



# Geeps

Génie électrique et électronique de Paris

## LABORATOIRE GEEPS THÈSES 2019



université  
PARIS-SACLAY



## Alexandra Levtchenko

### Étude de dispositifs photovoltaïques à hétérojonctions a-Si:H/c-Si : caractérisations vs. simulations en régime modulé de structures planaires et modélisations optoélectroniques de nanofils à structure radiale

Dans le contexte de la recherche sur l'amélioration des performances et la réduction des coûts des cellules solaires à base de silicium, nous nous sommes intéressés dans cette thèse aux hétérojonctions entre le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H) et le silicium cristallin (c-Si). Nous avons étudié d'une part l'application de la technique de mesure du PhotoCourant Modulé (MPC) comme outil de caractérisation de l'interface a-Si:H/c-Si et que nous avons couplé à la technique de mesure de PhotoLuminescence Modulée (MPL) déjà largement utilisée pour étudier la qualité de passivation de l'interface. Nous avons alors caractérisé par ces deux techniques une série d'échantillons composés de (p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)c-Si d'épaisseur de (i)a-Si:H allant de 2 à 50 nm. Une partie importante de cette étude a été réalisée par simulations numériques en 2D afin d'interpréter nos résultats expérimentaux. Une cohérence dans l'estimation de la densité d'état de défauts à l'interface a-Si:H/c-Si a été obtenue par les deux techniques. Nous avons conçu d'autre part un outil de couplage des simulations électriques et optiques pour le design de cellules à base de nanofils à hétérojonction. Grâce à cet outil nous avons réalisé une étude plus réaliste et plus complète qu'auparavant où ces deux simulations étaient effectuées de manière séparée. Nous montrons notamment comment les conditions sur les contacts électriques des nanofils affectent les performances de la cellule solaire.

**Mots-Clés :** Photovoltaïque, Caractérisation, Simulation, Nanofils, PhotoCourant Modulé, PhotoLuminescence Modulée, Hétérojonction

### Study of photovoltaic devices based on a-Si:H/c-Si heterojunctions : characterizations vs. simulations in modulated regime of planar structures and optoelectrical modeling of radial nanowires

In the context of the research on improving performances and reducing costs of silicon-based solar cells, we focused on heterojunctions between hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) and crystalline silicon (c-Si). On the one hand, we studied the application of the Modulated PhotoCurrent technique (MPC) as a tool for characterizing the a-Si:H/c-Si interface and which we coupled to the Modulated PhotoLuminescence technique (MPL) widely used to study the quality of interface passivation. We characterized by these two techniques a serie of samples composed of (p)a-Si:H/(i)a-Si:H/(n)c-Si with a thickness of (i)a-Si:H going from 2 to 50 nm. An important part of this study was made by 2D numerical simulations in order to interpret our experimental results. We showed that both techniques give the same estimation of the density of interface defects between (i)a-Si:H and (n)c-Si. On the other hand, we developed a tool for coupling electrical and optical simulations for the design of nanowire-based solar cells with a radial heterojunction. Formerly, these simulations were most of the time performed separately and therefore were not allowing for a complete study of these kind of structures. We then made a study showing how the conditions of electrical contacts of nanowires affect the performances of these solar cells.

**Keywords :** Photovoltaics, Characterization, Modeling, Nanowires, Modulated PhotoCurrent, Modulated PhotoLuminescence, Heterojunction

## Audrey Morisset

### Intégration de jonctions poly-Si/SiOx sur cellules solaires silicium : Optimisation et compréhension des propriétés de conduction et de passivation de surface

Dans le contexte des cellules photovoltaïques (PV) à base de silicium cristallin (c-Si), le développement de structures de contacts dits « passivants », qui permettent de limiter les pertes par recombinaisons des porteurs de charge à l'interface entre le métal et le c-Si, est un des principaux leviers vers l'obtention de plus hauts rendements. Une approche de contacts passivés consiste à intégrer entre le métal et le c-Si une jonction composée d'une couche de silicium poly-cristallin (poly-Si) fortement dopée sur une mince couche d'oxyde de silicium (SiOx < 2 nm). Les objectifs de ce travail sont d'une part de développer une jonction poly-Si/SiOx compatible avec la fabrication industrielle des cellules PV, et d'autre part d'améliorer la compréhension des mécanismes de passivation et de transport des charges au niveau de la fine couche de SiOx située à l'interface entre le poly-Si et le c-Si. Dans ce travail, une jonction de poly-Si/SiOx dopée au bore a été développée, le dopage de la couche étant dans un premier temps réalisé in-situ pendant l'étape de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma (PECVD) de la couche poly-Si. La méthode de dépôt PECVD est répandue dans l'industrie PV et permet la fabrication de la couche poly-Si d'un seul côté du substrat c-Si. Cependant, elle induit une forte concentration d'hydrogène dans la couche déposée, ce qui entraîne la formation de cloques à l'interface avec le c-Si et tend à dégrader les propriétés de passivation de surface de la jonction après recuit de cristallisation. L'optimisation des conditions de dépôt (température de dépôt et ratio de gaz H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub>) a permis d'obtenir des couches de poly-Si dopées in-situ intègres. Par la suite, une méthode de dopage alternative, par le biais du dépôt d'une couche diélectrique riche en bore sur le poly-Si, a été appliquée afin de réduire l'apport en hydrogène pendant le dépôt et d'obtenir des couches de poly-Si intègres plus épaisses. L'ajout d'une étape d'hydrogénation a permis d'obtenir des propriétés de passivation de surface au niveau de l'état de l'art pour les deux types de jonctions poly-Si/SiOx développées. À la suite du développement de la jonction poly-Si/SiOx, la caractérisation physico-chimique de la couche SiOx a été réalisée et a démontré une possible amélioration de la stœchiométrie de la couche vers SiO<sub>2</sub> ainsi qu'une dégradation de son homogénéité en épaisseur sous l'effet du recuit de cristallisation à haute température. Ces phénomènes pourraient s'expliquer par une diffusion des atomes d'oxygène à l'interface. D'autre part, l'étude du transport des charges à travers le SiOx par C-AFM a mis en évidence les limites de cette technique quant à la détermination de nano-ouvertures au sein de la couche SiOx (qui favoriseraient le transport des charges). Enfin, une méthode de caractérisation des défauts recombinants à l'interface entre une jonction de poly-Si intrinsèque et le c-Si a été mise en œuvre. Cette méthode a permis de modéliser les recombinaisons à l'interface poly-Si/c-Si via deux défauts discrets apparents dont les niveaux d'énergie dans la bande interdite et les ratios de sections efficaces de capture des électrons et des trous ont été déterminés.

**Mots-Clés :** Silicium, Cellules solaires, Contacts passivés, Poly-Si

### Integration of poly-Si/SiOx contacts in silicon solar cells : Optimization and understanding of conduction and passivation properties

In the context of high efficiency solar cells (SCs) based on crystalline silicon (c-Si), the development of "passivating" contact structures to limit the recombination of charge carriers at the interface between the metal electrode and the c-Si has been identified as the next step to further improve the photovoltaic (PV) conversion efficiency. Passivating contacts consisting of a highly doped polycrystalline silicon layer (poly-Si) on top of a thin layer of silicon oxide (SiOx ≤ 2 nm) are particularly sparking interest as they already demonstrated promising conversion efficiency when integrated in SCs. The objectives of this work are to develop a poly-Si/SiOx passivating contact compatible with the industrial production of c-Si SCs, and to investigate the passivation and charge transport mechanisms in the region of the thin SiOx layer located at the interface between the poly-Si and the c-Si. In this work, a boron-doped poly-Si/SiOx contact was fabricated. The doping of the layer was first performed in-situ during the deposition of a hydrogen-rich amorphous silicon (a-Si:H) layer by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The PECVD step was followed by an annealing step for crystallization of the poly-Si layer. The PECVD presents the advantages of being widespread in the PV industry and enabling the fabrication of the poly-Si contact on a single side of the c-Si substrate. However, it induces a high concentration of hydrogen in the deposited layer, which causes the formation of blisters at the interface with the c-Si and tends to degrade the surface passivation properties of the contact after annealing for crystallization. The optimization of the deposition conditions (temperature and H<sub>2</sub>/SiH<sub>4</sub> gas ratio) enabled to obtain blister-free in-situ doped poly Si layers. An alternative doping method consisting of the deposition of a boron-rich dielectric layer on top of the poly-Si layer was applied to reduce the hydrogen content of the deposited layer. This approach enabled to obtain thicker blister-free poly-Si layers. The diffusion of hydrogen in the contact after annealing is known to provide a further chemical passivation of the poly-Si/c-Si interface. In this work, the addition of a hydrogenation step enabled to obtain state-of-the-art surface

passivation properties for the two types of poly Si/SiO<sub>x</sub> contact fabricated. After developing the poly-Si/SiO<sub>x</sub> contact, a study of the effect of the annealing step on the chemical and structural properties of the SiO<sub>x</sub> layer was performed. Results indicated a possible improvement of the stoichiometry of the layer towards SiO<sub>2</sub> as well as a degradation of its homogeneity at the poly-Si/c-Si interface after annealing at high temperature. These phenomena could be explained by a diffusion of the oxygen atoms content in the interfacial SiO<sub>x</sub> layer. The transport mechanism of charge carriers through the SiO<sub>x</sub> layer was conducted by C-AFM. This study revealed the limits of this technique to determine the presence of pinholes within the SiO<sub>x</sub> layer (that would help the transport of charge carriers). Finally, a method for characterizing recombinant defects at the interface between an intrinsic poly-Si junction and the c-Si has been developed. This method enabled to model the recombination phenomena at the poly-Si/c-Si interface via two apparent discrete defects. Their associated energy levels in the bandgap and ratios of electron and hole capture cross sections were estimated.

**Keywords** :Silicon, Solar cells, Passivated contacts, Poly-Si

## Benjamin Garlan

### Contributions à un microsystème électromagnétique et microfluidique pour la détection immunologique utilisant des nanoparticules magnétiques

L'augmentation continue de la circulation des populations et des biens ces dernières décennies accentue les risques de pandémie due à un mauvais confinement des antigènes dangereux à leur région d'apparition. Il est donc crucial de développer une technique rapide de détection de pathogène pour prévenir ces risques. Un projet multidisciplinaire a donc été mis en place entre Sorbonne Université à Paris et RWTH University à Jülich pour le développement d'un dispositif laboratoire-sur-puce intégré pour effectuer des tests immunologiques rapides, faciles et abordables. Ce dispositif de détection de pathogène est composé d'un canal microfluidique entouré de microbobines planaires en circuit imprimé responsables de l'émission et de la détection de champs magnétiques. Ainsi des nanoparticules magnétiques peuvent être détectées et quantifiées puis être corrélées à la présence du pathogène, en tant que marqueurs du test immunologique. Habituellement, l'étape de détection de la présence du pathogène dans un échantillon se fait grâce à un signal fluorescent ou électrochimique qui sont des techniques longues et avec une sensibilité limitée. En conséquence, les tests immunologiques magnétiques semblent être une alternative intéressante. L'utilisation de canaux microfluidiques permet de n'utiliser qu'une très petite quantité d'échantillon pour effectuer un test. Pendant ce doctorat, l'objectif principal a été d'améliorer le prototype du dispositif et la fonctionnalisation de surface du canal microfluidique avec des anticorps.

**Mots-Clés** : Détection des pathogènes, Laboratoire sur puce, Détection magnétique, Technique de mélange de fréquences, Fonctionnalisation de surface, Microfluidique

### Contributions to an electromagnetic and microfluidic microsystem for immunological detection using magnetic nanoparticles

The ever-increasing exchange of people and goods these last decades creates pandemic risks that should be prevented by containing the hazardous antigens in the region of the outbreak. Therefore, the rapid detection of a biological entity is critical to tackle this issue and others like environment contamination and bioterrorism. Consequently, a multidisciplinary project between Sorbonne Université in Paris and RWTH University in Aachen has been conducted to create a completely integrated lab-on-a-chip (LOC) for easy, rapid and cost-effective immunoassays. The pathogen sensing system is composed of a microfluidic channel surrounded by planar PCB microcoils, which are responsible for the emission and the detection of magnetic fields. This system allows the detection of magnetic nanoparticles (MNP) used for immunoassays in a "sandwich" antigen-antibody configuration. Using microfluidics allows us to test very small volume samples quickly. We successfully tested this device with different concentrations of nanoparticles, different microfluidic channel layouts, different types of nanoparticles and different materials for the microfluidic channel. Using the frequency mixing magnetic detection technique, a LOD of 15 ng/ $\mu$ L for 20 nm core sized MNP has been achieved with a sample volume of 14  $\mu$ L corresponding to a drop of blood. Antibody coating was also achieved on a Poly(methyl methacrylate) (PMMA) surface which is a more suitable material than the classically used polydimethylsiloxane (PDMS) for our application. In this thesis, emphasis is put on the improvement of the device prototype and the surface functionalization of the microfluidic channel with antibodies.

**Keywords** : Pathogen sensing, Lab on a chip, Magnetic detection, Frequency mixing technique, Surface functionalization, Microfluidic

## Bogdan Džonlaga

### Contribution au dimensionnement du convertisseur modulaire multiniveau

Le convertisseur multiniveau modulaire (MMC) est une solution appropriée pour les réseaux HVDC grâce à sa modularité, sa faible fréquence de commutation et sa tension alternative quasi-sinusoidale. En raison de sa topologie, son modèle mathématique est assez complexe et est donc souvent simplifié au stade de la conception. En particulier, la résistance équivalente au bras R, l'inductance du bras L et le courant circulant sont souvent négligés. Toutefois, les résultats expérimentaux obtenus avec notre prototype monophasé de MMC à pont complet à six niveaux ont montré que ces hypothèses ne sont pas toujours acceptables. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'étudier l'impact de R, L et du courant de circulation sur la tension du condensateur du module et sur la zone de fonctionnement du MMC. Premièrement, nous avons étendu le modèle basé sur les intégrales communément utilisé et nous avons clarifié les hypothèses sur lesquelles il repose. Entre autres, des expressions pour les courants de circulation et courant DC ont été développées et comparées à celles que l'on trouve dans la littérature. Cela nous a permis d'analyser l'ondulation de la tension du condensateur du module en fonction de R et L, sans courant de circulation. Deuxièmement, pour surmonter les limites du modèle basé sur l'intégrale, nous avons proposé d'utiliser un modèle MMC invariant dans le temps en régime permanent dans le système dq0. Quelques hypothèses seulement sont nécessaires pour obtenir ce modèle, mais une évaluation numérique est requise. Cela nous a permis d'analyser la tension moyenne du condensateur du module et l'ondulation de tension du condensateur du module en fonction de R et L, avec et sans courant de circulation. Troisièmement, en utilisant le modèle invariant dans le temps en régime permanent, nous avons développé un diagramme PQ détaillé du MMC. Outre la limite de courant AC, la limite de courant DC et la limite d'indice de modulation classiques, nous avons ajouté plusieurs limites internes: courant de l'IGBT, courant efficace des bras et ondulation du courant et de la tension du condensateur du module. Les résultats ont été confirmés par simulation numérique à l'aide d'un modèle détaillé Matlab Simulink SimPowerSystems. Les résultats présentés dans cette thèse pourraient être utilisés pour optimiser le dimensionnement des composants de la MMC en fonction de sa zone d'exploitation et pour évaluer l'impact de différents paramètres sur les performances du MMC.

**Mots-Clés :** MMC, Tension de condensateurs, Diagramme PQ, Prototype

### Contribution to the sizing of the modular multilevel converter

The modular multilevel converter is a suitable solution for HVDC grids thanks to its modularity, low switching frequency and quasi-sinusoidal AC voltage. However, due to its topology, its mathematical model is quite complex and is therefore often simplified at the design stage. In particular, the arm equivalent resistance R, the arm inductance L and the circulating current are often neglected. But experimental results obtained with our 1-ph 6-level full-bridge MMC prototype showed that these hypotheses are not always acceptable. In this context, the goal of this thesis is to study the impact of accounting for R, L and the circulating current on the module capacitor voltage and on the operating area of the converter. First, we extended the commonly used integral based model and we clarified the hypotheses behind it. Among others, expressions for the circulating and dc currents have been developed and compared with the one that can be found in the literature. It allowed us to analyze the module capacitor voltage ripple as a function of R and L, without circulating current only. Second, to overcome the limitations of the integral based model, we proposed to use a steady state time invariant (DeltaSigma) MMC model in dq0 frame. Only few hypotheses are required to obtain this model, but a numerical evaluation is required. It allowed us to analyze the module capacitor average voltage and the module capacitor voltage ripple as a function of R and L, with and without circulating current. Third, using the steady state time invariant model, we developed a detailed PQ diagram of the MMC. In addition to the conventional AC current limit, DC current limit and modulation index limit, we added several internal limits: IGBT current, arm rms current and module capacitor voltage and current ripple. The results have been confirmed by numerical simulation using a detailed Matlab Simulink SimPowerSystems model. The results presented in this thesis could be used to optimize the sizing of the components of the MMC considering its operating area, and to assess the impact of different parameters on the MMC performance.

**Keywords :** MMC, Capacitor voltage, Prototype, PQ diagrams

## Davi Rabelo Joca

### Une Topologie CA-CC Basé sur un Convertisseur Modulaire Multiniveau Entrelacé Faisible à Applications de Transformateur d'Électronique de Puissance

Ce travail concerne l'étude théorique, l'analyse numérique et la validation expérimentale d'une topologie de convertisseur d'électronique de puissance basée sur un convertisseur multiniveau modulaire entrelacé avec transformateur moyenne fréquence. L'architecture est adaptée pour l'étage de conversion AC-DC dans les applications de transformateur d'électronique de puissance pour la connexion entre un réseau alternatif moyenne tension et un réseau continu basse tension. L'entrelacement réduit les pertes par conduction dans les interrupteurs. Le transformateur moyenne fréquence 10 kHz assure une isolation galvanique et connecte le convertisseur multiniveau modulaire entrelacé à un convertisseur pont complet. Avec comme point de départ la structure, le principe de fonctionnement, la modélisation, la technique de modulation et le schéma de commande sont discutés. Une caractéristique du convertisseur est la génération simultanée de la tension du réseau basse fréquence et de la tension primaire du transformateur moyenne fréquence. L'équilibrage de la tension des condensateurs et la minimisation du courant de circulation sont combinés dans un seul algorithme. La commande régule le courant alternatif et la tension du bus continu, du côté haute tension, ainsi que la tension continue et le flux de puissance, du côté basse tension. La validation expérimentale du convertisseur est réalisée avec un prototype de 720 W monophasé à l'échelle réduite. Les résultats démontrent la stabilité du système de commande lors d'opérations en régime permanent et dynamiques (pas de charge, inversion du flux de puissance).

**Mots-Clés :** Convertisseur CA-CC isolé, Convertisseur modulaire multiniveau, Entrelacement, Transformateur d'électronique de puissance, Modulation vectorielle spatiale

### An AC-DC Topology Based on an Interleaved Modular Multilevel Converter Feasible to Solid-State Transformer Applications

This work aims to present the theoretical study, the numerical analysis and the experimental validation of a power electronics converter topology based on an interleaved modular multilevel converter with medium frequency transformer. The architecture is suitable for the AC-DC stage in solid-state transformer applications for the connection between a medium-voltage AC grid and a low voltage DC grid. The interleaving reduces the switch conduction losses. The 10 kHz medium frequency transformer provides galvanic isolation and connects the interleaved modular multilevel converter to a full-bridge converter. From the converter structure, the principle of operation, the modeling, the modulation technique, and the control scheme are discussed. One feature of the converter is the simultaneous generation of the low-frequency grid voltage and the medium-frequency transformer primary voltage. The capacitor voltage balancing and the circulating currents minimization are combined together in a single algorithm. The control system regulates the AC current and the DC bus voltage, on the high-voltage side, and the DC voltage and power flow, on the low voltage side. The experimental validation of the converter is made with a scaled-down single-phase 720 W prototype. The results demonstrate the control system stability in steady-state and dynamic (load step, power flow inversion) operations.

**Keywords :** Interleaving, Isolated AC-DC converter, Modular multilevel converter, Solid-state transformer, Space vector modulation

## Duy-Minh Nguyen

### Commande intermittente de la machine à réluctance variable à double saillance

La commande intermittente a pour but principal d'augmenter le rendement de l'ensemble machine-convertisseur par une réduction des pertes. Dans le but de maintenir le couple moyen de la machine requis par la charge, cette commande augmente le couple de référence et éteint quelques phases pendant chaque période électrique ou chaque période mécanique. Par ce fait, elle réduit les pertes du convertisseur et les pertes ferromagnétiques de la machine. Elle dispose également d'une liberté de sélection des phases activées qui influence des fréquences générées du courant, de la force radiale et du couple. Par conséquent, cette stratégie de la commande intermittente, qui est appelée le glissement, peut éviter l'excitation de fréquences naturelles du stator, ou bien celles de la chaîne cinématique. Elle a pour but de réduire les effets négatifs de la commande intermittente vis-à-vis de comportements vibratoire du stator et pulsatoire de la chaîne cinématique qui sont respectivement à l'origine du bruit acoustique et des à-coups mécaniques. En fin, la commande intermittente est validée sur des cycles de conduite et peut économiser jusqu'à 5,17 % de l'énergie électrique consommée.

**Mots-Clés :** Véhicule électrique, Machine à réluctance variable, Commande intermittente, Efficacité énergétique, Vibrations de la machine, Ondulations du couple

### Intermittent control of the switched reluctance machine

The intermittent control aims to increase the efficiency of the machine-converter system by reducing the losses. In the purpose to maintain the average torque of the machine required by the load, this control increases the reference torque and turns off some phases during each electrical period or each mechanical period. By this fact, it reduces the converter losses and the ferromagnetic losses of the machine. It also has a freedom in the selection of the activated phases which influences the generated frequencies of the current, the radial force and the torque. Therefore, this strategy of the intermittent control, which is called sliding strategy, can avoid the excitation of the natural frequencies of the stator, or those of the drivetrain. It aims to reduce the negative effects of the intermittent control vis-à-vis the vibration of the stator and the pulsation of the drivetrain which are respectively at the origins of acoustic noise and mechanical jerks. Finally, the intermittent control is validated on driving cycles and can save up to 5.17 % of the consumed electrical energy.

**Keywords :** Electric vehicle, Switched reluctance machine, Intermittent control, System efficiency, Machine vibrations, Torque ripples

## João Alberto De França Ferreira

### Contribution à la conception d'un transformateur de Fourier temps réel en technologie intégrée

L'accroissement constant des bandes passantes et des débits dans les applications de la vie courante (e.g., télécommunications, objets connectés), comme dans des applications plus spécialisées (e.g., radar, observations en radioastronomie), impose de très fortes contraintes en termes de vitesse, consommation de puissance et dissipation thermique aux étages de conversion analogique-numérique des chaînes d'acquisition. Par conséquent une tendance actuelle consiste à effectuer le traitement de signaux (e.g., transformation de Fourier) dans le domaine analogique pour pouvoir traiter des signaux ultra-large bande avec faible latence et de manière plus efficace en termes énergétiques. Plusieurs architectures de traitement de signal analogique repose sur des blocs encore peu explorées dans la littérature : les filtres à retard de groupe arbitraires. Ces filtres sont plutôt réalisés en technologie SAW ou avec des structures microondes discrètes (non intégrés), conduisant à des filtres avec des bandes passantes limitées et beaucoup de pertes, dans le cas des dispositifs SAW, ou avec un encombrement et poids importantes, dans le cas des filtres microondes. Très peu de réalisations intégrées en semi-conducteurs ont été reporté à ce jour. L'innovation présentée dans cette thèse a deux aspects, un aspect architectural au niveau système, lequel a donné lieu à une proposition d'architecture pour un transformateur de Fourier analogique permettant d'améliorer les performances en précision par rapport aux autres architectures rapportées dans la littérature, et un aspect concernant le développement des méthodes de conception de filtres à retard de groupe linéaire et leur implémentation dans une technologie de circuit intégré. Trois réseaux de filtres différents ont été conçus en utilisant ces méthodes, un filtre passe-bande à minimum de phase dans une structure en échelle, un réseau passe-tout équilibré avec un retard de groupe linéaire à pente positive et un réseau passe-tout non équilibré avec un retard de groupe linéaire de pente négative. Il a aussi été démontré que les filtres passe-tout peuvent être transformés dans des filtres transversales basé sur la structure d'un amplificateur distribué.

**Mots-Clés :** Traitement du signal analogique, Temps réel, Transformateur de Fourier à modulation de fréquence, Retard de groupe arbitraire, Filtre dispersif, Circuit intégré

### Contribution to the Design of a Real-Time Fourier Transformer in Integrated Technology

The constant increase of bandwidths and bitrates in everyday applications (e.g., telecommunications, internet of things), as also in more specialized applications (e.g., radar, radio astronomy observations), imposes stringent constraints in terms of speed, power consumption and heat dissipation at the analog-to-digital conversion stages of acquisition chains. Therefore, a current trend is to perform signal processing (e.g., Fourier transform) in the analog domain to be able to process ultra-wideband signals with low latency and in a more energy-efficient way. Many of the analog signal processing architectures rely on blocks that have not been widely explored in the literature: arbitrary group delay filters. These filters are generally realized in SAW technology or with discrete (non-integrated) microwave structures, leading to filters with limited bandwidth and high loss, in the case of SAW devices, or with a large size and weight, in the case of microwave filters. Very few integrated circuit implementations have been reported to date. The innovation presented in this thesis has two aspects, a system-level architectural aspect, which gave rise to the proposal for an analog Fourier transformer architecture that enables improve the precision performance when compared to the previously reported architectures, and an aspect concerning the development of linear group delay filter design methods and their implementation in an integrated circuit technology. Three different filter networks were designed using these methods, a minimum phase band-pass ladder filter, a balanced all-pass network with positive-slope linear group delay, and a balanced all-pass network with a linear group delay of negative slope. It has also been shown that the all-pass filters can be transformed into distributed amplifier-based transversal filters.

**Keywords :** Integrated circuit, Engineered group delay, Dispersive delay line, Chirp Fourier transformer, Analog signal processing, Real-Time

## Khaled Harmouch

### Conception et réalisation d'un moteur piézoélectrique pour application automobile haute température

L'objectif de cette thèse est de concevoir et de réaliser un moteur piézoélectrique destiné à une application de récupération de chaleur du gaz d'échappement. Cette application nécessite un couple relativement élevé, une compacité importante, une endurance thermique et un coût acceptable. Afin d'atteindre ce but, la conception du moteur passe par le choix de son mode de fonctionnement. Ce choix est fait en se basant sur des critères comme bas coût, fort couple et compacité importante. Après la détermination de l'architecture du moteur piézoélectrique, la modélisation est abordée. Le but du modèle est de calculer les caractéristiques couple/vitesse connaissant ses dimensions et ses matériaux, l'état de surface du contact, la précontrainte et la tension d'alimentation. La modélisation développée était validée par des mesures expérimentales. Dans la dernière partie, le moteur dimensionné est réalisé et testé. Son comportement dynamique et ces caractéristiques couple/vitesse étaient mesurés. A l'exception du couple à l'arrêt et celui de blocage, toutes les performances requises par l'application étaient remplies. Finalement, les résultats de modèle sont comparés aux mesures faites sur le prototype. Le comportement dynamique était bien reproduit par la modélisation. Néanmoins, une imprécision du calcul des déplacements du stator était constatée. Cela implique une imprécision du calcul des caractéristiques moteur. Il s'avère que cette imprécision est liée à l'absence du coefficient d'amortissement de contact.

**Mots-Clés :** Récupération de chaleur, Moteur à multimodes, Bas coût, Résistance à la haute température, Modèle de contact, Stick/slip Non-linéarité, Dimensionnement

### Design and realization of a piezoelectric motor for a high temperature automotive application

The goal of this thesis is to design and build a piezoelectric motor for an exhaust gas heat recovery application. This application requires relatively high torque, high compactness, thermal endurance and acceptable cost. In order to achieve this goal, the design of the engine passes by the choice of its mode of operation. This choice is made based on criteria such as low cost, high torque and compactness. After the determination of the architecture of the piezoelectric motor, the modelling is addressed. The purpose of the model is to compute the torque/speed characteristics knowing the motor dimensions and materials, the surface state of the contact, the precompression force and the supply voltage. The modeling developed was validated by experimental measurements. In the last part, the motor is built and tested. Its dynamic behavior and torque/speed characteristics were measured. With the exception of the peak and blocking torque, all the performances required by the application were fulfilled. Finally, the model results are compared to the measurements done on the prototype. The dynamic behavior is well predicted by the model. However, the model is not able to compute accurately the stator displacements. This implies inaccuracy in the motor characteristics computation. It turns out that they are related to the absence of the coefficient of contact damping.

**Keywords :** Heat recovery, Multi-modes motor, Low cost, Resistance to high temperature, Contact model, Stick/slip, Nonlinearity, Dimensioning

## Letian Dai

### Cellules solaires à jonction radiale à base de nanofils de silicium avec absorbeur en $\mu\text{c-Si:H}$ pour dispositifs tandem

Dans cette thèse, nous avons fabriqué des cellules solaires à jonction radiale en nanofils de silicium avec du silicium microcristallin hydrogéné ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) comme absorbeur, par dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma à basse température (PECVD). Pour contrôler la densité de nanofils sur les substrats, nous avons utilisé des nanoparticules (NP) de dioxyde d'étain ( $\text{SnO}_2$ ) d'un diamètre moyen de 55 nm, disponibles dans le commerce, comme précurseur du catalyseur Sn pour la croissance des nanofils de silicium. La distribution des nanoparticules de  $\text{SnO}_2$  sur le substrat a été contrôlée par centrifugation et dilution du colloïde de  $\text{SnO}_2$ , en combinaison avec la fonctionnalisation du substrat. Par la suite, le  $\text{SnO}_2$  est réduit en Sn métallique après le traitement par plasma de  $\text{H}_2$ , suivi de la croissance, par la technique vapeur-liquide-solide (VLS) assistée par plasma, de nanofils de Si sur lesquels sont déposées les couches P, I et N constituant les cellules solaires à jonction radiale. Nous avons atteint un taux de croissance élevé des nanofils de Si, jusqu'à 70%, avec une très large gamme de densité, de  $10^6$  à  $10^9$  / $\text{cm}^2$ . Comme approche supplémentaire de contrôle de la densité des nanofils, nous avons utilisé du Sn évaporé comme précurseur du catalyseur Sn. Nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de Sn évaporé, l'effet de la durée du traitement au plasma de  $\text{H}_2$  et l'effet du débit de gaz  $\text{H}_2$  dans le mélange de précurseurs, sur la densité des nanofils. L'ellipsométrie spectroscopique in-situ (SE) a été utilisée pour contrôler la croissance des nanofils et le dépôt des couches de  $\mu\text{c-Si:H}$  sur les SiNWs. En combinant les résultats de in-situ SE et de microscopie électronique à balayage, une relation entre l'intensité du signal de SE pendant la croissance et la longueur et la densité des nanofils a été démontrée, ce qui permet d'estimer ces paramètres en cours de croissance. Nous avons réalisé une étude systématique des matériaux (couches intrinsèques et dopées de type n ou p de  $\mu\text{c-Si:H}$ , couches dopées d'oxyde de silicium microcristallin hydrogéné,  $\mu\text{c-SiOx:H}$ ) et des cellules solaires obtenues dans deux réacteurs à plasma appelés "PLASFIL" et "ARCAM". Les épaisseurs de revêtement sur substrat lisse et sur les nanofils ont été déterminées et nous avons obtenu une relation linéaire entre les deux, ce qui permet de concevoir un revêtement conforme sur les nanofils pour chaque couche avec une épaisseur optimale. Les paramètres des nanofils et des matériaux, affectant la performance des cellules solaires à jonction radiale, ont été systématiquement étudiés, les principaux étant la longueur et la densité des nanofils, l'épaisseur de la couche intrinsèque de  $\mu\text{c-Si:H}$ , l'utilisation de  $\mu\text{c-SiOx:H}$  et le réflecteur arrière en Ag. Enfin, avec les cellules solaires à jonction radiale en nanofils de silicium optimisées utilisant le  $\mu\text{c-Si:H}$  comme absorbeur, nous avons atteint un rendement de conversion de l'énergie de 4,13 % avec  $V_{oc} = 0,41$  V,  $J_{sc} = 14,4$  mA/ $\text{cm}^2$  et FF = 69,7%. Cette performance est supérieure de plus de 40 % à l'efficacité record de 2,9 % publiée précédemment.

**Mots-Clés :** Cellules solaires, Nanofils de silicium, Jonction radiale, Couches minces, Vapeur-liquide-solide assisté par plasma, Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma

### Silicon nanowire solar cells with $\mu\text{c-Si:H}$ absorbers for tandem radial junction devices

In this thesis, we have fabricated silicon nanowire (SiNW) radial junction solar cells with hydrogenated microcrystalline silicon ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) as the absorber via low-temperature plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). To control the density of NW on the substrates, we have used commercially available tin dioxide ( $\text{SnO}_2$ ) nanoparticles (NPs) with an average diameter of 55 nm as the precursor of Sn catalyst for the growth of SiNWs. The distribution of  $\text{SnO}_2$  NPs on the substrate has been controlled by centrifugation and the dilution of the  $\text{SnO}_2$  colloid, combined with the functionalization of the substrate. Subsequently,  $\text{SnO}_2$  is reduced to metallic Sn after the  $\text{H}_2$  plasma treatment, followed by the plasma-assisted vapor-liquid-solid (VLS) growth of SiNWs upon which the P, I and N layers constituting the radial junction solar cells are deposited. We have achieved a high yield growth of SiNWs up to 70% with a very wide range of NW density, from  $10^6$  to  $10^9$  / $\text{cm}^2$ . As an additional approach of controlling the density of SiNWs we have used evaporated Sn as the precursor of Sn catalyst. We have studied the effect of the thickness of evaporated Sn, the effect of duration of  $\text{H}_2$  plasma treatment and the effect of  $\text{H}_2$  gas flow rate in the plasma, on the density of SiNWs. In-situ spectroscopic ellipsometry (SE) was used for monitoring the growth of SiNWs and the deposition of the layers of  $\mu\text{c-Si:H}$  on SiNWs. Combining in-situ SE and SEM results, a

relationship between the intensity of SE signal and the length and the density of SiNWs during the growth was demonstrated, which allows to estimate the density and the length of SiNWs during the growth. We have carried out a systematic study of materials (intrinsic, p-type, n-type  $\mu\text{-Si:H}$  and  $\mu\text{SiOx:H}$  doped layers) and solar cells obtained in two plasma reactors named "PLASFIL" and "ARCAM". The thicknesses of coating on the flat substrate and on the SiNWs have been determined with a linear relation which helps to design a conformal coating on SiNWs for each layer with an optimal thickness. The parameters of the SiNWs and the materials, affecting the performance of radial junction solar cells, have been systematically studied, the main ones being the length and the density of SiNWs, the thickness of intrinsic layer of  $\mu\text{-Si:H}$  on SiNWs, the use of the hydrogenated microcrystalline silicon oxide ( $\mu\text{-SiOx:H}$ ) and the back reflector Ag. Finally, with the optimized silicon nanowire radial junction solar cells using the  $\mu\text{-Si:H}$  as the absorber we have achieved an energy conversion efficiency of 4.13 % with  $V_{oc} = 0.41$  V,  $J_{sc} = 14.4$  mA/cm<sup>2</sup> and FF = 69.7%. This performance is more than 40 % better than the previous published record efficiency of 2.9 %.

**Keywords** :Solar cells, Silicon nanowires, Radial junction, Thin films, Plasma-assisted vapor-liquid-solid, Plasma enhanced chemical vapor deposition

## Mohamed Ouameur

### Conception, modélisation et étalonnage d'un shunt pour la mesure de courant à 10 A et 1 MHz

Mesurer des forts courants alternatifs sur une large bande de fréquences est primordial pour de nombreuses applications dont la surveillance du réseau de distribution électrique et le développement des véhicules électriques. Dans le premier cas, la mesure du courant est nécessaire pour quantifier la qualité du réseau en présence d'harmoniques provenant des énergies renouvelables intermittentes dont le spectre en fréquences est assez large (plusieurs centaines de kilohertz). Dans le second cas, la mesure du courant (jusqu'à plusieurs dizaines d'ampères) intervient dans la quantification du rendement de la chaîne de traction d'un moteur électrique : dans la mesure du courant la prise en compte d'un grand nombre d'harmoniques (jusqu'à 1 MHz) est indispensable pour garantir une connaissance précise du rendement du moteur. Des résistances de faibles valeurs, appelées « shunt », sont alors indispensables pour mesurer des forts courants. Les shunts sont largement utilisés comme étalon de résistance dans les laboratoires de métrologie et les instruments de précision. Leur utilisation nécessite la connaissance préliminaire en fonction de la fréquence des deux paramètres suivants : déphasage de l'impédance du shunt ; variation relative du module de l'impédance du shunt par rapport à sa valeur de sa résistance en courant continu, ce paramètre est appelé "écart de transposition". Pour un niveau de courant de 10 A, l'impédance des shunts existants présente de fortes variations en module et phase pour les fréquences supérieures à 100 kHz. De plus, actuellement dans les laboratoires nationaux de métrologie, pour étalonner les shunts au-delà de 1 A les méthodes de mesure utilisées sont d'une part limitées en module à 100 kHz et en phase à 200 kHz et d'autre part elles donnent accès uniquement à un des deux paramètres : module ou phase de l'impédance du shunt. Ce travail de thèse a pour objectif d'étendre jusqu'à 10 A et 1 MHz les possibilités d'étalonnage des capteurs de forts courant et d'améliorer ainsi la traçabilité des mesures en courant alternatif. Nous avons dans un premier temps développé un shunt étalon de 10 A dont la réponse électromagnétique (jusqu'à 10 MHz) et la réponse thermique sont entièrement calculables : à 1 MHz le déphasage et l'écart de transposition sont respectivement de -0,01 mrad et 15 ppm. Dans un second temps, nous avons mis au point une méthode d'étalonnage traçable permettant de mesurer les shunts jusqu'à 10 MHz. La méthode de mesure, basée sur l'utilisation d'un analyseur de réseau vectoriel, permet de mesurer simultanément l'écart de transposition et la phase de l'impédance d'un shunt avec des incertitudes relatives inférieures à  $1.10^{-3}$  à 1 MHz.

**Mots-Clés :** Shunts de courant, Étalonnage, Mesure de courant, Impédance, Modélisation, Incertitude

### Design, modeling and calibration of a shunt for current measurement at 10 A and 1 MHz

Measuring high alternating currents over a wide frequency bandwidth is essential for many applications including the monitoring of the electrical distribution network and the development of electric vehicles. In the first case, current measurement is necessary to quantify the quality of the grid in the presence of harmonics from intermittent renewable energies with a large frequency spectrum (several hundred kilohertz). In the second case, current measurement (up to several tens of amperes) is used to quantify the efficiency of an electric motor's traction chain: in current measurement, it is essential to take into account a large number of harmonics (up to 1 MHz) to ensure an accurate knowledge of the motor's efficiency. Resistors of low values, called "shunt", are then mandatory to measure high currents. Shunts are widely used as a resistance standard in metrology laboratories and precision instruments. Their use requires the preliminary knowledge of the following two parameters according to the frequency: Impedance phase shift; relative variation of the impedance magnitude according to its DC resistance value, this parameter is called "AC-DC difference". For a current level of 10 A, the impedance of existing shunts shows strong variations in magnitude and phase for frequencies above 100 kHz. In addition, in National Metrology Institutes, to calibrate shunts beyond 1 A the measurement methods currently used are limited in magnitude up to 100 kHz and phase up to 200 kHz; and provide access to only one of the two parameters: magnitude or phase of impedance. The aim of this thesis is to extend the calibration capabilities of high current sensors up to 10 A and 1 MHz and thus improve the traceability of AC current measurements. Firstly, we developed a 10 A shunt standard whose electromagnetic (up to 10 MHz) and thermal responses are fully calculable: at 1 MHz the phase shift and transposition deviation are -0.01 mrad and 15 ppm respectively. Secondly, we developed a traceable calibration method to measure shunts up to 10 MHz. The measurement method, based on the use of a vector network analyzer, allows the AC-DC deviation and impedance phase of a shunt to be measured simultaneously with relative uncertainties less than  $1.10^{-3}$  at 1 MHz.

**Keywords :** Current measurement, Calibration, Current shunts, Impedance, Modeling, Uncertainty

## Olivier Borne

### Vehicle-To-Grid et Flexibilité pour les Réseaux d'Electricité : de la solution technique à la construction de business model

Les ventes de Véhicules Electriques ont été en constante augmentation ces dix dernières années, stimulées par l'adoption de politique publique favorisant la décarbonation du secteur automobile. Dans un contexte d'accroissement des énergies renouvelables dans le mix énergétique, entraînant des besoins plus important en flexibilité, la diffusion massive des véhicules électriques pourrait constituer une nouvelle source de contrainte pour les gestionnaire de réseaux d'électricité si la recharge n'est pas gérée de manière intelligente. La gestion de la recharge des flottes de Véhicules Electriques peut aussi constituer une opportunité pour apporter cette flexibilité, en particulier si les véhicules sont équipés de chargeurs bidirectionnels, capables de réinjecter de l'électricité dans le système pour équilibrer les réseaux. La recherche s'est principalement intéressée à la conception d'algorithmes permettant cette recharge « intelligente », qui prennent en compte les besoins en mobilité des utilisateurs, tout en fournissant différents services de flexibilité. Cette thèse s'attache à aller au-delà de l'aspect algorithmique, en balayant l'ensemble des aspects qui permettraient d'aboutir à un modèle d'affaire viable, et en se focalisant sur la fourniture d'un type de service : la réserve primaire (Frequency Containment Reserve), qui constitue le service identifié comme ayant la plus forte valeur pour des flottes de Véhicules équipés de chargeurs bidirectionnels.

**Mots-Clés :** Véhicules électriques, Recharge intelligente, Business Model

### Vehicle-to-grid and flexibility for electricity systems : from technical solutions to design of business models

Transport industry being one the first CO2 emitters, there is an urgent need to decarbonize this sector, which could be achieved by the conjunction of the electrification of the vehicles and decarbonization of the electricity generation mix. In conjunction with increasing flexibility needs to support the introduction of Renewable Energy Sources, the development of Electric Vehicles could add new constraints for System Operators if charging process is not managed in a smart way. However, considering mobility requirements, there is a flexibility in the charging pattern of the vehicles, which could be used to offer flexibility services to System Operators, using smart-charging algorithms. Moreover, this flexibility could increase with the possibility to have reverse flow from the battery to the grid. Research focused mainly, during last years, on the design of algorithms to provide services with electric vehicles, taking into account mobility needs of users. In this thesis, we try to go beyond this design of algorithms, going through the different steps to elaborate a viable business model. We focus on the provision of one service – Frequency Containment Reserve – identified as the most valuable for Electric Vehicles equipped with bidirectional chargers.

**Keywords :** Electric Vehicles, Smart Charging, Business Model

## Paul Clérico

### Élaboration d'un tissu composite bimétallique Al/Acier/Al pour le blindage électromagnétique

L'électronisation de l'industrie a mené à l'augmentation de la pollution électromagnétique pouvant être néfaste pour les systèmes électroniques sensibles et les êtres vivants. L'un des moyens pour limiter la propagation des champs électromagnétiques est l'utilisation d'un blindage. L'étude s'est ainsi focalisée sur l'élaboration à froid d'un composite bimétallique pour le blindage magnétique. Le composite étudié allie les propriétés physiques de l'aluminium et de l'acier via le trilame Al8011/AcierDC01/Al8011. Le trilame est élaboré par colaminage à température ambiante. Il s'est avéré que la qualité de l'adhérence des interfaces Al/Acier et l'architecture du trilame dépendent fortement des paramètres du colaminage. Une préparation minutieuse des tôles et de leurs surfaces concomitantes se révèle être tout aussi importante que le colaminage en lui-même. De plus, au cours du colaminage, la tôle d'acier s'est montrée sensible à des instabilités plastiques qui amènent par la suite à sa striction et à sa fragmentation. Ces instabilités plastiques favorisent l'adhérence grâce à des soudages Al/Al mais n'en sont pas un prérequis. Au niveau de l'efficacité de blindage, le trilame s'est révélé être particulièrement intéressant puisque, grâce à sa composition et à sa structuration, il est capable d'atténuer aussi bien les champs magnétiques basses fréquences (<math>\leq 1\text{ kHz}</math>) que les champs magnétiques de plus hautes fréquences (> 1 kHz). Dans une étude à iso-masse, le trilame a présenté une meilleure efficacité de blindage que les tôles d'Al, de Cu et d'acier. Cependant, la fragmentation de l'acier dans le trilame s'est révélée être néfaste pour le blindage magnétique, nécessitant de faire alors un compromis entre tenue mécanique et efficacité de blindage.

**Mots-Clés :** Adhérence, Compatibilité électromagnétique, Efficacité de blindage, Homogénéisation, Matériau composite laminé, Colaminage

### Elaboration of an Al/Steel/Al bimetallic composite tissue for electromagnetic shielding

The growth of electronic devices has led to an increase in electromagnetic pollution that can be harmful to sensitive electronic systems and living beings. One of the means of limiting the propagation of electromagnetic fields is the use of shielding. Then, the study focused on the elaboration of a bimetallic composite for magnetic shielding. The studied composite combines the physical properties of aluminum and steel via the Al8011/SteelDC01/Al8011 trilayer. The trilayer is produced by cold roll bonding (CRB). It has been found that the adherence quality of the Al/Steel interfaces and the architecture of the composite heavily depend on the CRB parameters. Careful preparation of the sheet and their concomitant surfaces is just as important as CRB itself. Furthermore, during CRB, the steel sheet was sensitive to plastic instabilities which subsequently led to its necking and fragmentation. These plastic instabilities promote adherence through Al/Al welds but are not a prerequisite. In terms of shielding effectiveness, the bimetallic composite has proved to be particularly interesting. Thanks to its composition and its structuring, it can attenuate both low (<math>\leq 1\text{ kHz}</math>) and high frequency (> 1 kHz) magnetic fields. In an iso-mass study, the composite showed a higher shielding effectiveness than Al, Cu and steel sheets. However, the steel fragmentation in the composite proved to be detrimental to magnetic shielding, then requiring a compromise between mechanical strength and shielding effectiveness.

**Keywords :** Laminated composite, Cold Roll Bonding, Bonding strength, Electromagnetic compatibility effectiveness, Shielding effectiveness, Homogenization

## Paul-Antoine Gori

### Transmission dynamique d'énergie par induction : application au véhicule électrique

L'autonomie limitée du véhicule électrique est le premier frein au développement du marché de l'électrique. La charge inductive dynamique répond à ce problème, en offrant de charger son véhicule en roulant. La principale difficulté est de gérer les variations importantes du couplage magnétique lors du déplacement du véhicule, et ce pendant le transfert de puissance. Une précédente thèse dans l'équipe de recherche sur un prototype de 3 kW avait abouti au concept de recopie de tension, qui stabilise la tension en sortie du coupleur malgré la variation de couplage, et facilite notablement la conception du convertisseur DC/DC faisant interface avec la batterie. La thèse présentée ici porte sur l'adaptation du système pour fonctionner de 20 kW à 30 kW. Cette montée en puissance n'est pas évidente, du fait des importantes contraintes électriques sur les bobines du coupleur (1,4 kV sur le système de 3 kW), et du champ rayonné limité par des références normatives. Tout d'abord, nous proposons une nouvelle commande du circuit résonnant, qui permet de modifier le dimensionnement pour aboutir à des contraintes électriques plus faibles tout en conservant la recopie de tension. Ensuite, une forme de bobine en huit est étudiée pour aider à réduire le champ rayonné. Enfin, une démarche de dimensionnement est établie pour la partie électrique du système, ainsi que pour le coupleur magnétique, alliant modèle analytique et simulations à éléments finis et réduisant considérablement les temps de simulations. Les résultats de l'évaluation des performances du système dimensionné pour la haute puissance sont prometteurs.

**Mots-Clés :** Véhicule électrique, Transfert d'énergie sans contact, Chargeur inductif dynamique, Convertisseur résonnant

### Dynamic inductive power transfer applied to electric vehicles

The limited electric-vehicle distance range is the main reason hindering the development of the electric transportation market. Dynamic inductive charging solves this problem, offering the possibility to charge while driving. The main issue consists in handling wide magnetic coupling variations when the vehicle is moving, while charging. A previous thesis in the research team on a 3-kW prototype led to the concept of voltage copying, which stabilises the coupler output voltage despite the varying coupling, making it easier to design the DC/DC converter linking the coupler to the battery. The hereby thesis deals with adapting this system to transfer from 20 kW to 30 kW. Raising the power is no small matter, due to the high electrical constraints on the coupled coils (1.4 kV on the 3-kW system), and the radiated field, limited by standardised thresholds. Firstly, a new control of the resonating circuit is proposed, allowing to change the system design to get lower electrical constraints and maintaining voltage copying properties. Then, an eight-shape coil was investigated in order to reduce the radiated field. Finally, a design method was conceived for the electrical part of the system, as well as the magnetic coupler, using jointly analytical models and finite element simulations to reduce simulation times. Results of the evaluated performance for such a high-power system are quite promising.

**Keywords :** Electric vehicles, Contactless energy transfer, Dynamic inductive charger, Resonant converter

## Qiang Zhang

### Étude de la propagation et du rayonnement pour des applications au voisinage du corps humain

Le vieillissement de la population et la hausse des coûts des soins médicaux ont engendré de nombreuses innovations dans le domaine de santé. L'une d'elles consiste à utiliser des capteurs sans fil autour du corps humain pour surveiller les signaux vitaux du patient. Le premier objectif de cette thèse est d'améliorer la sécurité des communications entre les capteurs sur le corps humain, grâce à un nouveau mécanisme de transmission utilisant la peau comme support de propagation de l'onde électromagnétique. La méthode de résonance transverse (TRM) est utilisée pour analyser les modes existants dans le modèle du corps humain. Les capacités de confinement ainsi que les pertes de propagation sont étudiées pour des fréquences jusqu'à 60 GHz. Le code développé d'analyse de la dispersion basé sur TRM constitue l'essentiel du travail de cette thèse et est également utilisé pour le second objectif de cette thèse. Une autre innovation dans le domaine médical concerne la surveillance sans contact et sans capteur utilisant des techniques radars Doppler. Les antennes à ondes de fuite sont de bonnes candidatures grâce à leur balayage du faisceau en fonction de la fréquence. Un balayage rapide est souhaité afin de couvrir une large plage angulaire avec une bande de fréquence limitée. Par conséquent, une structure guidante hautement dispersive est typiquement requise pour ce type d'antenne. Ainsi, une procédure originale de conception basée sur le code TRM est proposée pour augmenter la dispersion de la structure guidante imprimée à l'aide de la métasurface. En utilisant cette dispersion améliorée, une antenne périodique à ondes de fuite est conçue et simulée dans la bande des 60 GHz.

**Mots-Clés :** Propagation, Analyse dispersive, Communication sur le corps humain, Méthode de résonance transverse, Antenne à ondes de fuite, Amélioration du balayage angulaire, Métasurface, Réseau corporel

### Investigation on propagation and radiation for body-centric applications

The aging of population and the increase in medical costs have brought a lot of innovations in the medical domain. One of them is the use of wireless sensors that are located in, on, or around the human body to monitor patient's physiological signs. Due to the nature of the transmitted data, high data security is one of the most essential requirements in the system. The first objective of this thesis is to improve the communication security between on-body sensors with a novel transmission mechanism that uses human skin as a transmission medium and confines the surface-wave signal inside the skin. Transverse resonance method (TRM) is used to numerically analyze existing modes within the human body model. Confinement capabilities as well as propagation losses are investigated for frequencies up to 60 GHz. It should be noted that the developed TRM-based dispersion analysis code is the core work of this thesis and is used throughout all the main analysis in this thesis. Another innovation in the medical domain can be referred to the non-contact sensor-less remote medical monitoring using Doppler radar. Leaky-wave antennas are good candidatures for such applications due to their frequency-depending beam scanning properties. A fast scanning is desired in order to cover a large angular range with a given operation frequency bandwidth. Consequently, in the second part of this thesis, an original TRM-procedure-based design is proposed to increase the frequency dispersion of the guiding structure, which uses a grounded dielectric slab covered by a metasurface. Using this enhanced dispersion, a periodic leaky-wave antenna is designed and simulated in the 60 GHz band.

**Keywords :** Skin-confined propagation, Dispersion analysis, Leaky-wave antenna

## Sangwoo Kang

### Imagerie non itérative en problème inverse de diffraction des ondes : méthode DSM

Le problème de l'imagerie non itérative dans le cadre de la diffraction électromagnétique inverse utilisant la méthode d'échantillonnage direct (DSM) est considéré. Grâce à une combinaison de l'expression asymptotique du champ proche ou du champ lointain diffracté et de l'hypothèse de petits obstacles, les expressions analytiques de la fonction d'indicateur DSM sont présentées dans diverses configurations telles que des configurations 2D/3D, mono-/multi-configurations statiques, à vue limitée/complète et fréquence unique/ diversité en fréquence. Une fois l'expression analytique obtenue, sa structure est analysée et des améliorations proposées. Notre approche est validée à l'aide de données de simulation, et d'expériences le cas échéant. Premièrement, la structure mathématique du DSM à fréquence fixe en 2D dans divers problèmes de diffusion est établie, permettant une analyse théorique de son efficacité et de ses limites. Pour surmonter les limitations connues, une méthode alternative d'échantillonnage direct (DSMA) est proposée. Puis le cas multi-fréquence est investigué en introduisant et en analysant le DSM multi-fréquence (MDSM) et le DSMA multi-fréquence (MDSMA). Enfin, notre approche est étendue aux problèmes de diffraction électromagnétique inverse 3D pour lesquels le choix de la polarisation du dipôle de test est un paramètre clé. De par notre approche analytique, ce choix peut être effectué sur la base de la polarisation du champ incident.

**Mots-Clés :** Analyse mathématique, Problème de diffusion électromagnétique inverse, Méthode d'échantillonnage direct

### Direct sampling method in inverse electromagnetic scattering problem

The non-iterative imaging problem within the inverse electromagnetic scattering framework using the direct sampling method (DSM) is considered. Thanks to the combination of the asymptotic expression of the scattered near-field or far-field and of the small obstacle hypothesis the analytical expressions of the DSM indicator function are presented in various configurations such as 2D/3D configurations and/or mono-/multi-static configurations and/or limited-/full-view case and/or mono-/multi-frequency case. Once the analytical expression obtained, its structure is analyzed and improvements proposed. Our approach is validated using synthetic data and experimental ones when available. First, the mathematical structure of DSM at a fixed frequency in 2D various scattering problems is established allowing a theoretical analysis of its efficiency and limitations. To overcome the known limitations an alternative direct sampling method (DSMA) is proposed. Next, the multi-frequency case is investigated by introducing and analyzing the multi-frequency DSM (MDSM) and the multi-frequency DSMA (MDSMA). Finally, our approach is extended to 3D inverse electromagnetic scattering problems for which the choice of the polarization of the test dipole is a key parameter. Thanks to our analytical analysis it can be made based on the polarization of the incident field.

**Keywords :** Mathematical analysis, Inverse electromagnetic scattering problem, Direct sampling method

## Simon Meunier

### Conception optimale des systèmes photovoltaïques de pompage d'eau pour les communautés rurales - une approche technique, économique et sociale

Les systèmes photovoltaïques de pompage d'eau (PVWPS) sont une solution intéressante pour améliorer l'accès à l'eau dans les communautés rurales des pays en voie de développement. Cette thèse développe une méthodologie de conception optimale des PVWPS pour l'accès à l'eau domestique basée sur une approche interdisciplinaire. L'objectif est de déterminer les dimensionnements du PVWPS et ses positions géographiques dans le village qui maximisent l'impact positif du système sur le développement socio-économique et minimisent son coût sur cycle de vie. Cette méthodologie est appliquée au cas d'un village rural du Burkina Faso, où nous avons collecté des données techniques et sociaux-économiques depuis 2 ans. La première originalité principale de ce travail est la modélisation du lien entre la conception du PVWPS et son impact socio-économique, ce qui permet d'inclure l'impact socio-économique comme fonction objectif de l'optimisation. La seconde originalité principale est l'intégration de la position géographique du PVWPS dans le village comme variable d'optimisation, en plus du dimensionnement du système. Cette méthodologie pourrait également être appliquée à la mise en place d'autres types de systèmes, tels que les moulins communaux alimentés par énergie photovoltaïque dans les zones isolées ou les bornes de recharges publiques pour les véhicules électriques dans les villes.

**Mots-Clés :** Modélisation interdisciplinaire, Analyse multi-critères, Conception optimale, Planification des infrastructures, Système photovoltaïque de pompage d'eau

### Optimal design of photovoltaic water pumping systems for rural communities – a technical, economic and social approach

Photovoltaic water pumping systems (PVWPS) are an interesting solution to improve access to water in rural communities of developing countries. This thesis develops a methodology for the optimal design of PVWPS for domestic consumption based on an interdisciplinary approach. The objective is to determine the sizings of the PVWPS and its geographical positions in the village that maximize the positive impact of the system on socio-economic development and minimize its life-cycle cost. This methodology is applied to the case of a rural village in Burkina Faso, where we have been collecting technical and socio-economic data for 2 years. The first main originality of this work is the modelling of the link between the design of a PVWPS and its socio-economic impact, which allows to include the socio-economic impact to be included as an objective function of the optimisation. The second main originality is the inclusion of the geographical position of the PVWPS in the village as an optimisation variable, in addition to the sizing of the system. There is potential for applying the proposed methodology for the set-up of other types of systems such as community mills powered by photovoltaic energy in isolated areas and public charging points for electrical vehicles in cities.

**Keywords :** Infrastructure planning, Photovoltaic water pumping system, Optimal design, Interdisciplinary modelling, Multi-criteria analysis

## Soukayna Limam

### La bio décontamination de surface par plasma froid : Contribution par l'étude de procédés de traitement de surface à pression atmosphérique

Dans le cadre de cette thèse, des travaux sur la bio décontamination de surface ont été entrepris, en s'intéressant tout particulièrement aux problématiques d'infections nosocomiales en milieu hospitalier. Dans cet objectif, deux sources de plasma froid ont été caractérisées et leurs effets biocides sur des micro-organismes tels qu'Escherichia coli et Bacillus stearothermophilus (micro-organismes de référence dans les procédures de stérilisation) ont été étudiés.

**Mots-Clés :** Décontamination de surface, Stérilisation, Plasma froid, Pression atmosphérique, Gaz Plamagène, Décharge

### Biological surface decontamination by cold plasma : Surface treatment processes study at atmospheric pressure

Non thermal plasma technologies have recently been receiving attention as an alternative technology for surface decontamination of thermally sensitive medical materials. This work focuses on two atmospheric pressure discharges. Bacteria exposure (contaminated samples with Escherichia coli and Bacillus stearothermophilus ) and spectroscopic measurements were made simultaneously.

**Keywords :** Surface Decontamination, Sterilization, Cold plasma, Atmospheric pressure, Plasma Gas, Discharge

## Tuan Anh Do

### Modélisation multiphysique des matériaux magnétoélectriques de seconde génération : application aux objets nomades connectés

Les matériaux magnétoélectrique (ME) sont les matériaux composites fonctionnels composés de phases piézoélectriques et magnétostrictives qui a capacité de transformer l'énergie magnétique à l'énergie électrique par la médiation de l'énergie mécanique. L'effet ME peut être caractérisé en utilisant le coefficient magnétoélectrique (V/Oe). Cette propriété particulière génère un intérêt pour la recherche scientifique et plus particulièrement pour l'application de nouveaux transducteurs d'énergie, capteurs magnétiques ou inductances variables. Dans ce contexte, L2E a commencé depuis 2012 à développer des codes multiphysiques en éléments finis pour étudier les matériaux ME. Les travaux de cette thèse sont pour développer un modèle 3D combinant les modèles d'existence de piézoélectrique et magnétostrictif. Le modèle 3D est utilisé pour étudier le comportement du matériau magnétoélectrique: Modélisation de composite laminaire, prenant en compte la non linéarité de la magnétostrictive par un modèle multi-échelles et l'effet des courants de Foucault en régime dynamique ; Étude de différentes structures composites ME et de l'influence des paramètres géométriques sur la performance de ce matériau ; Application du principe d'homogénéisation à l'analyse du comportement magnétoélectrique de composites particules ME ou de composite fibres ME.

**Mots-Clés :** Magnétoélectrique, Méthode des éléments finis, Homogénéisation, Analyse 3D, Composite, Multi-Physique

### Multiphysic Modeling of Second Generation Magnetolectric Materials : application to Connected Objects

Magnetolectric materials (ME) are functional composite materials composed of piezoelectric and magnetostrictive phases that have the particularity of transforming magnetic energy into electrical energy through the mediation of mechanical energy. The ME effect can be characterized by a magnetolectric coefficient (V/Oe). This particular property generates growing interests in the scientific research and more specifically in the application of new energy transducers, magnetic sensors or variable inductances. It is in this context that the L2E began since 2012 the development of multiphysics finite element codes to study the ME materials. This thesis is the development of a 3D model combining the existence models of piezoelectric and magnetostrictive for the investigation of ME behavior from three aspects: Modeling of laminate composite, taking into account the nonlinearity of magnetostrictive through a multiscale model and the effect of eddy currents in dynamic regime; Study of different ME composite structures and the influence of geometries parameters on the performance of this material; Application of the homogenization principle to analyze the magnetolectric behavior of ME composites composed of granular nanoparticles type 0-3 or fiber composite type 1-3.

**Keywords :** Magnetolectric, Finite element method, Homogenization, 3D analysis, Composite, Multiphysic

## Yakoub Saadi

### Stratégies de contrôle et analyse des défauts d'une machine à réluctance variable pour une chaîne de traction électrique

De nos jours, les véhicules électriques et hybrides ont suscité un très grand intérêt en raison de préoccupations environnementales et énergétiques. Dans ces véhicules, les machines électriques utilisées sont des machines conventionnelles asynchrones et synchrones à aimants permanents. La machine à réluctance variable est une technologie candidate potentielle pour les chaînes de traction électriques et hybrides. Cette machine conçue sans aimants et redondante peut réunir la robustesse et le faible coût de la machine asynchrone aux bonnes performances de la machine synchrone à aimants permanents. Dans ce contexte, le premier objectif de cette thèse est de proposer des stratégies de commandes robustes de la machine à réluctance variable par la prise en compte des contraintes des chaînes de traction électriques en vue de réaliser une étude comparative des performances. Dans cette étude, les commandes proposées sont les commandes classiques de type PI, les commandes par mode glissant et les commandes par mode glissant d'ordre supérieur. Le deuxième objectif consiste à développer des observateurs d'état pour la commande sans capteur de position mécanique de la machine à réluctance variable. Des observateurs robustes basés sur la théorie du filtre de Kalman étendu et les modes glissants sont synthétisés pour atteindre cet objectif. Enfin, le troisième objectif est de faire une analyse des défauts électriques de type circuit ouvert de l'étage électronique de puissance par l'approche signal afin de développer une méthodologie de détection et de localisation automatique de ces défauts.

**Mots-Clés :** Commande sans capteur, Identification et localisation des défauts, Machine à réluctance variable, Commande robuste, Défaut électrique

### Control strategies and faults analysis of the Switched Reluctance Machine (SRM) for an electric vehicle application

Nowadays, electric and hybrid vehicles are gaining increased attention due to environmental and energy concerns. In these vehicles, the electrical machines used are the conventional machines, namely induction and permanent magnet synchronous machines. The switched reluctance machine is a potential candidate technology for electric and hybrid drivetrains. This machine designed without magnets and redundant windings, can combine the robustness and low cost of induction machines to the good performance of permanent magnet synchronous machines. In this context, the first objective of this thesis is to propose robust control strategies of the switched reluctance machine, taking into account the constraints of electric vehicles in order to make a comparative performance study. In this study, PI control, sliding mode control and higher order sliding mode control are proposed. The second objective is to develop state observers for sensorless control. Robust observers based on extended Kalman filter theory and sliding modes are synthesized to achieve this goal. Finally, the third objective is to make an analysis of electrical open-circuit faults of the electronic power stage using the signal approach in order to develop a methodology of automatic fault isolation.

**Keywords :** Sensorless control, FRobust control, Identification and location of faults, Electrical fault, Switched Reluctance Machine

## Yilun Li

### Méthodologies numériques pour l'optimisation topologique des dispositifs électromagnétiques

L'optimisation de la topologie est la conception conceptuelle d'un produit. En comparaison avec les approches de conception conventionnelles, il peut créer une nouvelle topologie, qui ne pouvait être imaginée à l'avance, en particulier pour la conception d'un produit sans expérience préalable ni connaissance. En effet, la technique de la topologie consistant à rechercher des topologies efficaces à partir de brouillon devient un sérieux atout pour les concepteurs. Bien qu'elle provienne de l'optimisation de la structure, l'optimisation de la topologie en champ électromagnétique a prospéré au cours des deux dernières décennies. De nos jours, l'optimisation de la topologie est devenue le paradigme des techniques d'ingénierie prédominantes pour fournir une méthode de conception quantitative pour la conception technique moderne. Cependant, en raison de sa nature complexe, le développement de méthodes et de stratégies applicables pour l'optimisation de la topologie est toujours en cours. Pour traiter les problèmes et défis typiques rencontrés dans le processus d'optimisation de l'ingénierie, en considérant les méthodes existantes dans la littérature, cette thèse se concentre sur les méthodes d'optimisation de la topologie basées sur des algorithmes déterministes et stochastiques. Les travaux principaux et la réalisation peuvent être résumés comme suit: Premièrement, pour résoudre la convergence prématurée vers un point optimal local de la méthode ON/OFF existante, un Tabu-ON/OFF, un Quantum-inspiré Evolutif Algorithme (QEA) amélioré et une Génétique Algorithme (GA) amélioré sont proposés successivement. Les caractéristiques de chaque algorithme sont élaborées et ses performances sont comparées de manière exhaustive. Deuxièmement, pour résoudre le problème de densité intermédiaire rencontré dans les méthodes basées sur la densité et le problème que la topologie optimisée est peu utilisée directement pour la production réelle, deux méthodes d'optimisation de la topologie, à savoir Matériau Isotrope solide avec pénalisation (SIMP)-Fonction de Base Radiale (RBF) et Méthode du Level Set (LSM)-Fonction de Base Radiale (RBF). Les deux méthodes calculent les informations de sensibilité de la fonction objectif et utilisent des optimiseurs déterministes pour guider le processus d'optimisation. Pour le problème posé par un grand nombre de variables de conception, le coût de calcul des méthodes proposées est considérablement réduit par rapport à celui des méthodes de comptabilisation sur des algorithmes stochastiques. Dans le même temps, en raison de l'introduction de la technique de lissage par interpolation de données RBF, la topologie optimisée est plus adaptée aux productions réelles. Troisièmement, afin de réduire les coûts informatiques excessifs lorsqu'un algorithme de recherche stochastique est utilisé dans l'optimisation de la topologie, une stratégie de redistribution des variables de conception est proposée. Dans la stratégie proposée, l'ensemble du processus de recherche d'une optimisation de la topologie est divisé en structures en couches. La solution de la couche précédente est définie comme topologie initiale pour la couche d'optimisation suivante, et seuls les éléments adjacents à la limite sont choisis comme variables de conception. Par conséquent, le nombre de variables de conception est réduit dans une certaine mesure; le temps de calcul du processus est ainsi raccourci. Enfin, une méthodologie d'optimisation de topologie multi-objectif basée sur l'algorithme d'optimisation hybride multi-objectif combinant l'Algorithme Génétique de Tri Non dominé II (NSGAI) et l'algorithme d'Evolution Différentielle (DE) est proposée.

**Mots-Clés :** Optimisation de la topologie, Méthode des éléments finis, Algorithme génétique, Microstructure isotrope solide avec pénalisation, Méthode des surfaces de niveau, Fonction radiale, Optimisation multi-objectifs

### Numerical methodologies for topology optimization of electromagnetic devices

Topology optimization is the conceptual design of a product. Comparing with conventional design approaches, it can create a novel topology, which could not be imagined beforehand, especially for the design of a product without prior-experiences or knowledge. Indeed, the topology optimization technique with the ability of finding efficient topologies starting from scratch has become a serious asset for the designers. Although originated from structure optimization, topology optimization in electromagnetic field has flourished in the past two decades. Nowadays, topology optimization has become the paradigm of the predominant engineering techniques to provide a quantitative design method for modern engineering design. However, due to its inherent complex nature, the development of applicable methods and strategies for topology optimization is still in progress. To address the typical problems and challenges encountered in an engineering optimization process, considering the existing methods in the literature, this thesis focuses on topology optimization methods based on deterministic and stochastic algorithms. The main work and achievement can be summarized as: Firstly, to solve the premature convergence to a local optimal point of existing ON/OFF method, a Tabu-ON/OFF, an improved Quantum-inspired Evolutionary Algorithm (QEA) and an improved Genetic Algorithm (GA) are proposed successively. The characteristics of each algorithm are elaborated, and its performance is compared comprehensively. Secondly, to solve the intermediate density problem encountered in density-based methods and the engineering infeasibility of the finally optimized topology, two topology optimization methods, namely Solid Isotropic Material with Penalization-Radial Basis Function (SIMP-RBF) and Level Set Method-Radial Basis Function (LSM-RBF) are proposed. Both methods calculate the sensitivity information of the objective function, and use deterministic optimizers to guide the

optimizing process. For the problem with a large number of design variables, the computational cost of the proposed methods is greatly reduced compared with those of the methods accounting on stochastic algorithms. At the same time, due to the introduction of RBF data interpolation smoothing technique, the optimized topology is more conducive in actual productions. Thirdly, to reduce the excessive computing costs when a stochastic searching algorithm is used in topology optimization, a design variable redistribution strategy is proposed. In the proposed strategy, the whole searching process of a topology optimization is divided into layered structures. The solution of the previous layer is set as the initial topology for the next optimization layer, and only elements adjacent to the boundary are chosen as design variables. Consequently, the number of design variables is reduced to some extent; and the computation time is thereby shortened. Finally, a multi-objective topology optimization methodology based on the hybrid multi-objective optimization algorithm combining Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGAI) and Differential Evolution (DE) algorithm is proposed. The comparison results on test functions indicate that the performance of the proposed hybrid algorithm is better than those of the traditional NSGAI and Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2 (SPEA2), which guarantee the good global optimal ability of the proposed methodology, and enables a designer to handle constraint conditions in a direct way. To validate the proposed topology optimization methodologies, two study cases are optimized and analyzed.

**Keywords :** Topology optimization, Finite element method, Genetic algorithm, Solid isotropic microstructure with penalization, Level set method, Radial based function, Multi-objective optimization