser une transmission d'énergie sans fils basée sur les techniques d'induction en champ proche : on applique un champ magnétique, le récepteur qui servira de transducteur d'énergie sera composé d'un matériau magnétostrictif, qui, sous l'effet du champ magnétique va se déformer, les contraintes mécaniques sont transmises au matériau piézoélectrique qui se polarise. On mesure alors une tension électrique aux bornes du piézoélectrique qui peut ensuite servir à alimenter ou recharger un dispositif électronique. Cette thèse contribue au développement de cette technique en proposant des pistes d'améliorations de la puissance transmissible afin de pouvoir alimenter des capteurs avec un transducteur le plus petit possible. Pour ce faire, une modélisation par éléments finis 2D est présentée ainsi que des mesures de puissance et le développement du banc de caractérisation associé.

**Mots-Clés :** Matériaux magnétoélectriques, Transducteur, Dispositifs biomédicaux implantés, Piézoélectricité, Magnétostrictif, Modélisation éléments finis, Coefficient magnétoélectrique, Transmission d'énergie sans fil

### Multiphysics modeling, characterization and design of magnetoelectric transducers for powering autonomous biomedical sensors

In order to avoid surgery for battery replacement or recharge, we propose to use an innovative technique to wirelessly recharge the battery using magnetoelectric materials. The magnetoelectric effect is issued of two combined phenomena: piezoelectricity and magnetostriction. The idea is to achieve a wireless power transmission based on the near magnetic field techniques: the source energy is emitted via a magnetic field and the receptor which will transduce the energy is a magnetoelectric material. The magnetostrictive part of the magnetoelectric transducer is subjected to a stress due to the magnetic field. The stress is transmitted to the piezoelectric part which will produce an electric field. The electric voltage collected from the electrodes of the piezoelectric material will be used to power or recharge electronic devices. This thesis contributes to the development of this technique by proposing improving ways for energy transmission to powering sensors with the smallest transducer possible. An 2D finite element model his presented with power measurements and the characterizing bench associated.

**Keywords:** Magnetoelectric material, Transducer, Implanted boimedic devices, Piezoelectricity, Magnetostriction, Finite element model, Magnetoelectric coefficient, Wireless energy transfer

## Khaled Tamizi

### Commande de convertisseurs multicellulaires destinés aux microgrids et aux systèmes d'énergies renouvelables

Les convertisseurs multicellulaires DC-DC sont utilisés dans de nombreuses applications et de nombreux systèmes électriques. Ils présentent un intérêt particulier pour des applications spécifiques liées aux énergies renouvelables et aux Microgrids. Leur principal avantage provient de leur capacité intrinsèque à réduire les ondulations liées au découpage des grandeurs électriques en entrée et en sortie du système de conversion. Cette propriété intéressante au niveau système peut être étendue au fonctionnement interne du convertisseur en adjoignant à ce dernier un élément de filtrage par inductances couplées magnétiquement. Ce composant permet d'étendre les propriétés externes de réduction des ondulations au fonctionnement de chaque cellule du convertisseur. Il permet également d'augmenter la dynamique propre du système de conversion. Ces propriétés permettent de réduire significativement le niveau et le volume de filtrage en entrée et sortie du convertisseur et donc d'augmenter de manière importante sa compacité et son rendement énergétique. Cependant, l'ajout de ce dispositif magnétique induit, de par le couplage des équations du système qu'il provoque, une complexification du contrôle de la structure associée également à la nécessité d'augmenter le nombre de capteurs. Ce travail de thèse a pour objectif d'établir et d'évaluer différents modes de contrôle pour les convertisseurs multicellulaires DC-DC. Le point commun aux méthodes proposées est de permettre la gestion aussi bien des grandeurs externes au convertisseur que des grandeurs internes constituées par les courants de circulation entre cellules connectées en parallèle. Ces composantes de courant sont également nommées « courants différentiels ». Trois types de contrôle sont étudiés : Pour le premier, des correcteurs linéaires classiques sont utilisés conjointement avec des techniques de découplage des équations du système. La robustesse de ces méthodes de contrôle vis-à-vis des incertitudes sur la connaissance des paramètres du système fait l'objet d'un focus particulier dans cette partie du travail. Pour le second, une version modifiée de la technique de commande connue sous le nom Model Predictive Control est proposée. Celle-ci permet d'assurer le contrôle de la fréquence de commutation et l'entrelacement des commandes PWM des cellules. Pour le troisième mode, nous étudions une méthode basée sur le contrôle vectoriel direct des courants différentiels. Une implantation sur un système numérique équipé d'un micro-processeur et d'un FPGA est proposée et permet de valider les résultats de l'étude théorique.

**Mots-Clés :** MPC, Énergie renouvelable, Microgrids, Electronique de puissance, Commande

### Control of multicellular power converters for microgrids and renewable energies applications

The interleaved multicell DC-DC power converters are broadly used in many applications and systems especially in renewable energy systems and microgrids. They reduce the current ripple at the input and output side. Also, an implemented magnetic coupling between cells leads to reduce the current ripple in each of them and to improve the dynamical electrical behavior. These properties involve a reduction on the filtering requirements and so, allow to improve the converter compactness as well as its conversion efficiency. Nevertheless, for such power converters, the control complexity is also increased as well as the number of required sensors. The thesis aims to establish different mode of control of interleaved multicell DC-DC converters. The common point of these methods is to control the external quantities at the output of the converter but also the internal quantities, constituted by the circulating currents between parallel cells or in other words the differential currents. Three main strategies are investigated: the first one uses classical linear controllers with different decoupling technics and focuses on the robustness regarding the system parameters variations. The second one uses a Model Predictive Control technic which is designed to provide a fix switching frequency and interleaving of the cells PWM commands. The last one presents a space vector direct control of the differential currents. In a last part, these control principles are tested on a prototype and implemented on a Microcontroller and FPGA board in order to carry out an experimental verification.

**Keywords:** Power Electronics, Microgrids, Control, Renewable Energy, MPC

## Ludwig Cron

### Analyse d'une nouvelle topologie fiable de convertisseur analogique-numérique pour l'environnement automobile

La tendance du secteur automobile à développer des capteurs et actionneurs intelligents, faire cohabiter l'électronique analogique et l'électronique numérique devient un art. Placé au sein des actionneurs, pour la sécurité et le confort des passagers, les convertisseurs analogique-numérique (CAN) sont les composants clés de ces systèmes intelligents. Un CAN rapide, précis, et peu cher sera être un précieux allié pour les équipementiers automobiles. Pour diminuer les coûts, et faciliter l'utilisation de ce bloc, la surface de silicium occupée doit être considérablement réduite à moins de 0.5mm<sup>2</sup>. Quant à la précision du convertisseur, 12-bits tous les 5 coups d'une horloge de 100 MHz sont nécessaires pour une température de -40°C à 175°C. Ce travail de recherche se focalise sur l'amélioration de l'efficacité énergétique sous les contraintes que l'environnement automobile représente. Notre principale contribution réside dans le développement par une approche top-down d'une nouvelle architecture à 3 étages de topologies différentes. Le premier étage est un  $\Sigma\Delta$ -Incrémental intrinsèquement linéaire. Le second étage est un algorithmique pour augmenter rapidement la résolution. Enfin, un SAR accroît la résolution avec faible consommation de puissance et surface de silicium. Suite à l'analyse de 40 années d'état de l'art, la nouvelle architecture proposée fut validée par vérification des non-linéarités statiques (DNL, INL) à différents niveaux de modélisation. Commencant par un modèle MATLAB sans les limitations analogiques, le niveau de modélisation se raffine petit à petit jusqu'à un niveau transistor du convertisseur. Un modèle Verilog-A permet la détermination des spécifications minimales des briques de base analogiques: les comparateurs et les amplificateurs à transconductance. La sensibilité de ces derniers à la température fut analysée pour limiter les erreurs commises sur les tensions analogiques. Une fois dessinés et les parasites extraits, les modèles variant avec la température remplacent leur modèle Verilog-A respectif afin d'obtenir les performances finales. Parallèlement, deux architectures de comparateurs ont été évaluées en température au sein d'une première puce de test. Deux méthodes ont été utilisées pour estimer l'offset des comparateurs, et un nouveau circuit asynchrone estime le délai. Une seconde puce de test permet de vérifier la sensibilité du SAR à la température malgré un fonctionnement pseudo-asynchrone. Pour les comparateurs, le nouveau circuit de mesure différentielle du retard montre une précision de 60 ps dans le pire des cas, pour la plus petite surface sur puce connue en considérant la technologie utilisée. Comme la variation du retard est dépendante de la température, le choix d'un Strong-ARM (SA) ou d'un Double-Tail (DT) dépendra du bruit, de la puissance, de la tension d'alimentation, et de la spécification de kickback. Pour une tension d'alimentation standard, les SA comparateurs ciblent les systèmes à faible consommation avec une tolérance élevée pour le kickback différentiel. Au contraire, les DT comparateurs acceptent une plage de tension d'alimentation plus faible, et présentent un faible kickback différentiel, mais un bruit plus important. Testé de -40°C à 200°C, le dernier étage du CAN proposé, n'a pas besoin d'être calibré jusqu'à 180°C. Les résultats encourageants sur cet étage permettent la réutilisation de celui-ci pour calibrer les étages précédents. Et pour le CAN, nous estimons une résolution possible de 11,2 bits en 5 cycles d'horloge par échantillon avec une extension à 13,3 bits en 6 cycles d'horloge. La surface estimée est de 0,12mm<sup>2</sup>. La puce de test pour le CAN est en cours de finalisation, une première étape sera sa caractérisation. Les résultats de cette session de mesure détermineront s'il est possible de pousser l'architecture à des fréquences plus élevées pour ensuite tirer parti du traitement numérique pour conserver les performances.

**Mots-Clés :** Conversion analogique numérique, Électronique, Automobile, Température, Low-OSR

### A New ADC topology for reliable conversion in the automotive environment

In the automotive industry, the trend being to develop smart sensors and actuators, the on-board electronic has been ever more an artful work to combine analog electronics and the digital one. While many monitoring and control systems play a crucial role as well for the safety as for the comfort of passengers, small components, like ADCs, are mandatory as a building block or as an essential functionality integrated into smart actuators. To that extent, a low-cost, fast and accurate analog to digital converter operating in those harsh conditions is a good ally for equipment manufacturers. To decrease the cost, the area is of primary concern. Considering re-use of the ADC as an IP-block, the area has been limited to less than half a square millimeter for a low-oversampling ratio of 5 to output a 12-bit code at a sample rate of 20 MSamples/s, over a wide temperature range from -40°C to 175°C. This work focuses on the design of high-precision, high-speed and energy efficient ADC under the harsh environment the automotive one represents. Our main contribution relies on the development of a new hybrid topology proposal using 3 stages to cope with such constraints based on a top-down approach: A first counting stage inherently linear, an algorithmic stage allowing to increase rapidly the precision, and a SAR stage, ideal in terms of area and consumption, for a low number of bits. Based on a 40 years literature review, a new topology proposal has been validated by checking its static metric of non-linearity (DNL, INL) at different level of modelisation. Starting by a MATLAB implementation without



analog limitations, we refined step by step the model till we reach a transistor level of the ADC. Thence, Verilog-A model allows us to fix the minimum requirements of the key analog building blocks, to wit comparators and OTA. The latter has been analysed in order to limit the settling error sensitivity to the temperature. Laid-out, parasitic extracted simulation results of these considering PVT variations, they replace then previous high-level model to give final performances. Meanwhile, two well-known comparator architectures have been assessed as IP blocs inside a first test chip. To perform the offset extraction, both a conventional and a feedback loop have been inspected. To assess, the delay a new asynchronous circuit has been proposed. A second chip tests the sensitivity of the SAR to validate both the pseudo-asynchronous digital scheme, and a Double-Tail comparator in real operating conditions. For comparators, the new differential measurement circuit of the delay demonstrate an accuracy of 60 ps in the worst case, over a large temperature range for the smallest chip area known with respect to the technology node size. The temperature variation of the delay being temperature dependent, the choice of a Strong-ARM or a Double-Tail hinge on the noise, power, supply voltage, and kickback specification. For standard power supply voltage, the Strong-ARM latch targets low-power systems application with a high tolerance for differential kickback. To the contrary, a Double-Tail latch allows lower power supply voltage range, with low-differential kickback. Otherwise, the Double-Tail exhibit a higher noise due to the integration in its first stage. Tested from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $200^{\circ}\text{C}$ , the last stage of the proposed ADC topology does not need calibration up to  $180^{\circ}\text{C}$ . The encouraging results on this stage allows the re-use of the SAR to calibrate the previous stages. And considering the ADC, we estimate a possible resolution of 11.2-bits in 5 clock cycles per sample with an extension to 13.3-bits in 6 clock cycles with an estimated area of  $0.12\text{ mm}^2$ . The ADC test chip not being fabricated yet, a first step is the characterization of the ADC. From the results of the planned measurement session, the main goal is to push the architecture at higher sampling rates to then leverage the digital processing to enhance the sampling rate without changing the analog.

**Keywords:** Analog to digital conversion, Electronic, Automotive, Temperature, Low-OSR

## Man Zhang

### Modélisation multiphysique du couplage électromagnétique/mécanique et développement de contrôles de vibration appliqués aux machines à réluctance variable

En raison de ses avantages inhérents, tels que son faible coût, sa fiabilité élevée, sa capacité de fonctionnement à grande vitesse et en environnements difficiles, la machine à réluctance variable (MRV) est une solution attrayante pour l'industrie automobile. Cependant, la traction automobile est une application pour laquelle le comportement acoustique du groupe motopropulseur doit être particulièrement considéré, dans l'optique de ne pas dégrader le confort des passagers. Afin de rendre la MRV compétitive pour cette application automobile, le travail présenté se concentre sur plusieurs méthodes de contrôle cherchant à améliorer le comportement acoustique des MRV en réduisant les vibrations d'origine électromagnétique. Un modèle multi-physique électromagnétique / mécanique semi-analytique est proposé à partir de résultats de simulation numérique obtenus par la méthode des éléments finis. Ce modèle multiphysique est composé de modèles électromagnétiques et structuraux, qui sont reliés par la composante radiale de la force électromagnétique. Deux méthodes de contrôle sont ensuite proposées. La première réduit la vibration en faisant varier l'angle de coupure du courant, la fréquence de la variation étant basée sur les propriétés mécaniques de la structure MRV. De plus, une fonction aléatoire uniformément distribuée est introduite pour éviter une composante fréquentielle locale de forte vibration. Une seconde méthode est basée sur le contrôle direct de la force (DFC), qui vise à obtenir une force radiale globale plus douce pour réduire les vibrations. Un adaptateur de courant de référence (RCA) est proposé pour limiter l'ondulation de couple introduite par le DFC, provoquée par l'absence de limitation de courant. Cette seconde méthode de réduction des vibrations appelée DFC & RCA est évaluée par des tests expérimentaux utilisant un prototype de MRV 8/6 afin de montrer sa pertinence. Une solution de partitionnement hardware/software est proposée pour implémenter cette méthode sur une carte FPGA utilisée en combinaison avec un microprocesseur.

**Mots-Clés :** Machine à réluctance variable (MRV), Modèle de multiphysique semi-analytique, Réduction de vibration, Contrôle d'angle de déviation variable, Commande de force directe (DFC), Partitionnement hardware/software

### Modeling of Multiphysics Electromagnetic & Mechanical Coupling and Vibration Controls Applied to Switched Reluctance Machine

Due to its inherent advantages Switched Reluctance Machine (SRM) are appealing to the automotive industry. However, automotive traction is a very noise sensitive application where the acoustic behavior of the power train may be the distinction between market success and market failure. To make SRM more competitive in the automotive application, this work will focus on the control strategy to improve the acoustic behavior of SRM by vibration reduction. A semi-analytical electromagnetic/structural multi-physics model is proposed based on the simulation results of numerical computation. This multi-physics model is composed by electromagnetic and structural models, which are connected by the radial force. Two control strategies are proposed. The first strategy to improve the acoustic behavior of SRM by vibration reduction. A semi-analytical electromagnetic/ structural multi-physics model is proposed based on the simulation results of numerical computation. This multi-physics model is composed by electromagnetic and structural models, which are connected by the radial force. Two control strategies are proposed. The first one reduces the vibration by varying the turn-off angle, the frequency of the variable signal is based on the mechanical property of switched reluctance machine. Besides, an uniformly distributed random function is introduced to avoid local high vibration component. Another one is based on the Direct Force Control (DFC), which aims to obtain a smoother total radial force to reduce the vibration. An reference current adapter (RCA) is proposed to limit the torque ripple introduced by the DFC, which is caused by the absence of the current limitation. The second vibration reduction strategy named DFC&RCA is evaluated by experimental tests using an 8/6 SRM prototype. A hardware/software partitioning solution is proposed to implement this method, where FPGA board is used combined with a Microprocessor.

**Keywords:** Direct Force Control (DFC), Hardware/Software Partitioning, Switched Reluctance Machine (SRM), Semi-analytical multiphysics model, Vibration reduction, Variable turn-off angle control

## Marine Karadjian

### Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique

Dans la perspective de l'aéronef « plus électrique », l'augmentation de puissance électrique embarquée se traduit par une augmentation de tension. Les tensions envisagées aujourd'hui sont inférieures à 1000 V DC. Mais des valeurs plus élevées peuvent être considérées pour le futur. Il est donc indispensable d'étudier les dégradations prématurées induites par cette élévation de tension sur les équipements existants. Ce travail de thèse, portant spécifiquement sur les câbles aéronautiques, constitue une contribution à cette étude. Les câbles examinés, constitués d'une âme multibrins sur laquelle sont rubanées des couches de PTFE et PI, ont subi différents vieillissements accélérés thermiques statiques et dynamiques, sous humidité, et ce sans ou avec contrainte électrique. Certains vieillissements ont été effectués sur une durée supérieure à 9000 heures. Les décharges partielles (DP) ont été étudiées sur ces câbles en termes de tension d'apparition PDIV et RPDIV. Ces DP peuvent intervenir à l'extérieur du câble mais également à l'intérieur (pour des tensions plus élevées) dans les interstices d'air entre l'isolant et les brins conducteurs. Cette localisation a été confirmée par un modèle électrostatique. L'effet du vieillissement n'a pu être constaté que sur les décharges internes, avec dans certains cas une réduction significative des valeurs de RPDIV. Des analyses physicochimiques du système d'isolation électrique ont été effectuées ainsi que des radiographies par rayons X. Des modifications chimiques des interfaces du système d'isolation interviennent au cours des vieillissements. Pour les vieillissements les plus poussés (après 9000h sous contrainte thermique à 240°C), ces modifications résultent en la formation de cavités où des DP peuvent prendre place. Enfin, des mesures électrostatiques de potentiel de surface (déclin et retour après neutralisation) ont mis en évidence, bien avant l'observation de cavités, une augmentation de conductivité d'une des couches de l'isolation.

**Mots-Clés :** Câble, Isolant, Vieillissement, Décharges partielles, Potentiel de surface

### Endurance and dielectric strength of electrical cable insulation for aeronautics

In future "more electric" aircraft, the increase in on board electrical power will result in an increase in voltage. The voltages envisaged today are lower than 1000 V DC, but higher values can be considered in the medium to long term. It is therefore essential to study possible premature degradation of existing equipment induced by this rise in voltage. This thesis work, specifically on aeronautical cables, is a contribution to this goal. The examined cables, consisting of a multi-stranded core on which PTFE and PI layers are wound, have undergone various static and dynamic accelerated thermal aging, under humidity, without or with electrical stress. Aging has been carried out in some cases for more than 9000 hours. Partial discharges (DP) were studied on these cables in terms of the appearance voltage PDIV and RPDIV. These DPs can occur outside the cable but also inside (for higher voltages) in the air gaps between the insulation and the conductive strands. This location has been confirmed by an electrostatic model. The effect of aging was only found in the case of internal discharges, with in some cases a significant reduction in RPDIV values. Physicochemical analyses of the electrical insulation system were carried out as well as x-ray radiography. Chemical modifications of the interfaces of the insulation system occur during aging. For the most advanced aging (after 9000h under thermal stress at 240°C), these changes result in the formation of cavities where DP can then take place. Finally, electrostatic measurements of surface potential (decline and return after neutralization) have shown, well before the observation of cavities, an increase in conductivity of one of the layers of the insulation.

**Keywords:** Cable, Insulation, Ageing, Partial discharges, Surface potential

## Michael Magued

### Virtualisation de la mesure d'exposition du public général au champ magnétique basse fréquence dans le domaine de l'automobile

L'exposition des personnes aux champs électromagnétiques est une problématique majeure de société qui touche le domaine de l'automobile. Le développement de la technologie des véhicules électriques et hybrides nécessite la prise en compte de la problématique d'exposition aux ondes dès la phase même de la conception. Le travail présenté dans ce document s'intéresse principalement à l'exposition aux champs magnétiques basse fréquence (BF) marqués par les effets non thermiques de stimulation électriques. Dans cette gamme fréquentielle, les sources principales des risques d'exposition sont les modules de la chaîne de traction qui sont souvent situés à proximité des passagers. L'objectif principal de cette thèse est de virtualiser la mesure évaluant l'exposition aux champs magnétiques BF, jusqu'ici réalisée par un testeur de niveau d'exposition commercial, afin d'être capable de faire une levée de risque d'exposition, en amont, sans entraîner de surcoût au constructeur. Ceci est réalisé en virtualisant l'instrument de mesure. Nous consacrons d'abord notre étude à la compréhension de la mesure d'évaluation d'exposition et du fonctionnement du champmètre Narda ELT-400 utilisé chez notre constructeur automobile pour mesurer l'indice d'exposition. Ainsi, nous détaillons les différentes définitions et méthodes de calcul de l'indice d'exposition du public général aux champs magnétiques BF. Enfin, nous présentons des applications de l'utilisation du champmètre sur des cas de mesure en statique et en dynamique. La deuxième partie de l'étude traite de la construction du prototype virtuel permettant de modéliser la mesure d'indice d'exposition aux champs magnétiques BF réalisée par le champmètre Narda ELT-400. Pour ce faire, nous développons et optimisons dans un premier temps le modèle de la sonde triaxiale du champmètre sous FEKO permettant de positionner et d'orienter la sonde selon le choix de l'utilisateur. Ensuite le champ magnétique rayonné par la sonde virtuelle est traité pour obtenir une mesure virtuelle de l'induction magnétique détectée par la sonde et de l'indice d'exposition. La troisième partie est consacrée à la validation du modèle complet sur des cas réels de mesures effectuées sur des pinces manuelles de soudage par points en comparant les résultats du prototype virtuel à ceux mesurés. La validation du modèle est réalisée dans trois cas d'étude différents correspondant à des profils de champ différents, des fréquences différentes dans la gamme BF et à des formes de signal différentes. Dans la dernière partie de notre étude, une approche stochastique de simulation est proposée en appliquant la méthode de Monte-Carlo, basée sur un grand nombre de tirages aléatoires. Cette méthode permet d'étudier la dispersion des résultats due à l'imprécision plausible de positionnement et d'orientation commise par l'opérateur de la sonde. Cette méthode est appliquée à différentes distances de sources rayonnantes élémentaires. Les résultats principaux de cette partie portent sur le lien entre l'homogénéité du champ au point investigué et la variabilité de la mesure virtuelle autour de ce point suite à l'imprécision commise.

**Mots-Clés :** Exposition, Population général, Champ magnétique basse fréquence, Virtualisation de mesure, Validation, Icnirp

### Virtualization of measurement of the general public exposure to low frequency magnetic field in automotive domain

Exposure to electromagnetic fields is a major issue in society that affects the automotive domain. The development of electric and hybrid vehicles technology requires the consideration of the issue of exposure since the conception stage. The work presented in this paper is mainly concerned with exposure to low-frequency (LF) magnetic fields distinguished with non-thermal electric stimulation effects. In this frequency range, the main sources of exposure risks are the powertrain elements often located close to the passengers. The main objective of this thesis is to virtualize the measurement assessing exposure to LF magnetic fields, hitherto performed by a commercial exposure level tester, to be able to minimize exposure risks, a priori, without incurring additional costs to the manufacturer. This is realized by virtualizing the measuring instrument. We focus first on understanding the exposure evaluation measurement and on the operation of the ELT-400 Narda field meter used at our automobile manufacturer to measure the exposure index. Thus, we show the different definitions and methods of calculating exposure index of the general public to LF magnetic fields. Finally, we present applications of the use of the field meter on measuring cases in statistic and dynamic states. The second part of the study is consecrated to the construction of the virtual prototype to model the measurement of the exposure index to LF magnetic fields performed by Narda field meter ELT-400. To do this, first we develop and optimize the model of the field meter's triaxial probe in FEKO to position and orient the probe as selected by the user. Then the magnetic field radiated by the virtual probe is processed to obtain a virtual measurement of the magnetic induction detected by the probe and of the exposure index. The third part of the study deals with the validation of the whole model on real cases of measurements done over manual spot welding clamps by comparing the virtual prototype results with those measured. The model validation is performed in three different case studies corresponding to different field profiles, different frequencies in LF domain and different forms of signal. In the last part of our study, a stochastic simulation approach is proposed by

applying the Monte-Carlo Method based on a large number of random draws. This method allows studying the dispersion of results due to the plausible imprecise positioning and orientation committed by the operator of the probe. This method is applied at different distances from elementary radiating sources. The main results of this part focus on the link between the field homogeneity at the investigated point and the variability of the virtual measurement around this point due to the inaccuracy committed.

**Keywords:** Exposure, General population, Low frequency magnetic field, Virtualizing measurement, Validation, Icnirp

## Mickael Brison

### Réseau de communication courant porteur en ligne pour la collecte d'informations et le diagnostic d'équipements embarqués dans l'aéronef

Ces travaux portent sur la faisabilité de l'établissement d'un réseau Courant Porteur de Ligne (CPL) pour transmettre des données de maintenance prédictive dans le domaine aéronautique. Le CPL est identifié comme solution afin d'augmenter le nombre d'informations échangées sans modifications du câblage déjà présent dans l'avion. L'approche adoptée au cours de cette thèse porte sur l'adaptation des solutions CPL existantes sur le marché afin qu'elles puissent être déployées sur un réseau avionique classique. Ces modifications doivent respecter les normes aéronautiques qui intègrent notamment sur la protection foudre (DO-160) et les mécanismes de couplage pour assurer la liaison de communication sur les lignes de puissance. Des expérimentations ont été réalisées pour vérifier les performances que les solutions CPLs pourraient attendre en utilisant le ratio signal sur bruit (SNR) comme paramètre de comparaison. Un montage permettant de respecter à la fois la contrainte de protection à la foudre et le fonctionnement des transmissions CPM a été identifié et évalué par le biais de simulations et d'expérimentations en laboratoire. Ce montage nous a permis d'augmenter le SNR de la liaison CPL jusqu'à 40dB. Les circuits de couplage présents sur les modems CPL du commerce ont été optimisés afin de mieux s'adapter à l'environnement aéronautique. La conception de ces circuits sont complètement décrites, dont notamment la réalisation du transformateur HF permettant l'adaptation d'impédance. Une fois les modifications effectuées, nous avons réalisé une série de mesures d'émissions conduites générées les chipsets afin de vérifier leur conformité aux normes CEM DO-160. Les tests ont porté sur des modems classiques et des modems modifiés liés à un équipement classique avionique. Ces tests nous ont montré que, sans les modifications proposées au niveau du circuit de couplage, il est impossible de communiquer sur des lignes fortement bruitées. Dans le cas de bruits générés à la limite de la norme DO-160, notre modem modifié atteint un débit de 46 Mbps en émission et 36 Mbps en réception. Dans cette dernière manipulation, nous atteignons dans un pire cas de perturbations un débit supérieur à celui de notre cahier des charges.

**Mots-Clés :** Courant porteur en ligne, Aéronautique, Cem

### Power line communication applied for the collection of informations and equipment diagnosis on an aircraft.

This work focuses on the feasibility of a Power Line Communication (PLC) network for transmitting predictive maintenance data on avionics power lines. PLC is identified as a solution to increase the number of information exchanged without modification of the wiring already present in the aircraft. The approach taken in this thesis deals with the adaptation of existing PLC solutions on the market so that they can be deployed on a conventional avionics network. These modifications include lightning protection and coupling circuits to ensure the communication over the power network. Experiments were conducted to verify the performance that PLC solutions could expect by using the signal-to-noise ratio (SNR) as a comparison parameter. A circuit allowing to respect lightning protection constraints and that allow PLC transmissions has been identified and evaluated by means of simulations and laboratory experiments. This modification allowed us to increase the SNR of the PLC link up to 40dB. Coupling circuits on commercial CPL modems have been optimized to better adapt PLC signal to the avionic environment. The design of these circuits is completely described, including the realization of the HF transformer for impedance matching. Once the changes were made, we performed a series of conducted emissions measurements that generated the chipsets to verify their compliance with the CEM DO-160 standards. The tests focused on conventional modems and modified modems related to conventional avionics equipment. These tests showed us that, without the proposed modifications at the level of the coupling circuit, it is impossible to communicate on very noisy lines. In the case of noise generated at the limit of the DO-160 standard, our modified modem achieves a data rates of 46 Mbps for transmission and 36 Mbps for reception. In this last manipulation, we reach in a worse case of disturbances a data rate higher than the specifications needed.

**Keywords:** Power line communication, Avionics, Emc

## Nastiti Puspitosari

### Mesure de la densité d'états de couches minces de matériaux semi-conducteurs par des méthodes de photocourant

Les recherches sur les matériaux en couches minces dédiées à l'industrie solaire restent un sujet d'intérêt avec le nombre croissant de types de matériaux incorporés en tant qu'absorbeur dans un dispositif solaire. Le besoin de techniques de caractérisation est donc aigu pour l'optimisation des matériaux et leur incorporation dans des cellules photovoltaïques. Dans cette thèse, une méthode de photo-courant basée sur la spectroscopie de photo-courant à transformée de Fourier (FTPS) est utilisée pour effectuer des mesures sur des matériaux en couches minces et des cellules solaires. Notre FTPS a été développée pour réaliser 3 types de mesures: 1.) mesure de réflexion et de transmission (R/T), 2.) spectroscopie du coefficient d'absorption, et 3.) mesure de réponse spectrale, efficacité quantique externe et densité de photo-courant court-circuit. Cette dernière est spécifiquement utilisée pour les cellules solaires. Nous avons utilisé les résultats de R/T pour effectuer une simulation numérique donnant l'épaisseur, l'indice de réfraction, la rugosité du film et le coefficient d'absorption optique. Une modélisation de la densité d'états (DOS) en utilisant le logiciel DeOST automatisé avec l'algorithme TLBO (Teacher Learner Based Optimization) a été développée pour trouver les valeurs des paramètres de DOS les mieux adaptées afin de reproduire le  $\alpha$  expérimental. Une analyse de sensibilité a été faite pour trouver les paramètres DOS les plus importants parmi 15-17 paramètres. Nous avons mesuré plusieurs échantillons de a-Si: H déposés sous différentes conditions de dépôt, et utilisé nos résultats pour étudier leur DOS. Une comparaison des mesures de  $\alpha$  sur a-Si: H déposé sur un substrat de verre et incorporé dans une cellule solaire a également été réalisée. Cette étude a conclu qu'une correction du spectre de coefficient d'absorption doit être effectuée pour les mesures sur les cellules solaires.

**Mots-Clés :** Densité d'états, Couches minces semiconducteurs, Spectroscopie photocourant

### Density of states measurements on semiconductor and thin film materials using photocurrent methods

Investigations on thin film materials dedicated to the solar industry are still a matter of interest with the growing numbers of material types incorporated as absorbers in a solar cell device. The need of characterization techniques is therefore acute for the optimization of materials and their incorporation in solar devices. In this thesis, a photocurrent method based on Fourier Transform Photocurrent Spectroscopy (FTPS) is used to perform the measurements of thin film materials and solar cells. Our FTPS was further developed to perform 3 types of measurements: 1.) reflection and transmission (R/T) measurement, 2.) absorption coefficient spectroscopy and 3.) spectral response, external quantum efficiency, and short circuit photocurrent density measurements. This latter is specifically used for solar cells. We used the R/T results to perform numerical simulations giving the thickness, refractive index, film roughness, and optical absorption coefficient. A modeling of the density of states (DOS) using the software DeOST automated with the Teacher Learner Based Optimization (TLBO) algorithm was achieved to find the best suited DOS parameter values to reproduce the experimental spectrum of  $\alpha$ . A sensitivity analysis was performed to find the most important DOS parameters among 15-17 parameters. For the experimental studies, we have measured several a-Si:H thin film samples prepared under different deposition conditions, and used their absorption coefficient; spectra to study their DOS. A comparison of absorption coefficient; measurements on a-Si:H thin films deposited on a glass substrate and incorporated in a solar cell device stack was also conducted. This study concluded that a correction of the absorption coefficient spectrum measured on solar cells had to be done.

**Keywords:** Density of states, Thin film semiconductors, Photocurrent spectroscopy



## Nuno Pinto Marinho

### Réduction d'un modèle de système électrique pour des études technico-économiques

La simulation des processus complexes dans des réseaux de transport d'électricité de grande taille nécessite la réduction de la dimension du problème. Comment réduire la complexité spatiale d'un réseau de grande dimension en gardant un bon niveau de précision ? Pour répondre à cette question nous avons divisé ce travail en trois grandes étapes : 1) la réduction par agrégation du nombre de nœuds; 2) la modélisation des liaisons entre ces clusters de nœuds et 3) le calcul des capacités des lignes équivalentes. L'agrégation des nœuds dans un cluster implique que celui-ci sera traité comme une plaque de cuivre par le modèle de marché. En conséquence, pour l'agrégation des nœuds, les congestions récurrentes dans le réseau sont identifiées et placées idéalement aux frontières des clusters. Après la réduction, la même répartition des flux dans le réseau complet et dans le modèle réduit du réseau doit être trouvée. Pour ce fait une méthodologie d'estimation d'une matrice PTDF a été développée. Pour les études économiques la limite thermique des lignes est un paramètre clé. Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthodologie qui estime les capacités équivalentes à partir des points de fonctionnement historiques du système complet. Les approches présentées dans ce travail ont été appliquées sur un modèle du réseau continental européen et ont permis d'obtenir un modèle simplifié qui minimise la perte d'information.

**Mots-Clés :** Marché d'électricité, Réduction de réseau

### Reduction of an electrical power system model for techno-economic studies

The simulation of complex processes in large scale power systems needs the reduction of the problem. How to reduce the spatial complexity of a large scale power network while minimizing information loss? To answer this question we have divided this work in three main steps: 1) network buses aggregation; 2) modelling of the clusters' links; 3) defining the equivalent branches maximum exchange capacity. The bus aggregations in a cluster implies that it will be treated as a copper-plate by the market model. Therefore, the most frequent network congestions must be identified ideally placed at the clusters frontiers. After the reduction, the same power flow repartition must be found in both reduced and complete model. To do that, a methodology to define a PTDF matrix was developed. For economic purpose studies, the branches maximum capacity is a key parameter, to define this value, a methodology is proposed that estimates the equivalent transmission capacities using historical system operating set points. These approaches were applied to the European transmission network and allowed to define a reduced model that minimises the information loss.

**Keywords:** Electricity markets, Network reduction

## Oussama Moudda Azzem

### Système Optoélectronique sur puce pour le diagnostic à haut débit des interactions biologiques

Le vieillissement de la population et l'évolution des maladies infectieuses, notamment le Coronavirus (COVID-19), mettent en évidence l'urgence de développer des dispositifs médicaux innovants permettant un diagnostic avancé sur le lieu de soins ou de résidence, ainsi que des approches préventives. Dans ce contexte, les tests au point de service (Point of Care Test - POCT) ou les tests de diagnostic rapide (Rapid Diagnostic Test - RDT) sont des outils essentiels pour l'administration immédiate d'un traitement pour les cas graves, ainsi que pour la mise en place rapide de mesures préventives visant à interrompre et à arrêter la propagation de la maladie infectieuse. Le but de cette thèse est de concevoir un laboratoire sur puce pour le diagnostic des interactions biologiques. La méthode de mesure utilisée est une méthode optique et elle repose sur le format ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) pour détecter des protéines ou des agents biologiques ne sont pas compatibles avec la conception de systèmes compacts et à faible coût, et peuvent générer des incertitudes faussant les mesures. Le laboratoire sur puce est un circuit intégré qui ont été conçus sous la technologie XH018 de la fonderie X-FAB. Le circuit intégré contient une matrice de 32x32 pixels avec toute l'électronique de lecture et de commande. Cette taille est utilisée à titre démonstratif, nous pouvons agrandir la taille. Le capteur optique utilisé est une double photodiode à jonction entrée BDJ (Buried Double Junction). Cette dernière nous permet d'avoir deux réponses spectrales. Le pixel contient un BDJ et une électronique de lecture passé sur une architecture du pixel active APS (Active Pixel Sensor) à bas bruit. Une électronique de commande ligne et colonne a été conçu pour avoir plusieurs modes de lecture. Un mode de lecture de toute la matrice, un mode d'adressage pour lire un pixel précis et un mode hybride pour lire qu'une seule colonne. Le layout a été réalisé et des simulations post-layout ont été effectué pour valider le design. Enfin nous avons envoyé notre circuit en fabrication.

**Mots-Clés :** Laboratoire sur puce, Photodétecteurs à jonctions entrées, Active Pixel Sensor, Diagnostic biologique, Circuit intégré

### Optoelectronic system on chip for high flow diagnostics of biological interactions

The ageing of the population and the evolution of infectious diseases, in particular the Coronavirus (COVID-19), highlight the urgent need to develop innovative medical devices allowing advanced diagnosis at the point of care or residence, as well as preventive approaches. In this context, Point of Care Tests (POCT) or Rapid Diagnostic Tests (RDT) are essential tools for the immediate administration of treatment for severe cases, as well as for the rapid implementation of preventive measures to interrupt and stop the spread of the infectious disease. The aim of this thesis is to design a lab-on-a-chip for the diagnosis of biological interactions. The measurement method used is an optical method and relies on the ELISA (Enzyme-Linked ImmunoSorbent Assay) format to detect proteins or biological agents are not compatible with the design of compact and low-cost systems, and may generate measurement uncertainties. The lab-on-a-chip is an integrated circuit that has been designed using X-FAB's XH018 technology. The IC contains a 32x32 pixel array with all readout and control electronics. This size is used as a demonstration, we can enlarge the size. The optical sensor used is a Buried Double Junction (BDJ) photodiode. This allows us to have two spectral responses. The pixel contains a BDJ and readout electronics based on a low noise APS (Active Pixel Sensor) architecture. A row and column control electronics has been designed to have multiple readout modes. A full matrix read mode, an address mode to read a specific pixel and a hybrid mode to read a single column. The layout was designed and post-layout simulations were performed to validate the design. Finally we sent our circuit to manufacturing.

**Keywords:** Lab-on-Chip, Buried junctions photodetectors, Active Pixel Sensor, Biological diagnostic, Integrated Circuit

## Pierre Bisiaux

### Etude et conception de CAN haute résolution pour le domaine de l'imagerie

Cette thèse porte sur la conception et la réalisation de convertisseurs analogique/numérique (ADC) haute résolution dans le domaine de l'imagerie spatiale en technologie 0.18  $\mu\text{m}$ . Un imageur CMOS est un système destiné à acquérir des informations lumineuses et les convertir en données numériques afin que celles-ci soient traitées. Ce système est composé d'une matrice de pixels, d'ADC, de registres et de blocs de signaux de commande afin de rendre toutes ces données disponibles. Avec la taille grandissante de la matrice de pixels et la cadence d'image par seconde croissante, l'ADC doit réaliser de plus en plus de conversions en moins de temps et est donc devenu l'un des « bottleneck » les plus importants dans les systèmes d'imagerie. Une solution adaptée a donc été le développement d'ADC colonne situé en bout de colonnes de pixels afin de réaliser des conversions en parallèles et c'est ce sujet qui va m'intéresser. Dans une première partie, n'ayant pas de contraintes sur l'architecture d'ADC à utiliser, une étude de l'état de l'art des ADC pour l'imagerie est réalisée ainsi que les spécifications visées pour notre application. Une architecture sigma-delta incrémental à deux étapes semble la plus prometteuse et va être développée. Ensuite, une étude théorique de l'ADC choisi, et plus particulièrement du modulateur sigma-delta à utiliser est effectuée, afin notamment de déterminer l'ordre de ce modulateur, mais également le nombre de cycles de cette conversions. Une fois les paramètres de modélisation définis, un schéma transistor est réalisé au niveau transistor, avec une particularité au niveau de l'amplificateur utilisé. En effet, afin de gagner en surface qui est l'un des points importants dans les systèmes d'imagerie, un inverseur est utilisé. Une étude de cette inverseur, afin de choisir le plus adapté à notre besoin est effectuée avec des simulations montecarlo et aux « corners ». Pour finir, un routage global de l'ADC est réalisé afin de pouvoir comparer ces performances à l'état de l'art.

**Mots-Clés :** Can, Imagerie, Sigma delta incrémental, Inverter-based

### Design of high resolution analog-to-digital converters for CMOS image sensors

This thesis deals with the conception and design of high resolution analog-to-digital converters (ADC) for CMOS image sensor (CIS) applications with the 0.18  $\mu\text{m}$  technology. A CIS is a system able to convert light to digital data to be processed. This system includes a pixel array, ADCs, registers and a set of clocks to acquire and transport the data. At the beginning, a single ADC was used for the whole matrix of pixels, converting the pixel value in a sequential way. With the growing size of the pixel array and the increasing frame rate, the ADC became one of the bottleneck of these system. A solution was found to use column ADC, located at the bottom of each column in order to parallelize the conversions. These column ADC are going to be my point of interest in this thesis. First of all, a state of the art of the ADC for CIS is realized in order to determine the best architecture to use. A two-step incremental sigma-delta is chosen and investigated. A theoretical analysis is done, especially on the modulator in order to determine the order of this modulator and the oversampling ratio of the conversion. Then a schematic is realized, with a special feature on the amplifier. Indeed, an inverter is used as amplifier in order to reduce the size of the ADC. A montecarlo and corner studies are then realized on the ADC, a layout is proposed and the ADC is compared to the state of the art of the ADC for CIS.

**Keywords:** ADC, Image sensor, Incremental sigma delta, Inverter-based

## Raphaël Zanella

### Convection thermomagnétique dans les ferrofluides : approximation par éléments finis et application au refroidissement des transformateurs

Nous proposons d'exploiter la convection thermomagnétique, phénomène caractéristique des Ferro fluides, pour améliorer les transferts de chaleur dans les transformateurs. Les équations régissant le système se composent des équations de Navier-Stokes dans l'approximation de Boussinesq, de l'équation de la conservation de l'énergie et des équations de la magnétostatique. Les simulations sont menées avec notre code de recherche parallélisé SFEMaNS (Spectral/Finite Element for Maxwell and Navier-Stokes) pour des géométries axisymétriques, utilisant une décomposition spectrale dans la direction azimutale et des éléments finis de Lagrange dans le plan méridien. Afin de résoudre ce problème spécifique, divers développements sont apportés à SFEMaNS, tels que l'implémentation des forces magnétiques de Kelvin et de Helmholtz. Le code est d'abord appliqué au refroidissement d'un solénoïde dans une cuve cylindrique contenant de l'huile de transformateur ou un ferrofluide à base d'huile de transformateur. Les résultats montrent que l'utilisation du ferrofluide diminue la température maximale du système grâce à la convection thermomagnétique et au changement des propriétés thermophysiques du fluide. L'influence de différents paramètres (fraction volumique de nanoparticules, présence d'un cœur ferromagnétique, propriétés magnétiques des nanoparticules) est étudiée. En particulier, les simulations confirment l'intérêt des nanoparticules magnétiques à faible température de Curie. Nous montrons également sur cet exemple que deux densités de force magnétique égales à un gradient près, telles que les forces de Kelvin et de Helmholtz, donnent le même écoulement. Un bon accord qualitatif est trouvé entre les résultats numériques et expérimentaux utilisant de l'huile de transformateur ou du ferrofluide. Le code est ensuite appliqué au refroidissement d'un système proche d'un transformateur de 40 kVA (20 kV/400 V). Les résultats montrent à nouveau une réduction de la température maximale grâce au ferrofluide.

**Mots-Clés :** Transformateur électrique, Ferrofluide, Convection thermomagnétique, Modélisation numérique, Couplage multiphysique, Méthodes des éléments finis

### Thermomagnetic Convection in Ferrofluids : Finite Element Approximation and Application to Transformer Cooling

We propose to make use of thermomagnetic convection, a characteristic phenomenon of ferrofluids, to improve heat transfer in transformers. The governing equations consist in the Navier-Stokes equations under the Boussinesq approximation, the energy conservation equation and the magnetostatics equations. The simulations are performed with the in-house parallel code SFEMaNS (Spectral/Finite Element for Maxwell and Navier-Stokes) for axisymmetric geometries, using a spectral decomposition in the azimuthal direction and Lagrange finite elements in the meridian plane. In order to solve this specific problem, various developments are brought to SFEMaNS, such as the implementation of the Kelvin and Helmholtz magnetic forces. The code is first applied to the cooling of a coil in a cylindrical tank containing either transformer oil or transformer oil-based ferrofluid. The results show that the use of the ferrofluid reduces the maximum temperature in the system due to thermomagnetic convection and the change of the fluid thermophysical properties. The influence of different parameters (volume fraction of nanoparticles, presence of a ferromagnetic core, nanoparticle magnetic properties) is investigated. In particular, the simulations confirm the benefit of magnetic nanoparticles with a low Curie temperature. We also show on this example that two magnetic body forces equal up to a gradient, such as the Kelvin and Helmholtz forces, give the same flow. A good qualitative agreement is found between the numerical and experimental results using transformer oil or ferrofluid. The code is then applied to the cooling of an electromagnetic system close to a 40 kVA (20 kV/400 V) transformer. The results show again a reduction of the maximum temperature when using ferrofluid.

**Keywords:** Thermomagnetic convection, Multiphysics coupling, Electrical transformer, Ferrofluid, Numerical modeling, Finite element method

## Redouane Boukadoum

### Étude des décharges partielles et de leur transition à l'arc dans la connectique aéronautique du futur

Dans le cadre du projet d'avion plus électrique entamé depuis quelques années, l'objectif visé est le remplacement des énergies hydraulique et pneumatique par l'énergie électrique. Cette transition technologique drastique nécessite une augmentation de puissance électrique à bord des avions, qui se traduit par une élévation des niveaux de tension du réseau embarqué (+/- 270 VDC et 230 VAC). Dans ces conditions, les phénomènes de décharges électriques doivent être considérés, en particulier pour les systèmes présents dans les zones non pressurisées des appareils. Les travaux de thèse ont porté sur l'étude des décharges partielles dans des connecteurs aéronautiques aujourd'hui exploités et susceptibles d'être mis en oeuvre dans les nouvelles conditions de tension. Une modélisation électrostatique du connecteur a été effectuée dans le but de mettre en évidence les zones où règne un fort champ électrique pouvant être à l'origine de l'apparition de décharges partielles. L'influence de paramètres, tels que la géométrie des conducteurs, la pression et la température, a été examinée d'un point de vue théorique par adaptation de la courbe de Paschen. Des mesures expérimentales, effectuées dans différentes conditions d'alimentation électrique, de pression, de température et d'état de vieillissement des connecteurs, ont permis de déterminer les tensions seuil d'apparition des décharges partielles. Ces mesures ont également permis de localiser les décharges au sein du connecteur, et ainsi d'identifier les points faibles de la structure. Des solutions visant à repousser les seuils d'apparition de décharges partielles sont alors proposées.

**Mots-Clés :** Connecteur aéronautique, Décharges partielles, Arc électrique, Tensions d'amorçage

### Study of partial discharges and their transition to an electric arc in aerospace power

The objective of the more electrical aircraft project is the replacement certain of the hydraulic and pneumatic systems by electrical ones. This drastic technological transition will require the increase of the onboard electrical power, which will result in the increase of voltage levels of the embedded networks. Current systems of 28 VDC and 115 VAC (400 Hz) are to be replaced by +/- 270 VDC and 230 VAC (360 to 1000 Hz). These new conditions of voltage levels will have a significant impact on the appearance of partial discharges that were almost absent up until present. Aeronautical grade electrical connectors being one of the major elements of embedded networks, the aim of this thesis is to study the conditions of occurrence of partial discharges in them. In this work, electrostatic modeling is carried out in order to identify the zones within the connectors where there is a strong electric field facilitating the appearance of partial discharges. Also presented are the results of experiments under both DC and AC voltage in which the ignition voltages of partial discharges and their location within the structure of the connector were studied.

**Keywords:** Aerospace connectors, Partial discharge, Electric arc, Inception voltage

## Shuangfeng Zhang

### Intégration dans un substrat PCB de composants à semi-conducteur grand gap pour le développement d'un convertisseur d'électronique de puissance à forte densité

Les nouveaux composants à semi-conducteur de type grand gap ont été développés pour des applications de conversion de puissance en raison de leurs hautes fréquences de commutation (de centaine kHz à quelques MHz) et pertes faibles. Afin de bien profiter ses avantages, la technologie des circuits imprimés (PCB) est intéressante pour une intégration à haute densité de puissance grâce à sa flexibilité et son faible coût. Cependant, à cause de la mauvaise conductivité thermique du matériau FR-4 utilisé pour le substrat PCB et la haute densité de puissance réalisée, il est primordial de trouver des solutions thermiques pour améliorer les performances thermiques de la structure de PCB. Dans cette thèse, trois solutions thermiques pour les structures de PCB ont été proposées, y compris des solutions avec des vias thermiques, de cuivre épais sur le substrat de PCB ainsi que des dispositifs de refroidissement thermoélectrique (TEC). Nos études sont basées sur la modélisation électrothermique et la méthode d'éléments finis en 3D. Tout d'abord, l'optimisation des paramètres des vias (diamètre, épaisseur de placage, surface formée par des vias, la distance entre des vias etc.) a été réalisée pour optimiser l'effet de refroidissement. Ensuite, on constate que les performances thermiques des structures de PCB peuvent être améliorées en utilisant cuivre épais sur le substrat de PCB. Cuivre épais augmente le flux thermique latéral dans la couche de cuivre. Les influences de l'épaisseur de cuivre (35 à 500  $\mu\text{m}$ ) ont été étudiées. Cette solution est facile à réaliser et peut être combinée à d'autres solutions de refroidissement. Enfin, le dispositif thermoélectrique comme les modules Peltier est une technologie de refroidissement local. Les influences des paramètres de Peltier (Propriétés du matériau thermoélectrique, nombre d'éléments Peltier, distance entre la source de chaleur et les dispositifs Peltier, etc.) ont été identifiées. Il est démontré que des modules Peltier ont l'application potentielle pour le développement d'intégration de PCB attendu que son active contrôle des températures.

**Mots-Clés :** Modélisation électrothermique, Technologies de PCB, Modélisation 3D, Gestion thermique

### Wide Bandgap Semiconductor Components Integration in a PCB Substrate for the Development of a High Density Power Electronics Converter

The emerging wide bandgap (WBG) semiconductor devices have been developed for power conversion applications instead of silicon devices due to higher switching frequencies (from few 100 kHz to several MHz) and lower on-state losses resulting in a better efficiency. In order to take full advantage of the WBG components, PCB technology is attractive for high power density integration thanks to its flexibility and low cost. However, due to poor thermal conductivity of the commonly used material Flame Retardant-4 (FR4), efficient thermal solutions are becoming a challenging issue in integrated power boards based on PCB substrates. So it is of the first importance to seek technological means in order to improve the thermal performances. In this thesis, three main thermal management solutions for PCB structures have been investigated including thermal vias, thick copper thickness on the PCB substrate as well as thermoelectric cooling (TEC) devices. Our studies are based on the electro-thermal modeling and 3D finite element (FE) methods. Firstly, optimization of the thermal via parameters (via diameter, via plating thickness, via-cluster surface, via pattern, pitch distance between vias etc.) has been realized to improve their cooling performances. We presented and evaluated thermal performances of the PCB structures by analyzing the thermal resistance of the PCB substrate with different thermal vias. Secondly, it is found that thermal performances of the PCB structures can be enhanced by using thick copper thickness on top of the PCB substrate, which increases the lateral heat flux along the copper layer. Influences of the copper thickness (35  $\mu\text{m}$  to 500  $\mu\text{m}$ ) has been discussed. This solution is easy to realize and can be combined with other cooling solutions. Thirdly, thermoelectric cooler like Peltier device is a solid-state cooling technology that can meet the local cooling requirements. Influences of Peltier parameters (Thermoelectric material properties, number of Peltier elements, distance between the heating source and the Peltier devices etc.) have been identified. All these analyses demonstrate the potential application of Peltier devices placed beside the heating source for PCB structures, which is a benefit for developing the embedding technology in such structures.

**Keywords:** Thermal management, 3D FE Modeling, PCB technology, Electrothermal modeling

## Téegwendé Balma

### Caractérisation radioélectrique des satellites de télécommunications du futur

Les paramètres radioélectriques des satellites sont actuellement mesurés directement, à l'aide d'une base compacte. Cependant, les limites de ces bases sont atteintes à cause de l'augmentation des dimensions des satellites, du nombre et de la complexité des antennes qu'ils comportent. Les techniques de champ proche constituent une solution prometteuse sous la forme de base pla-naire. Ces techniques consistent à mesurer le champ rayonné à proximité de la source pour en déduire, par traitement mathématique, le champ à grande distance. Ce travail de thèse porte sur l'adaptation des techniques de champ proche au test des satellites de télécommunications. La caractérisation du rayonnement des antennes par ces techniques est aujourd'hui largement utilisée. Toutefois, un développement théorique doit être complété et des méthodes de mesures proposées pour le test de l'ensemble des paramètres de la charge utile. Des difficultés spécifiques liées à la fonction du satellite (transpondeur) et à l'accès limité aux antennes et à l'électronique du satellite doivent être prise en compte dans la mise en oeuvre de ces méthodes de mesure. Enfin les mesures en champ proche sont affectées par plusieurs causes d'erreurs. L'identification des sources de ces erreurs et l'évaluation de leurs contributions au résultat final constituent une partie importante du travail de thèse. L'étude globale permet de dimensionner un système de mesure complet bénéficiant d'un bon niveau d'optimisation.

**Mots-Clés :** Satellites, Transformation, Champ Proche, Champ Lointain, Mesure d'antennes et de charge utile, Analyse d'incertitude et précision, Base compacte

### Radioelectric measurements of future telecommunication satellites

Nowadays, the radioelectric characteristics of satellites are directly measured by means of a compact range basis. However, the limits of these bases are affected by the growth of the satellite dimensions, in addition to the number and the complexity of the integrated antennas. On the other hand, near field techniques formed a promising solution under the planar range form. These techniques consist of measuring the radiated field near the source and accordingly deduce the far field by the means of mathematical analysis. The purpose of this thesis is to adapt near field techniques for testing telecommunication satellites. In fact, these techniques are widely used for antenna pattern measurements. However, a theoretical development has to be completed and measurement methods need to be proposed for testing all payload parameters. Unfortunately, specific difficulties related to the satellite function (transponder) and the limited access to antennas and satellite electronics have to be taken into account in the implementation of these measurement methodologies. Finally, the near field measurements are affected by many causes of errors. The identification of the error sources and the evaluation of their contribution to the final results constitute an important part of the thesis work. The global study allows dimensioning a complete measurement system with a good optimization.

**Keywords:** Satellites, Near Field to Far Field Transformation, Antenna and Payload Measurement, Uncertainty analysis and measurement accuracy, Compact range



## Teodor Wisniewski

### Modélisation non-linéaire des machines synchrones pour l'analyse en régimes transitoires et les études de stabilité

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été effectués dans le cadre d'une collaboration entre Leroy Somer et le laboratoire de génie électrique et électronique de Paris (GeePs). Ils ont pour objectif les simulations des phénomènes observés en mode transitoire des machines électriques. Ces simulations sont particulièrement orientées par les nouvelles exigences issues du Grid Code pour les alternateurs connectés au réseau. Principalement, deux types de modèles ont été développés. Le premier se base sur une représentation de l'état magnétique de la machine où chaque flux est exprimé en fonction des courants des différentes bobines. Le second modèle regroupe les courants en utilisant des courants magnétisants sur les axes  $d$  et  $q$  associés à des coefficients de saturation pour chaque flux et simplifie la représentation magnétique, notamment pour la prise en compte du circuit amortisseur. Avec une modélisation suffisamment précise du comportement magnétique non linéaire de la machine, ils permettent de mieux prédire les courants et le couple électromagnétique lors de défauts tels que les creux de tension. Les travaux effectués présentés dans ce mémoire ont permis, en partant des descriptions des saturations trouvées dans une machine, de définir des méthodes pour incorporer la saturation dans les modèles de type circuit et finalement d'aboutir au choix du modèle non-linéaire pour une machine électrique donnée. Grâce à un temps de calcul réduit, ils ont aussi conduit à l'intégration sous Simulink de modèles de la machine et du système d'entraînement pour la réalisation d'études de stabilité et pour créer un environnement de mise au point de la commande du système.

**Mots-Clés :** Machine synchrone, Saturation, Amortisseurs, Modèle non-Linéaire, Grid code

### Nonlinear modelling of synchronous machines for transient analyses and stability studies

The research presented in this thesis was carried out in the research and development project between Leroy Somer and the Group of Electrical Engineering of Paris (GeePs). Their objective is to simulate the phenomena observed in the transient states of electrical machines. These simulations are particularly oriented by the new Grid Code requirements for alternators connected to the power network. Two types of models have been principally developed. The first one is based on a magnetic description of the machine where each flux is expressed as a function of the currents flowing through the different machine windings. The second one regroups the different winding currents by using the magnetizing currents on axes  $d$  and  $q$  associated to saturation coefficients for each flux linkage and simplifies the magnetic description, especially when taking into account the damper windings. With a sufficiently precise modelling of the non-linear magnetic behaviour of the machine, it is possible to better predict the currents and the electromagnetic torque under fault conditions such as voltage drops. The work carried out in this thesis has made possible, starting from the descriptions of the saturation effects found in a machine, to define methods for incorporating saturation into circuit models. Finally, one can make a choice of the dynamic non-linear model for a given machine. Thanks to short computation time, it also led to the Simulink integration of the machine and excitation system models paving the way for stability and control studies.

**Keywords:** Synchronous machine, Saturation, Dampers, Nonlinear model, Grid code

## Valentin Segouin

### Développement d'un outil de Corrélation d'Images Numériques pour la caractérisation du comportement piézoélectrique et ferroélectrique

Les matériaux piézoélectriques et ferroélectriques présentent un comportement électromécanique couplé. Cette particularité leur a permis d'être utilisés dans de nombreuses applications telles que les applications de capteur, actionneur, transformateur et récupérateur d'énergie. En outre, en raison de leur comportement non linéaire et dissipatif, les matériaux ferroélectriques sont de plus en plus utilisés dans le domaine de l'électronique en tant que capacité accordable, mémoire non volatile, oscillateur et filtre. La performance et la fiabilité de ces systèmes dépendent directement des propriétés ferroélectriques et piézoélectriques du matériau, qui nécessite par conséquent d'être caractérisé. Les propriétés piézoélectriques, ferroélectriques, ferroélastiques et diélectriques des matériaux ferroélectriques ont été le sujet de nombreuses études. Pourtant, les conditions d'essai restent difficiles à maîtriser car les propriétés thermiques, mécaniques et électriques de ces matériaux sont fortement couplées. Dans cette thèse, un dispositif de mesure de champ de déformation a été conçu pour caractériser le comportement piézoélectrique et ferroélectrique des céramiques ferroélectriques. Ce dispositif utilise un banc optique ainsi qu'un algorithme de Corrélation d'Images Numériques (CIN) 2D appelé CorreliRT3. Cet algorithme est basé sur une approche globale et réduit les erreurs de mesure de déplacement en s'appuyant sur les équations d'équilibre de la mécanique des solides. Grâce au banc de caractérisation par CIN, il est montré que les déformations piézoélectriques et ferroélectriques peuvent être mesurées avec une incertitude d'environ  $10^{-5}$ . Cette incertitude est atteinte aussi bien pour des sollicitations simples que couplées (champ électrique et/ou contrainte mécanique). Il est aussi montré que le banc expérimental permet de vérifier les conditions d'essai en caractérisant l'hétérogénéité des déformations lors d'un essai matériau. Dans les deux derniers chapitres, un matériau ferroélectrique est caractérisé sous champ électrique et sous contrainte mécanique. Le comportement du matériau est présenté et discuté dans les différentes configurations de chargement. Les propriétés matériau, telles que les coefficients piézoélectriques ( $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ), sont extraites et étudiées en fonction du champ électrique et de la contrainte. Les résultats montrent que la CIN est capable de mesurer et caractériser le comportement et les propriétés des matériaux ferroélectriques et piézoélectriques. L'avantage de la CIN étant que, contrairement aux méthodes de mesure classiques, celle-ci ne perturbe pas les conditions d'essai (mesure sans contact) et permette de détecter la présence d'erreurs systématiques.

**Mots-Clés :** CIN global, Champ de déformation, Cycle d'hystérésis, Régularisation mécanique, Couplage électromécanique

### Development of a Digital Image Correlation tool for the characterisation of the piezoelectric and ferroelectric behaviour

Piezoelectric and ferroelectric materials exhibit a coupled electromechanical behaviour. This property allows a use in various kinds of applications such as sensors, actuators, harvesting devices or converters. In addition, due to their non-linear and dissipative behaviour, ferroelectric materials are increasingly used in electronic applications such as tunable capacitors, non-volatile memory, oscillators and filters. The performance and reliability of such devices depend on the material electromechanical properties, which consequently need to be characterised. In the past decades, such characterisation was largely developed and the piezoelectric, ferroelectric, ferroelastic and dielectric properties of ferroelectrics were the subject of numerous studies. Yet the test conditions are difficult to control due to the strong interplay between thermal, mechanical and dielectric properties. In this work, a full-field measurement apparatus has been designed to characterise the piezoelectric and ferroelectric strain behaviour of ferroelectric ceramics. This apparatus uses an optical setup and a 2D Digital Image Correlation (DIC) algorithm named CorreliRT3. The algorithm is based on a global approach and reduces the displacement field errors using the balance equations of solid mechanics. It is shown that piezoelectric and ferroelectric strains can be measured with an uncertainty around  $10^{-5}$  by using the developed setup. This uncertainty is reached under uncoupled or coupled loading (electric field and/or stress). It is also shown that the experimental setup can control the test conditions by characterising the strain heterogeneity during the test. In the two last chapters, a ferroelectric material is characterised under electric field and stress. The material behaviour is presented and discussed in the different loading configurations. Material properties, such as the longitudinal and transverse piezoelectric coefficients ( $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ) are extracted and analysed as a function of the electric field and stress. The results show that the DIC technique is able to measure and characterise the behaviour and the properties of ferroelectric and piezoelectric materials. The main benefits of this technique is that, contrary to classical measurement techniques, the measurement does not alter the test conditions. Moreover, DIC is able to detect test anomalies such as strain heterogeneities.

**Keywords:** Strain field, Mechanical regularisation, Hysteresis loop, Global DIC, Electromechanical coupling

## Yi Zheng

### Modélisation compacte multi-échelle de nano-transistors à base de Carbone

Parmi les nouveaux matériaux émergents à base de carbone, le graphène est rapidement devenu un candidat idéal pour plusieurs applications en nanoélectronique. Dans ce contexte, différentes méthodes ont été proposées pour transformer ses propriétés électriques, et notamment supprimer son point de dégénérescence de Dirac. L'ouverture d'un gap d'énergie peut ainsi conduire à l'usage du graphène dans des nano-transistors. Dans cette thèse, nous appliquons un modèle compact semi-analytique pour étudier deux types de nanotransistors à base de graphène: les transistors à nanoruban et les transistors à nanomesh. Un modèle de type tight-binding est utilisé pour déterminer les expressions analytiques des bandes d'énergie d'un nanoruban de graphène. Des comparaisons sont montrées avec des approches *ab initio*, et avec des mesures effectuées sur des transistors du même type mais à plus grande échelle. Dans le contexte de l'électronique pour applications souples, les contraintes mécaniques sur les circuits et les déformations géométriques des composants à base de graphène peuvent constituer un problème important. Nous étudions ces effets sur les propriétés de conduction des transistors à nanorubans (dans les régimes balistique et partiellement balistique). En supposant la présence de petites déformations, une mise à l'échelle spectrale et un décalage spectral dû à la présence d'une déformation peuvent être pris en compte de manière analytique. Ce modèle conduit à définir sous forme analytique les quantités effectives (masses, densités d'états) utilisées pour calculer numériquement les potentiels et les courants dans le nano-dispositif. Les résultats numériques sont présentés à la fois sous un régime balistique et partiellement balistique, avec ou sans contacts de Schottky. Les résultats proposés dans le Chapitre 2 illustrent de manière très simple comment la déformation du nanoribbon de graphène influence les caractéristiques I-V du transistor. Une autre solution pour réaliser un nanotransistor de graphène est la gravure de nano-trous dans une feuille de graphène (réalisant ainsi un nanomesh). Si le graphène nanomesh est correctement formé, le rapport de courant On / Off du transistor devrait être amélioré. Dans le Chapitre 3, la méthode semi-analytique est utilisée pour évaluer les performances d'un nanomesh à transistors à nanorubans. Les résultats sont à nouveau comparés à une méthode *ab-initio*. Les caractéristiques I-V du graphène nanomesh transistor sont présentées et comparées aux résultats expérimentaux. Les résultats proposés montrent comment la taille des nanomesh de graphène influence les caractéristiques I-V du transistor. Compte tenu de la simplicité et du temps de calcul réduit de l'approche proposée, ces résultats peuvent permettre des analyses paramétriques, des optimisations et des caractérisations de nano-transistor à graphène dans des circuits à plus grande échelle.

**Mots-Clés :** Graphène, Transistor, Graphène-nanoruban, Graphène-nanomesh, Déformation, Électronique flexible

### Compact multiscale modeling of carbon-based nano-transistors

Among emerging carbon materials, graphene has rapidly become an ideal candidate for nano-electronics. In this context, different methods have been proposed to transform its electric properties and remove the Dirac degeneracy point, leading to application to nano-transistors. In this thesis we apply a semi-analytical compact model to study two kinds of graphene-based nanotransistors: nanoribbon graphene transistor and nanomesh transistor. A tight-binding model is used to determine analytical expressions for the energy bands of a graphene nanoribbon. Comparisons are shown with *ab-initio* approaches and with measurements done on larger-scale transistors of the same kind. In the context of flexible electronics, mechanical stresses on circuits and subsequent geometric deformations of graphene-based components is an important issue. We investigate these effects on the conduction properties of nanoribbon transistors (both in ballistic and partially ballistic regimes). By assuming the presence of small deformations, a spectral scaling and a spectral shift due to the presence of a deformation can be taken into account analytically. This model leads to define in closed form effective quantities (masses, densities of states) used to numerically calculate potentials and currents in the nano-device. Numerical results are shown both in a ballistic and partially-ballistic regime, with and without the presence of Schottky contacts. The proposed results in Chapter 2 illustrate in a very simple way how the deformation of graphene nanoribbon influences the I-V characteristics of transistor. Another solution to realize graphene nanotransistor is the etching of nanoholes in a graphene sheet (thus realizing a nanomesh). If graphene nanomesh is properly shaped, the On/Off current ratio of transistor is expected to be enhanced. In Chapter 3, the semi-analytic method is used to evaluate the performance of nanomesh transistor with nanoribbon ones. The results are again compared with an *ab-initio* method. I-V characteristics of graphene nanomesh transistor are presented and compared with experimental results. The proposed results show how graphene nanomesh size influences the I-V characteristics of transistor. Given the simplicity and the reduced computation time of the approach, these results can lead to perform parametric analyses, optimizations and characterization of graphene nano-transistor when applied in larger-scale circuits.

**Keywords:** Graphene, Transistor, Nanoribbon graphene, Nanomesh graphene, Deformation, Flexible electronics