



Geeps

Génie électrique et électronique de Paris

LABORATOIRE GEEPS THÈSES 2023



université
PARIS-SACLAY



Abdelhakim Sahnoune

Conception d'un actionneur électromagnétique d'assistance circulatoire

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la conception d'actionneurs électromagnétiques appliqués à une pompe centrifuge qui sera intégrée dans un poumon artificiel portable. Ils s'inscrivent dans le cadre du projet RHU BioArtLung qui vise à miniaturiser un dispositif d'ECMO en améliorant la prise en charge des patients et les résultats de la transplantation pulmonaire. Un état de l'art des machines électriques appliquées aux dispositifs d'assistance circulatoire mécanique est réalisé et l'accent est mis sur les machines synchrones à aimants permanents à bobinage sur dents. À l'issue de l'étude bibliographique deux structures ont été retenues, une MSAP 12/8 à flux radial de référence et une machine à flux hybride innovante. Cette dernière a été brevetée durant la thèse. L'étude de la machine radiale de référence est d'abord réalisée. Son prédimensionnement est effectué à l'aide d'une étude paramétrique par plans d'expériences et une optimisation couplée à des modèles 2D EF. Un premier dimensionnement de la machine a conduit à la définition d'un prototype qui a servi à la validation expérimentale du modèle, les performances du prototype sont intéressantes et respect le cahier des charges. La pompe associée au premier moteur prototypé est caractérisée à l'aide d'un banc hydraulique et les performances hydrauliques souhaitées ont été atteintes. La suite de l'étude concerne une machine 6/4 à flux hybride à structure innovante et unique. Il s'agit d'une machine à double stator (radial et axial) et simple rotor à concentration de flux. Une approche de modélisation 3D à 2D a été proposée et validée par simulation. Finalement, une comparaison entre les deux structures, radiale et hybride est effectuée pour évaluer les performances en termes de rendement et densité de couple.

Mots-Clés : Convertisseur électromécanique, Couplage magnétique, Optimisation, Modèle analytique, Organe artificiel, Assistance circulatoire

Design of an electromagnetic actuator for circulatory assistance

The work presented in this thesis concerns the design of electromagnetic actuators applied to a centrifugal pump that will be integrated into a portable artificial lung. They are part of the RHU BioArtLung project, which aims to miniaturize an ECMO device by improving patient care and the results of lung transplantation. A state of the art of electrical machine applied to mechanical circulatory assistance devices is carried out, and the emphasis is placed on tooth-wound permanent magnet synchronous machines. At the end of the bibliographical study, two structures were selected, a PMSM 12/8 with reference radial flow and an innovative hybrid flow machine. The latter was patented during the thesis. The study of the reference radial machine is first carried out. Its dimensioning is carried out using a parametric study by experimental plans and optimization coupled with 2D FE models. The first dimensioning of the machine led to the definition of a prototype which was used for the experimental validation of the model, the performances of the prototype are interesting and respect the specifications. The pump associated with the first prototyped motor is characterized using a hydraulic bench, and the desired hydraulic performance has been achieved. The rest of the study concerns a 6/4 hybrid flow machine with an innovative and unique structure. It is a machine with a double stator (radial and axial) and a single rotor with flux concentration. A 3D to 2D modeling approach was proposed and validated by simulation. Finally, a comparison between the two structures, radial, and hybrid, is made to evaluate the performance in terms of efficiency and torque density.

Keywords : Electromechanical converter, Magnetic coupling, Optimization, Analytical modeling, Artificial organ, Circulatory assistance

Alexandre Bach

Localisation de défauts à la terre sur les réseaux de distribution HTA avec mesures supplémentaires dispersées de tension

Les travaux décrits dans ce manuscrit présentent une méthode de localisation des défauts à la terre conçue pour les réseaux de distribution à moyenne tension (HTA). Cette méthode impédance-métrique lève le problème de l'estimation multiple rencontré sur les réseaux de distribution au prix de la nécessité d'ajouter quelques mesures supplémentaires de tension distribuées sur les départs. Elle permet de localiser tout type de défauts à la terre dans une zone connexe de nœuds dont la taille dépend du nombre et de la position des mesures supplémentaires. Un formalisme probabiliste est proposé pour garantir le bon fonctionnement de la méthode et la connexité de la zone solution notamment en présence d'incertitudes sur les valeurs des impédances homopolaires du réseau et en présence d'erreurs de mesures. Enfin une analyse technico-économique est réalisée afin de chercher le nombre optimal, au sens de la rentabilité de l'investissement, de mesures supplémentaires qu'un gestionnaire de réseau devrait rajouter sur chaque départ. Cette analyse cherche à valoriser les gains de fiabilité espérés par le déploiement d'un tel algorithme.

Mots-Clés : Fiabilité, Défauts électriques, Localisation, Moyenne tension, Électricité, Distribution

Earth fault location for medium voltage distribution grids with distributed additional voltage measurements

This PhD thesis tries to design an efficient fault location algorithm tailored for long and highly ramified medium voltage distribution feeders. The impedance-based method solves the multiple estimation problem faced by single-end methods by leveraging some additional optimally placed voltage measurements. It has been demonstrated that this method is able to locate any type of earth faults into a connected set of nodes being the solution area, the size of which only depends on location and number of said additional measurements. In order to deal with possible measurement errors and zero-sequence grid impedance values uncertainties, a probabilistic formulation is proposed. This formulation achieves to be robust to both sources of errors at the cost of a minor increase in the size of the solution area. Finally, a technical-economic analysis is carried out in order to search for the most profitable number of additional measurements to deploy. The potential economic gains for the system operator from an increase in the reliability are estimated, assessing the profitability of the method for the operator.

Keywords : Fault location, Distribution grids, Phasor measurement units, Probabilistic estimation, Technical-Economical assessment technical-Economical assessment

Anass Boukir

Outils pour l'optimisation du dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique de tramway ou de métro

L'électrification des transports collectifs urbains, tels que le tramway, constitue un enjeu environnemental majeur. Les études technico-financières pour ces projets couvrent différents aspects de l'infrastructure, tels que le terrassement, les ouvrages d'art, les plateformes de voie ferrée, les bâtiments voyageurs, la technologie électrique, etc. L'objectif de ces études est de proposer des solutions techniques tout en évaluant les coûts, tant en termes d'investissement que de fonctionnement. L'infrastructure de traction électrique est un élément primordial dans cette équation, présentant un coût significatif. Elle doit répondre aux besoins de transport tout en respectant des objectifs financiers et environnementaux. Le dimensionnement de cette infrastructure vise à garantir la disponibilité de la ligne tout en optimisant les coûts. Les études techniques pour concevoir un système d'alimentation électrique impliquent le choix et le dimensionnement des composants qui permettent de transporter l'énergie du réseau public au matériel roulant, à savoir les sous-stations de traction, la ligne aérienne de contact, l'alimentation par le sol et les éléments de liaison. Ces choix s'appuient sur des études en simulation, exigeant des modèles et des outils précis pour éviter la surdimensionnement des infrastructures en raison d'incertitudes sur les résultats de la simulation. Par ailleurs, il faut faire des compromis entre les coûts d'investissement et de fonctionnement d'une part, et la capacité de l'infrastructure à faire face aux aléas de trafic d'autre part. L'objectif de la thèse est de développer une démarche d'optimisation multi-objectifs pour améliorer le dimensionnement des infrastructures électriques, en suivant deux axes de travail : i/ développement d'un simulateur électrique ferroviaire ayant une précision et une vitesse d'exécution compatibles avec une utilisation dans une boucle d'optimisation, ii/ développement d'une méthode d'optimisation du dimensionnement prenant en compte des objectifs concurrents. Le mémoire est structuré en six chapitres. Après un premier chapitre d'introduction générale, le deuxième chapitre détaille la problématique du dimensionnement des infrastructures électriques ferroviaires et fait un état de l'art sur le sujet. Le troisième chapitre porte sur le simulateur ferroviaire développé dans le cadre de la thèse. Les principes généraux, les modèles et les méthodes de résolution sont exposés, ainsi que le post-traitement des résultats de simulation. Le quatrième chapitre concerne la démarche d'optimisation d'infrastructure proposée. Il détaille la transformation du problème métier en un problème d'optimisation bi-objectifs, ainsi que le choix d'une résolution par algorithme génétique NSGA2. Les choix de mise en œuvre de cette méthode sont ensuite présentés. Dans le cinquième chapitre, la démarche d'optimisation proposée est appliquée à deux cas d'étude. Le premier est un cas d'école dont les résultats sont intuitifs. Cela permet de tester la démarche et d'affiner le choix des opérateurs de croisement et de mutation. Le deuxième cas d'étude correspond à un projet de ligne plus complexe, dérivé d'une véritable étude industrielle. Les résultats obtenus par optimisation sont meilleurs que ceux de la recherche par essais-erreurs faite en bureau d'étude. En particulier, l'optimiseur est capable de proposer un ensemble de solutions réalisant différents compromis entre coût et fiabilité, fournissant à l'ingénieur des critères d'aide à la décision objectifs. Pour donner une vue d'ensemble, l'objectif ultime est de créer un outil capable d'optimiser le dimensionnement des infrastructures électriques du tramway en respectant le cahier des charges technique.

Mots-Clés : Tramway, Infrastructures électriques, Dimensionnement, Optimisation, Algorithmes génétique

Tools for optimizing the sizing of tram or metro power supply infrastructure

The electrification of urban public transportation, such as trams, represents a major environmental challenge. The technical and financial studies for these projects cover various aspects of the infrastructure, such as excavation, civil engineering structures, railway track platforms, passenger buildings, electrical technology, and more. The objective of these studies is to propose technical solutions while evaluating costs, both in terms of investment and operation. The electric traction infrastructure is an important element in this equation, presenting a significant cost. It must meet transportation needs while adhering to financial and environmental goals. The sizing of this infrastructure aims to ensure the line's availability while optimizing costs. Technical studies for designing an electrical power supply system involve the selection and sizing of components that transport energy from the public grid to rolling stock, including traction substations, overhead contact lines, ground-level power supply, and connecting elements. These choices are based on simulation studies that require precise models and tools to avoid over-sizing the infrastructure due to uncertainties in simulation results. Moreover, compromises must be made between investment and operational costs on one hand and the infrastructure's capacity to handle traffic uncertainties on the other. The thesis's objective is to develop a multi-objective optimization approach to improve the sizing of electrical infrastructure, focusing on two main aspects: i/ the development of a railway electrical simulator with precision and execution speed compatible with optimization loop usage, and ii/ the development of a dimensioning optimization method that considers competing objectives. The thesis is structured into six chapters. After an initial general introduction, the second chapter delves into the issue of

railway electrical infrastructure sizing and provides a review of the subject. The third chapter focuses on the railway simulator developed as part of the thesis. It covers the general principles, models, resolution methods, and post-processing of simulation results. The fourth chapter discusses the proposed infrastructure optimization approach, detailing the transformation of the business problem into a bi-objective optimization problem and the choice of the NSGA2 genetic algorithm for resolution. The implementation choices for this method are then presented. In the fifth chapter, the proposed optimization approach is applied to two case studies. The first is a simple test case with intuitive results, allowing for testing and refining the choice of crossover and mutation operators. The second case study involves a more complex real-project. The optimization results outperform those obtained through trial-and-error. Specifically, the optimizer can suggest a range of solutions that strike different balances between cost and reliability, providing engineers with objective decision-making criteria. In summary, the ultimate goal is to create a tool capable of optimizing the sizing of tramway electrical infrastructure while respecting technical specification.

Keywords : Simulation, Electrical sizing, Optimization, Urban railway

Anastasia Popiolek

Stratégies optimales de recharge rapide sur autoroute pour des trajets longue distance en véhicule électrique

Le secteur des transports routiers représente 12% des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le monde et dans l'optique de réduire ces émissions, les constructeurs automobiles accélèrent la transition vers les véhicules électriques (VEs). Malgré une augmentation rapide des ventes ces dernières années, certains freins à l'adoption du véhicule électrique persistent, parmi eux, une autonomie encore limitée pour la plupart des modèles et des pauses allongées (par rapport à un véhicule thermique) pour recharger lors des trajets longue-distance. Une des solutions serait de diminuer les besoins en recharge en proposant des véhicules avec de plus grosses batteries mais ce type de véhicule est coûteux et à un impact environnemental important. En effet, même si un véhicule électrique n'émet pas de GES lorsqu'il roule, il n'en va pas de même lors de sa construction : la production de la batterie constitue une part non négligeable des émissions de GES sur sa durée de vie. Limiter la taille des batteries est donc une solution plus viable mais il faut en contre-parti proposer un service de recharge adapté pour les trajets longue-distance afin de favoriser plus facilement l'adoption des véhicules électriques. Par conséquent, l'objectif de cette thèse est d'étudier différents aspects de la recharge sur autoroute afin d'améliorer l'expérience des conducteurs de véhicule électrique lors de trajets longue distance. Pour étudier ces différents aspects, nous avons développé un environnement de simulation multi-agents qui permet de tester les interactions entre les véhicules et les stations suivant les aspects de la charge étudiée. Un premier niveau d'amélioration repose sur une gestion plus intelligente de la recharge d'une flotte de VEs s'appuyant sur une communication régulière entre les véhicules et les stations : les véhicules optimisent leur plan de charge et le partagent en temps réel aux stations qui en échange, évaluent les temps d'attente futurs et les communiquent aux VEs. Nous avons comparé deux stratégies utilisant la communication en temps réel : l'une respecte la règle de premier-arrivé-premier-servi (PAPS) en station alors que l'autre permet la réservation en avance de créneau de charge. Il apparaît que la communication associée à une règle de PAPS représente la meilleure stratégie. Un second niveau d'amélioration vise à dimensionner l'infrastructure de recharge à développer lorsque la stratégie de communication décrite précédemment est utilisée. Le problème a été résolu grâce à un optimiseur de loups gris (Grey Wolf Optimiser) qui minimise le coût de l'infrastructure tout en limitant le temps d'attente en station. En comparant les infrastructures optimales à développer quand les VEs communiquent et quand ils ne communiquent pas, on constate que la communication permet de réduire jusqu'à 26 % le coût de l'infrastructure. Enfin, nous avons également étudié l'influence de la puissance de charge des véhicules sur le temps passé en station ainsi que sur le coût de l'infrastructure à développer. En effet, augmenter la puissance de charge permet de diminuer le temps de charge mais cela signifie que l'infrastructure doit s'équiper en chargeurs de puissance plus élevée qui sont plus coûteux. Les résultats obtenus montrent qu'augmenter la puissance de charge des véhicules permet, même sans communication, de diminuer de plus de 50% le temps passé en station sans engendrer de coût supplémentaire pour l'infrastructure. Ainsi, la mise en place d'une stratégie de charge avec communication en temps réel permet d'utiliser plus efficacement l'infrastructure et de réduire le besoin en infrastructure. Si cette stratégie est couplée à une augmentation de la puissance de charge, elle permettra sans surcoût d'améliorer l'expérience des conducteurs de véhicule électrique en réduisant le temps passé en station.

Mots-Clés : Longue distance, Véhicule électrique, Recharge rapide, Optimisation, Communication en temps réel

Optimal fast-charging strategies for long-distance trips on the highway with all-electric vehicles

The transportation sector represents 12% of the greenhouse gas (GHG) emissions in the world and, to reduce those emissions, automotive makers accelerate the transition to electric vehicles (EVs). Despite fast-growing electric vehicle sales, some drawbacks to EV adoption still exist, including a limited range for most EV models and extended pauses (compared with a thermal car) to charge during long-distance trips. One solution would be to reduce charging needs by proposing EVs with larger batteries but this kind of vehicle is costly and has an important environmental footprint. Indeed, even if EVs do not emit tank-to-wheel GHG, it is not true for their construction: the battery production constitutes a non-neglectable part of vehicle GHG emissions during its lifecycle. Therefore, limiting the battery size is a more viable solution but in return, the charging service must be adapted to long-distance trips with limited range to favour more easily EV adoption. Thus, the objective of this thesis is to study different aspects of highway charging to improve EV drivers' experience during long-distance trips. For this purpose, we developed a multi-agent simulation framework to test interactions between the EVs and the charging stations according to the considered aspect. The first improvement relies on smart management of an EV fleet charging thanks to real-time communication between vehicles and stations: the EVs optimise their charging plan and share it with the stations and in exchange, the stations send back predictions on the future waiting time. We compared two strategies using real-time communication: the first is based on first-come first-served (FCFS) rules while the second enables the booking of charging time slots. It

appears that the communication associated with an FCFS rule represents the best strategy. A second improvement aims to size the charging infrastructure when the FCFS communication strategy is used. The problem is solved thanks to a Grey Wolf Optimiser that minimises the infrastructure cost while limiting the waiting time in stations. When we compare the optimal layout obtained when EVs communicate and when they do not, we observe that communication reduces by 26% the infrastructure cost. Finally, we studied the influence of EVs' charging power on the time spent in stations and the infrastructure cost. In fact, increasing the charging power decreases the charging time but this means that the infrastructure should be equipped with higher power rate chargers that are more costly. The results show that increasing EVs' charging power enables, even without communication, to reduce by more than 50 % the time spent in stations without additional cost for the infrastructure. Therefore, implementing a real-time communication strategy enables to use more efficiently the infrastructure and reduce the need for additional chargers. If this strategy is associated with increased charging power, it will enable without overcost to improve EV drivers' experience by reducing the time spent in stations.

Keywords : Long distance, Electric vehicle, Fast charging, Optimisation, Real-Time communication

Béatrice Guénégo

Conversion numérique de signaux biologiques de faibles intensités pour les applications biomédicales

L'ischémie cardiaque est une pathologie cardiaque qui est, selon l'Organisation Mondiale de la Santé, la première cause de mortalité. Il s'agit d'une vascularisation insuffisante des cellules du myocarde qui, si elle perdure, entraîne un infarctus cardiaque, c'est-à-dire la nécrose d'une partie du cœur, et met en danger la vie du patient. Néanmoins, si l'ischémie est prise en charge à temps, elle peut n'avoir aucune conséquence sur la santé du patient. Un système embarqué permettant de détecter l'ischémie cardiaque sur des durées longues, sans nécessiter une surveillance de la part du personnel médical, et qui fournirait des alertes permettrait aux patients d'être pris en charge plus tôt, augmentant ainsi leurs chances d'éviter l'infarctus. L'électrocardiogramme (ECG) est une mesure de l'activité électrique du cœur couramment utilisée en médecine pour effectuer un premier diagnostic. Elle permet de détecter de nombreuses pathologies cardiaques via un examen de la morphologie du signal et des intervalles de temps entre les différents événements. Le diagnostic d'ischémie s'appuie sur les variations de la partie de l'ECG désignée comme le segment ST. Il existe déjà des systèmes embarqués s'appuyant sur l'ECG pour détecter des troubles du rythme cardiaque, mais aucun ne détecte l'ischémie. Dans ce contexte, l'originalité de ce travail de thèse est la conception d'un système intégré qui sera à même de détecter spécifiquement les variations du segment ST pour détecter l'ischémie. Les principaux verrous à la conception d'un tel système sont la préservation du segment ST pendant l'étape d'acquisition et la définition d'un traitement du signal adapté à l'électronique intégrée (consommation, complexité, préservation du segment ST). Par conséquent, dans le cadre de cette thèse, nous avons étudié la conception d'un système intégré adapté à l'acquisition et au traitement de l'ECG dans le cadre de la détection de l'ischémie cardiaque. Les différents circuits, simulations et « layouts » produits ont été réalisés en 180 nm, dans la technologie XFAB xh018. La norme sur les performances minimales des électrocardiogrammes éditée par l'International Electrotechnical Commission (IEC) a été utilisée comme référence pour la quantification de la distorsion du segment ST. Nous avons tout d'abord conçu un étage d'acquisition analogique depuis le niveau système jusqu'au niveau transistor. Des simulations de cet étage ont ensuite été réalisées pour confirmer son adéquation avec la norme IEC et pour estimer sa consommation. La conception d'un convertisseur analogique-numérique n'apportant pas de nouveauté par rapport à l'état de l'art, elle n'a pas été abordée pendant cette thèse. Nous avons ensuite étudié une implémentation de la transformée en ondelettes discrète en intégré, transformée utilisée pour éliminer le bruit et obtenir des informations sur les points caractéristiques du signal tout en conservant la possibilité d'une reconstruction du signal. Pour qualifier les performances de ce traitement numérique, nous avons simulé une implémentation de l'algorithme de Mallat en Python, qui a ensuite été réalisée en VHDL, et enfin un placement-routage de ce circuit numérique a été effectué pour plusieurs ondelettes. De cette manière, les « layouts » et les résultats des simulations « post-layout » ont permis de déterminer quelle ondelette offre le meilleur compromis entre la distorsion du signal, l'élimination de la « baseline wander », la consommation, et la surface du circuit. L'ensemble de ce travail couvre donc la conception et le dimensionnement des blocs essentiels d'une chaîne d'acquisition de l'ECG dédié à la détection du segment ST qui soit intégrable sur une puce. Il pourra être complété par l'implémentation d'une méthode embarquée de prise de décision avant la réalisation physique d'une puce électronique.

Mots-Clés : Ischémie cardiaque, Électrocardiogramme (ECG), Distorsion du signal, Transformée en ondelettes, Circuit intégré

Digital conversion of low-level biological signals for biomedical applications

According to the World Health Organization, cardiac ischemia is the world's leading cause of death. Ischemia is an insufficient vascularization of myocardial cells, which, if prolonged, leads to the necrosis of part of the heart, i.e., a cardiac infarction, endangering the patient's life. However, if ischemia is treated in time, it can have no impact on the patient's health. An embedded system that detects cardiac ischemia over long periods, without requiring medical staff monitoring, and provides alerts would enable patients to be taken care of earlier, increasing their chances of avoiding a heart attack. The electrocardiogram (ECG) is a measurement of the heart's electrical activity, commonly used in medicine to make an initial diagnosis. Examining the signal morphology and the time intervals between different events gives hints of eventual pathologies. The diagnosis of ischemia is based on variations in the part of the ECG named ST segment. Some embedded systems using the ECG to detect cardiac arrhythmias already exist, but none target cardiac ischemia. In this context, the originality of this work is in the design of an integrated system that can detect ST segment variations for ischemia diagnosis. The main difficulties of such a system's design are ST segment preservation during the acquisition stage and the conception of a signal processing method adapted to integrated circuits (power consumption, complexity, ST segment preservation). In this thesis, we studied the design of an integrated system for ECG acquisition and processing for cardiac ischemia detection. The various circuits, simulations, and layouts were realized in 180 nm using XFAB xh018 technology. The standard giving minimum performance for electrocardiograms

published by the International Electrotechnical Commission (IEC) was used to quantify ST-segment distortion. We first designed an analog acquisition stage from the system to the transistor level. Simulations of this stage were then carried out to confirm its compliance with the IEC standard and to estimate its power consumption. As the design of an analog-to-digital converter is not new to the state of the art, it was not addressed during this thesis. Then, we conceived an integrated implementation of the discrete wavelet transform, used to eliminate noise and obtain information on the signal's fiducial points while retaining the possibility of reconstructing the signal. We first simulated an implementation of Mallat's algorithm in Python, which was then realized in VHDL, and finally, the place and route step was carried out for several wavelets. Layouts and post-layout simulation results were used to determine which wavelet offered the best trade-off between signal distortion, baseline wander elimination, power consumption, and circuit area. This work covers the design and dimensioning of the essential blocks of an ECG acquisition chain dedicated to ST segment detection that can be integrated. It may be completed by implementing an embedded decision-making method before the physical realization of the chip.

Keywords : Cardiac ischemia, Electrocardiogram (ECG), Signal distortion, Wavelet transform, Integrated circuit

Charles Boulitrop

Contrôle non-destructif et polynômes de chaos : métamodèle et inversion paramétrique

Cette thèse a pour objet le développement d'une méthodologie de résolution de problèmes inverses dans le contexte du Contrôle Non Destructif (CND) par courants de Foucault. La caractérisation d'un défaut à partir d'observations est ce que l'on appelle un problème inverse, associé à un problème direct. Contrairement à ce dernier, il n'existe généralement pas d'équation modélisant un problème inverse en lui-même. Sa résolution se fait en utilisant la solution du problème direct, à l'aide de solveurs numériques, dont le coût de calcul peut se révéler considérable. On se consacre, dans cette thèse, au développement d'une méthodologie de traitement, comportant plusieurs étapes. Les observations sont d'abord transformées en composantes principales, ce qui permet de les décorrélérer et d'en réduire la dimension. Puis, un métamodèle de décomposition en chaos polynomial (PCE) est construit à partir des composantes principales, pour être substitué au modèle physique direct. Ensuite, une analyse de sensibilité est menée sur le métamodèle pour identifier les paramètres du défaut dont la reconstruction est difficile. La résolution du problème inverse se fait enfin par minimisation d'une fonction coût mesurant la différence entre la simulation et les données d'observation, en utilisant un algorithme combinant optimisation par essaim de particules (PSO) et descente de gradient. Les résultats obtenus sur des configurations de différentes dimensions sont de bonne qualité et démontrent l'intérêt de cette méthodologie, validée sur la première configuration, testée sur un problème plus complexe sur la deuxième et confrontée à un problème mal posé sur la troisième. En particulier, la réduction de dimension améliore la reconstruction sur données bruitées, le métamodèle permet d'approximer le modèle avec une bonne précision et l'analyse de sensibilité aide à identifier le caractère mal posé du problème.

Mots-Clés : Contrôle par courants de Foucault, Métamodèle, Décomposition en chaos polynomial, Inversion paramétrique, Optimisation par essaim de particules, Analyse de sensibilité

Non-destructive evaluation and polynomial chaos expansion : surrogate model and parametric inversion

This thesis focuses on the development of a resolution methodology for inverse problems in the frame of Non Destructive Testing (NDT), precisely eddy current testing. Characterizing a defect from observations is deemed an inverse problem, tied to a forward problem. Unlike the latter, an inverse problem can generally not be modelled by an equation. Solving it relies on the resolution of the forward problem, by means of numerical solvers, which can represent a computational burden. In this thesis, a multiple-stage methodology is implemented. The observations are first transformed into principal components, to decorrelate them and reduce their dimension. Then, a polynomial chaos expansion (PCE) metamodel is built from the principal components, to surrogate the forward model. Next, a sensitivity analysis is carried out on the metamodel to identify the defect parameters whose reconstruction is problematic. Finally, the inverse problem is solved by minimizing a cost function measuring the discrepancy between the simulation and the observations to be inverted, using an algorithm combining particle swarm optimization (PSO) and gradient descent. The results obtained on configurations of various dimensions are of good quality and show the interest of using such a methodology, which is first validated on the first configuration, tested on the second and confronted to an ill-posed problem in the third. In particular, reducing the dimension improves the reconstruction from noisy data, metamodeling allows for a good approximation of the model and sensitivity analysis helps to identify the ill-posedness of the problem.

Keywords : Eddy current testing, Metamodel, Polynomial chaos expansion, Parametric inversion, Particle swarm optimization, Sensitivity analysis

Cheng Chi

Analyse numérique et réduction d'ordre de modèle pour l'évaluation de l'isolation des transformateurs convertisseurs

La sécurité de l'isolation des transformateurs convertisseurs est d'une grande importance pour le fonctionnement fiable du réseau électrique. Transformateurs convertisseurs fonctionnent dans des conditions de champ électrique intense, où les effets de couplage ont un impact significatif sur les paramètres physiques des matériaux. La dépendance du champ électrique de la conductivité d'huile-papier est non linéaire, ce qui fait que l'évaluation de l'isolation nécessite des ressources informatiques intensives et du temps de calcul important. Par conséquent, le développement d'un modèle peu coûteux pour l'évaluation de l'isolation est nécessaire de toute urgence. Ce modèle pourrait améliorer l'efficacité de la conception et de la fabrication des transformateurs convertisseurs. Dans cette thèse, l'état de l'isolation dans deux conditions de fonctionnement particulières des transformateurs convertisseurs est étudié. En fonction des caractéristiques des conditions d'inversion de la polarité de la tension et de tension composite AC-DC, deux modèles d'ordre réduit sont proposés pour réduire la complexité des calculs. En outre, l'effet de la charge d'espace sur l'état d'isolation est considéré. Les principaux travaux et réalisations peuvent être résumés comme suit : Tout d'abord, l'état de l'isolation en cas d'inversion de la polarité de la tension est étudié en tenant compte de la dépendance non linéaire du champ électrique de la conductivité anisotrope de l'isolant. Pour réduire les coûts de calcul, un modèle d'ordre réduit basé sur la Décomposition Orthogonale aux valeurs Propres (POD) - la méthode d'interpolation empirique discrète combinée avec la décomposition QR (QDEIM) est développé. La POD est utilisée pour réduire les degrés de liberté des variables à résoudre, tandis que la QDEIM réduit la complexité des termes non linéaires. En outre, l'analyse de la borne d'erreur de la QDEIM est effectuée, et les résultats montrent que la QDEIM a une meilleure borne d'erreur que la DEIM conventionnelle. Deuxièmement, l'état de l'isolation sous une tension composite AC-DC périodique est étudié. Pour ce problème périodique, la méthode de l'équilibrage harmonique (HBM) est utilisée, et elle est combinée avec la Décomposition Propre Généralisée (PGD) pour réduire l'ordre de la matrice des coefficients. Dans cette étude, le champ électro-quasi-statique est déduit du schéma HBM/PGD, et QDEIM est adopté dans HBM/PGD pour mettre à jour le terme non linéaire de la conductivité. La clé de HBM/PGD-QDEIM est d'utiliser les tenseurs d'ordre inférieur pour approximer la variable à résoudre dans le domaine des fréquences, de sorte que la méthode peut réduire les dépenses de calcul de manière significative. En outre, la méthode de la fonction de pénalité séparée dans l'espace-temps est proposée pour traiter la condition limite de Dirichlet variable dans le temps. Troisièmement, pour étudier l'effet de la charge d'espace sur l'état d'isolation, une méthode des éléments finis "upstream" (UFEM) basée sur la somme vectorielle est proposée pour étudier le transport de charge dans l'huile de transformateur en circulation. Cette méthode peut estimer la direction du transport de charge par la somme vectorielle combinée de la migration et de la convection. Basée sur le modèle de charge bipolaire, l'injection, la re-combinaison, le processus de piégeage-dépiégeage sont tous pris en compte dans cette méthode. Pour valider les modèles d'ordre réduit proposés, des modèles numériques de transformateurs convertisseurs sont construits pour analyser l'état d'isolation et sont comparés aux résultats des modèles d'ordre complet. De plus, la UFEM basée sur la somme vectorielle est appliquée dans les modèles de conduits d'huile pour étudier la distribution de la charge d'espace. Ces modèles et résultats pourraient fournir une base théorique et des informations de référence pour la conception d'isolation de transformateurs convertisseurs.

Mots-Clés : Modèle d'ordre réduit, Systèmes non linéaires, Charge d'espace, Méthode des éléments finis, Transformateur convertisseur

Numerical analysis and model order reduction for insulation evaluation of converter transformers

The insulation safety of a converter transformer is of great importance to the reliable operation of the power grid. Converter transformers operate under strong electric field condition, where the coupling effects have a significant impact on the physical parameters of materials. The electric field dependence of oil-paper conductivity is nonlinear, which makes the insulation evaluation computationally intensive and time-consuming. Therefore, the development of a low-cost model for insulation evaluation is urgently needed, which could improve the efficiency of converter transformer design and manufacturing. In this thesis, the insulation states under two special operating conditions of converter transformers are studied. According to the characteristics of voltage polarity reversal conditions and composite AC-DC voltages, two reduced-order models are proposed to decrease the computational complexity. In addition, the space charge effect on insulation state is considered. The main work and achievement can be summarized as follows : Firstly, the insulation state under voltage polarity reversal is studied considering the nonlinear electric field dependence of anisotropic conductivity of insulating materials. To decrease the computational expenses, reduced-order model based on Proper Orthogonal Decomposition-QR Factorization Discrete Empirical Interpolation Method (POD-QDEIM) is developed. POD is utilized to reduce the degrees

of freedom of variables to be solved, while QDEIM reduces the computational complexity of the nonlinear terms. Moreover, the error bound analysis of QDEIM is conducted, and the results show that QDEIM has a better error bound than conventional DEIM. Secondly, the insulation state under composite AC-DC periodic voltage is studied. For this period problem, Harmonic Balance Method (HBM) is utilized, and it is combined with Proper Generalized Decomposition (PGD) to reduce the order of coefficient matrix. In this work, the electro-quasi-static field is deduced in HBM/PGD scheme, QDEIM is adopted into HBM/PGD to update the nonlinear term of conductivity. The key of HBM/PGD-QDEIM is to utilize the low-order tensors to approximate the variable to be solved in frequency-domain, so the method can shorten the computational expenses significantly. In addition, the space-time separated penalty function method is proposed to treat the time-variant Dirichlet boundary condition. Thirdly, to study the space charge effect on the insulation state, the upstream finite element method based (UFEM) on vector sum is proposed to study the charge transport in flowing transformer oil. This method can estimate the direction of charge transport by the combined vector sum of the migration and the convection. Based on the bipolar charge model, the injection, the recombination, the trap-detrapping process are all considered in this method. To validate the proposed reduced-order models, numerical converter transformer models are constructed to analyse the insulation state and compared with full-order model results. Additionally, the UFEM based on the vector sum is applied in oil-duct models to study the distribution of space charge. These models and results could provide theory basis and reference information for the insulation design of converter transformer.

Keywords : [Reduced order model](#), [Nonlinear systems](#), [Space charge](#), [Finite element modelling](#), [Converter transformer](#)

Clovis Bule Mbo

Analyse comparative de tests en immunité aux émetteurs embarqués d'organes électroniques automobiles - Expérimentation d'une nouvelle technique sur véhicule

Durant leur phase de validation, les véhicules en développement sont soumis à des essais de validation des fonctions électriques et électroniques dans des moyens d'essais de compatibilité électromagnétique (CEM). Ces essais ont pour but de s'assurer de leur tenue aux différentes sources de rayonnement électromagnétique internes ou externes à leur environnement. Parmi ces sources, on distingue les émetteurs embarqués portables qui sont les dispositifs de radiocommunications, qu'utilisent les usagers des véhicules, tels que les téléphones mobiles, les tablettes et autres dispositifs d'assistance personnelle. Ces équipements peuvent se retrouver à tout moment, à n'importe quel endroit dans l'habitacle et perturber le fonctionnement des équipements à proximité. Les essais de validation en immunité aux émetteurs embarqués se basent sur les validations unitaires sur table et les validations sur véhicules complets. Le déploiement en cours des nouvelles normes de radiocommunication introduit les nouvelles bandes de fréquence (d'émission et de réception) beaucoup plus haute que les précédentes normes. Ceci augmente significativement les coûts et les délais de validation des nouvelles technologies. Nous proposons dans cette thèse, une étude comparative des niveaux de couplages entre une antenne de test et un équipement cas test ainsi que son faisceau de câbles dans différents environnements de test sur table et sur véhicule. Nous comparons dans un premier temps les couplages sur table aux couplages sur véhicule, ensuite nous comparons les couplages sur table en CRBM aux couplages sur table en immunité aux émetteurs embarqués. Nous proposons dans la deuxième partie de ces travaux une nouvelle méthode d'essais sur véhicule transformé en CRBM, et comparons les niveaux de couplages dans différentes configurations d'essais. Cette nouvelle méthode, au-delà de sa proximité avec essais sur table en CRBM, permet aussi de générer aléatoirement plusieurs zones de champs élevés dans l'habitacle du véhicule résolvant ainsi la problématique de la localisation des émetteurs portables dans l'habitacle d'un véhicule sous test.

Mots-Clés : CEM, RF, Chambre réverbérante, CRBM, Chambre anéchoïque, Émetteur embarqué, Immunité rayonnée

Comparative analysis of the immunity tests to on-board transmitters of automotive electronic components - Experimentation of a new technique on vehicle

During their validation phase, vehicles under development are submitted to the validation tests of electrical and electronic functions in electromagnetic compatibility (EMC) test facilities. The purpose of these tests is to guarantee their immunity to internal or external electromagnetic radiation sources. These sources include portable on-board transmitters, which are radio communication equipment used by vehicle users, such as cell phones, tablets and other personal digital assistance (PDA). Such equipment can be found at any location in the vehicle compartment and affect other equipment located nearby. Validation tests for immunity to on-board transmitters are based on unit validation on a table and validation on complete vehicles. The current deployment of new radio communication standards introduces new frequency bands higher than the previous standards. Consequently, the cost and time of validation of the new technologies are significantly increased. In this thesis, we propose a comparative study of the coupling levels between a test antenna and an equipment and its cable harness in different test environments. We first compare the couplings on table to the couplings on vehicles, then we compare the couplings on table in CRBM to the couplings on table in immunity to the embedded transmitters. In the second part of this work, we propose a new test method on vehicles converted to MSRC, and we compare the coupling levels in different test configurations. This new method, close to the MSRC tests, provides the possibility to generate random high field locations in the vehicle cabin, thus solving the challenge of locating portable transmitters in the vehicle under test.

Keywords : EMC, RF, Reverberation chamber, MSRC, Anechoic chamber, On-board transmitter, Radiated immunity

Davide Regaldo

Etude d'interfaces dans des dispositifs opto-électroniques à base de matériaux pérovskites

Les cellules solaires à base de matériaux pérovskites (PSK) ont récemment suscité l'engouement en raison d'une augmentation rapide de l'efficacité de conversion de l'énergie (PCE) pour les cellules les plus performantes, leur permettant de concurrencer la technologie établie des cellules solaires au silicium. Toutefois, le peu de connaissance acquise sur les nouveaux matériaux PSK hybrides organiques-inorganiques, ainsi que l'emploi de couches d'extraction sélective des porteurs (SCTL) réactives ou instables constituent un frein à leur commercialisation rapide. Une grande partie des améliorations en matière de PCE et de stabilité des cellules provient d'une meilleure compréhension des propriétés optoélectroniques de leurs matériaux constitutifs. Dans ce contexte, cette thèse de doctorat s'est concentrée sur le couplage de techniques de caractérisation avancées, telles que la sonde de Kelvin (KP), la microscopie à force atomique à sonde de Kelvin (KPFM), la spectroscopie électronique XPS et la mesure de photo-tension de surface en régime transitoire (TrSPV), avec des simulations 2D reposant sur la résolution numérique des équations de dérive-diffusion (DD) par différences finies, utilisées pour interpréter les résultats des expériences et obtenir des informations sur les propriétés optoélectroniques des matériaux dans les cellules solaires. Deux dispositifs à hétérojonction latérale (LHJ) ont été produits. Il s'agit en fait de cellules photovoltaïques munies de deux contacts en face arrière, laissant la surface de la pérovskite accessible pour différents types de caractérisation. Nous avons étudié ces structures LHJ à l'aide de la spectroscopie électronique XPS. L'analyse nous a permis d'évaluer une densité de dopage effective maximale dans la fine couche de PSK d'environ 10^{11} cm^{-3} , cette valeur très faible attestant la qualité et le caractère intrinsèque de cette couche. Nous avons aussi étudié des structures où le matériau PSK était déposé sur une couche d'extraction sélective d'électrons (ETL), à savoir du TiOx. Les techniques KP et KPFM ont été utilisées pour étudier la réponse des structures PSK/TiOx à l'illumination continue et leur relaxation après coupure de l'illumination sur une gamme temporelle allant de la seconde à plusieurs milliers de secondes. Le signal de SPV obtenu présente une forte intensité d'environ 300 mV en régime stationnaire et un temps de décroissance après coupure de la lumière très long ($\tau=700 \text{ s}$). L'analyse de cette réponse par modélisation DD nous a conduit à postuler la présence de pièges donneurs profonds dans la couche d'extraction d'électrons de TiOx comme la seule cause électronique possible de cette réponse. Enfin, nous avons utilisé les mesures de TrSPV dans la gamme [1 ns, 0.5 s] pour étudier la réponse des structures PSK/TiOx à des impulsions laser de quelques nanosecondes. La modélisation DD a montré que la réponse transitoire de SPV pouvait être bien reproduite en intégrant les défauts donneurs profonds dans TiOx. L'ajustement des transitoires calculés par ce modèle aux résultats expérimentaux a permis de préciser les valeurs de divers paramètres des matériaux TiOx et PSK, et a suggéré l'existence de pièges peu profonds accepteurs d'électrons dans le matériau PSK.

Mots-Clés : Perovskite, Interfaces, Optoélectronique, Characterisation, Modélisation

Investigation of interfaces in perovskite-based optoelectronic devices

Perovskite (PSK) solar cells (PSCs) have recently gained attention due to a rapid increase in best-cell power conversion efficiency (PCE), allowing them to compete with the established silicon solar cell technology. Nevertheless, the novelty of hybrid PSK materials, as well as the employment of reactive or unstable selective carrier extraction layers (SCTLs), has hindered fast marketization. Much of the improvements in PCE, as well as stability, have come from a deeper understanding of the optoelectronic properties of the materials inside PSCs. In this context, this PhD thesis focused on coupling advanced characterization techniques, such as Kelvin probe (KP), Kelvin probe force microscopy (KPFM), X-ray photoemission spectroscopy (XPS), and transient surface photovoltage (TrSPV), with 2D drift-diffusion based (DD) simulations, employed to interpret the outcome of the experiments and gain information on the optoelectronic properties of the materials in the solar cell stack. Two lateral heterojunction (LHJ) devices have been produced and studied. These samples are essentially PSCs with a full-back-contact design, leaving the PSK surface available for characterization. We studied the LHJs using XPS, interpreting the results with the help of the DD model. The analysis allowed us to evaluate a maximum effective doping density in the PSK layer of about 10^{11} cm^{-3} . This value is low enough to consider the thin PSK layer employed in PSCs as intrinsic and of high electronic quality. We also studied structures where the PSK has been deposited onto a selective electron transport layer (ETL), namely TiOx. KP and KPFM have been employed to study the response of PSK/TiOx structures to continuous illumination and the relaxation after switch-off. The acquired response in the [1 s, 1 hr] range shows a large positive surface photovoltage (SPV) amplitude of about 300 mV and a long SPV decay time ($\tau=700 \text{ s}$). The interpretation with our DD-based simulations led us to postulate the presence of deep donor traps in the ETL as the only possible electronic cause of the observed response. Finally, we used TrSPV measurements in the [1 ns, 0.5 s] range to study the response of PSK/TiOx structures to ns laser pulses. A parametric DD model, including the deep TiOx donor defects suggested by the previous KP/KPFM study, has been built to reproduce the experiment. By fitting the experimental data, we obtained various material parameters, not only related to TiOx, but also to the PSK layer, which showed, in particular, the existence of a large concentration of shallow electron acceptor traps.

Keywords : Perovskite, Interfaces, Opto-Electronic devices, Characterization, Modelling

Frédéric Reymond-Laruina

Hybridation d'un poste de distribution HTA/BT : conception et dimensionnement

Dans cette thèse, nous nous intéressons à la mise en place d'un réseau de distribution basse tension à courant continu à partir de départ existant dans un poste de transformation HTA/BT. Dans un premier temps, nous détaillons la structure envisagée pour le réseau de distribution et les conséquences que cela engendre sur le dimensionnement du convertisseur. Ces hypothèses sont prises en se référant aux démonstrateurs existants et aux exigences du gestionnaire de réseau de distribution. Il ressort de cette analyse la criticité de la contrainte de sélectivité du réseau. Pour gérer cette contrainte, nous proposons d'utiliser des composants en parallèle des bras du convertisseur pour limiter le courant de défaut et dévier une partie de ce courant vers des composants possédant une meilleure tenue thermique que les composants de base. La méthode de dimensionnement adoptée laisse envisager une économie de 40 % par rapport à une solution par surdimensionnement simple du convertisseur. Un prototype de convertisseur a été construit et nous a permis de vérifier la déviation du courant en cas de court-circuit entre pôles, ainsi que le comportement du convertisseur en cas de défaut. Dans l'optique de diminuer la contrainte de dimensionnement, nous nous sommes intéressés à la possibilité d'une protection par fusible sur le réseau continu. Un modèle de court-circuit nous permet d'estimer le temps de pré-arc d'un fusible, tandis qu'un autre modèle, issu de résultats d'essais, nous permet d'évaluer la phase d'arc d'un fusible et son temps de coupure. En couplant ces deux modèles, nous sommes ainsi capable de fournir une approximation de la contrainte thermique à respecter pour un convertisseur.

Mots-Clés : Basse tension à courant continu, Fusible, Court-Circuit, Convertisseur à deux niveaux de tension

Hybridization of a MV/LV distribution substation : design and sizing

In this thesis, we focus on the implementation of a low-voltage DC distribution network from an existing LV feeder in a MV/LV transformer substation. First and foremost, the considered structure for the distribution grid is detailed and its consequences on the converter sizing. These assumptions rely on the existing demonstrators and the DSO requirements. This analysis shows that the grid selectivity constraint is critical. To meet this constraint, we propose to use components in parallel with the converter arms to limit the fault current and divert part of this current to components with higher thermal stress ability. The sizing method suggests as saving of 40% compared with an oversized converter. A prototype was built, enabling us to validate the current deviation in the event of a short-circuit between poles, as well as the behaviour of the converter during the fault. In order to reduce the sizing constraints, we looked into the possibility of a fuse protection on the DC grid. A short-circuit model allows to estimate the fuse pre-arcing time, while another model, derived from test results, allows to evaluate the fuse arcing phase and its cut-off time. By coupling these two models, we are able to provide an approximation of the thermal stress to be respected for a converter.

Keywords : Low voltage direct current, Fuse, Short-Circuit, Two-Level converter

Guillaume Chau

Cellules multispectrales III-V sur Silicium cristallin : développement d'étapes technologiques et de caractérisations en vue de la réalisation d'un démonstrateur de cellule tandem (Al)GaAs/Si

L'objectif de cette thèse est de développer les différentes étapes technologiques pour la réalisation d'un démonstrateur de cellule tandem (Al)GaAs/Si, ainsi que les caractérisations associées. L'idée est de proposer un démonstrateur de cellule solaire photovoltaïque, pour des applications terrestres, présentant un haut rendement pour un coût raisonnable. L'intégration de cellules solaires (Al)GaAs sur substrat de Si est une voie prometteuse car elle permet d'allier les rendements de conversion élevés des matériaux III-V avec le faible coût du Si. Pour ce faire, je me suis intéressé à l'optimisation d'un procédé spécifique permettant l'intégration sans défauts de matériaux III-V (AlGaAs) sur substrat Si. Ce travail s'inscrit dans la continuité des études réalisées par les laboratoires GeePs et C2N (équipe SEEDs) qui ont permis de démontrer l'intégration épitaxiale de microcristaux (μ -cristaux) de GaAs parfaitement relaxés sur substrat de Si(100) et Si(111). Mon travail a consisté plus particulièrement à étudier le dopage résiduel dans les μ -cristaux de GaAs en explorant une voie pour son contrôle et à étendre ce concept d'intégration à l'AlGaAs. Ainsi, un des objectifs de cette thèse était de diminuer le dopage de type P non intentionnel présent dans les μ -cristaux de GaAs, en étudiant l'effet de la variation du rapport V/III, défini comme le rapport des débits des précurseurs gazeux de l'As (le TBAs) et du Ga (le TMGa). Ce dopage de type P est provoqué par l'incorporation non intentionnelle d'atomes de carbone liée à une décomposition incomplète du précurseur de TMGa lors de la croissance. L'augmentation du rapport V/III doit permettre de diminuer cette incorporation de C en augmentant la production d'atomes d'hydrogène facilitant ainsi la décomposition complète de cette molécule. Pour ce faire, nous avons commencé par étudier l'évolution du dopage des μ -cristaux de GaAs/Si en fonction du rapport V/III grâce à des mesures de μ -photoluminescence (μ -PL). Les premiers résultats semblaient indiquer une diminution du dopage de type P des μ -cristaux. Cependant, nous avons observé qu'un phénomène de piégeage optique, dû à la taille micrométrique des cristaux, influençait les mesures de μ -PL. Afin d'éviter cet effet de taille, nous avons réalisé l'étude sur des homoépitaxies de GaAs sur des substrats GaAs(110). Nous avons choisi cette orientation peu usitée de substrat afin de réaliser les homoépitaxies dans les conditions de croissance les plus proches possibles de celles des hétéroépitaxies des μ -cristaux. Une étude de μ -PL en fonction de la température de mesure sur ces homoépitaxies nous a permis de montrer que l'augmentation du rapport V/III dans la gamme étudiée, conduisait malgré tout à une concentration de dopants élevée (de l'ordre de 10^{18} cm^{-3}). En perspective de ce travail, nous avons proposé une approche alternative pour contrôler le dopage résiduel. Nous avons aussi pu mettre au point un procédé technologique permettant de réaliser l'étude de l'ohmicité de contacts métalliques avec GaAs, préfigurant le contact supérieur de la cellule tandem. Le procédé de réalisation par lithographie laser a été validé, et les premiers tests ont été menés pour étudier le contact ITO/GaAs. À cette fin, un banc de mesure a été actualisé et amélioré pour permettre d'étudier l'évolution avec la température de la résistance d'un contact métallique avec GaAs. Un autre objectif de cette thèse était d'étendre ce concept de croissance à l'épitaxie de μ -cristaux d'AlGaAs sur Si. Les premiers résultats valident la preuve de concept pour la croissance d'AlGaAs sur Si par ce procédé d'intégration, avec des compositions d'Al proches de 18%, concentration à viser pour l'optimisation d'un tandem AlGaAs/Si. Ces résultats prometteurs permettent à cette technique d'intégration d'ouvrir la voie à des dispositifs hybrides III-V/Si exempts de restrictions de paramètre de maille, et où le silicium se comporte à la fois comme un substrat et un matériau actif.

Mots-Clés : (Al)GaAs sur Si, Dopage résiduel, Rapport V/III, Hétéroépitaxie, Homoépitaxie, Micro-photoluminescence

Multispectral III-V cells on crystalline silicon : development of technological and characterisation steps towards the realisation of an (Al)GaAs/Si tandem cell demonstrator

The purpose of this thesis is to develop the different technological steps for the realisation of a tandem (Al)GaAs/Si cell demonstrator, and the associated characterisations. The aim is to propose a demonstrator of photovoltaic solar cells with high efficiency at a reasonable cost, for terrestrial applications. The integration of (Al)GaAs solar cells on Si substrate is a promising way to combine the high conversion efficiencies of III-V materials with the low cost of Si. In order to do this, we investigated the optimisation of a specific process allowing defect-free integration of III-V materials (AlGaAs) on Si substrate. This work is in line with the studies carried out by the GeePs and C2N laboratories (SEEDs team), which have demonstrated the epitaxial integration of perfectly relaxed GaAs microcrystals (μ -crystals) on Si(100) and Si(111) substrates. My work consisted more particularly in studying the residual doping in GaAs μ -crystals by exploring a way to control it and to extend this integration concept to AlGaAs. Thus, one of the objectives of this thesis was to decrease the unintentional P-type doping present in GaAs μ -crystals, by studying the effect of the variation of the V/III ratio, defined as the ratio of the gaseous precursors of As (TBAs) and Ga (TMGa). This P-type doping is caused by the unintentional incorporation of carbon atoms due to incomplete decomposition of the TMGa precursor during growth. The increase of the V/III ratio should reduce this incorporation

of C by increasing the production of hydrogen atoms, thus facilitating the complete decomposition of this molecule. To that end, we began by studying the evolution of the doping of GaAs/Si μ -crystals as a function of the V/III ratio using μ -photoluminescence (μ -PL) measurements. The first results seemed to indicate a decrease in the P-type doping of the μ -crystals. However, we observed that an optical trapping phenomenon, due to the micrometric size of the crystals, influenced the μ -PL measurements. In order to avoid this size effect, we carried out the study on GaAs homoepitaxy on GaAs(110) substrates. We chose this unusual substrate orientation in order to perform the homoepitaxy under growth conditions as close as possible to those of μ -crystal GaAs heteroepitaxy on Si. A study of μ -PL as a function of the measurement temperature on these homoepitaxies showed that increasing the V/III ratio (in the range studied), still led to a high dopant concentration (in the order of 10^{18} cm⁻³). In view of this work, we proposed an alternative approach to control the residual doping. I were also able to develop a technological process for studying the ohmicity of metal contacts with GaAs, prefiguring the top contact of the tandem cell. The laser lithography process was validated, and the first tests were carried out to study the ITO/GaAs contact. To this end, a measurement bench was updated and improved to study the evolution of the metallic contact with the resistance of GaAs with temperature. Another goal of this thesis was to extend this growth concept to the epitaxy of μ -crystals of AlGaAs on Si. The first results validate the proof of concept for the growth of AlGaAs on Si by this integration process, with Al compositions close to 18%, a concentration to be aimed at for the optimisation of an AlGaAs/Si tandem. These promising results allow this integration technique to pave the way for III-V/Si hybrid devices free of lattice parameter restrictions, and where silicon behaves as both a substrate and an active material.

Keywords : Residual Doping, Ratio V/III, Heteroepitaxy, Homoepitaxy, Micro-Photoluminescence, (Al)GaAs on Si

Guylian Molineaux

Géocasting sans fil basé sur la focalisation spatiale de données

Cette thèse étudie la focalisation spatiale de données (FSD) comme moyen d'effectuer la diffusion géolocalisée de données sans fil sur la couche physique, c'est-à-dire la multidiffusion basée sur la position ou la diffusion géographiquement limitée. Cette nouvelle approche peut aider à fournir des services et des messages basés sur la position à de grands groupes d'appareils mobiles qui existent dans les cadres émergents de l'internet des objets pour les villes intelligentes, les industries, les soins de santé, etc. Il permet de résoudre et d'éviter les problèmes de confidentialité qui existent dans les services de géodiffusion classiques, où les utilisateurs sont tenus de révéler leur position. En outre, il surmonte les exigences d'auto-localisation des nœuds et l'équilibre difficile entre la complexité, l'évolutivité et le taux de livraison qui existent dans les algorithmes de routage de géodiffusion de la couche réseau. Plus important encore, elle réussit à augmenter la précision, à réduire la taille du réseau d'antennes et à minimiser la complexité - les conditions les plus cruciales pour faire de la géodiffusion sur la couche physique un système attrayant - par rapport aux approches conventionnelles de focalisation de la puissance basées sur la formation de faisceaux. Dans le cadre du FSD, il remédie en outre à deux lacunes fondamentales. Il s'agit (i) d'une limitation à la focalisation dans le domaine angulaire uniquement ou, de manière équivalente, de l'incapacité de focaliser dans le domaine de la distance et (ii) d'une forte sensibilité à la propagation par trajets multiples qui compromet le fonctionnement correct en dehors des canaux hypothétiques de l'espace libre. Ces problèmes sont résolus par la conception de deux nouvelles architectures FSD qui exploitent les ressources de transmission multifréquence dans un cadre de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM) et de réseaux de fréquences diverses (frequency diverse array, FDA). En outre, une architecture SDF expérimentale a été mise au point pour démontrer sa faisabilité pratique en tant que nouvelle technique de géocasting.

Mots-Clés : Geocasting, Focalisation spatiale de données, OFDM, Tableau diversifié en fréquence

Spatial Data Focusing for High-Precision Wireless Geocasting : Theoretical System Design and Practical Proof of Concept

This thesis investigates spatial data focusing (SDF) as a means of performing wireless physical-layer geocasting, i.e. location-based multicasting or geographically-confined broadcasting. This novel approach can aid in providing location-based services and messaging to large groups of mobile devices that exist in emerging internet-of-things frameworks for smart cities, industries, healthcare, etc., providing users with information that is related or contextualized to their geographical location. It addresses and avoids privacy concerns that exist in conventional location-based services, where users are required to disclose their location. In addition, it overcomes node self-localization requirements and the challenging balance between overhead, scalability, and delivery rate that exist in network-layer geocast routing algorithms. Most importantly, it succeeds in increasing precision, reducing array size, and minimizing complexity - the most crucial conditions in making physical-layer geocasting an attractive scheme - compared to conventional beamforming-based power focusing approaches. Within the SDF framework, it additionally addresses two fundamental shortcomings. That is, (i) a limitation to focusing in the angular domain only or, equivalently, the inability for range-domain focusing and (ii) a severe sensitivity to multipath propagation that jeopardizes correct operation outside hypothetical free space channels. They are overcome by designing two novel SDF architectures that exploit multi-frequency transmission resources in an orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) and frequency diverse array (FDA) framework. Additionally, an experimental proof-of-concept SDF architecture is developed that demonstrates its practical achievability as a novel geocasting technique.

Keywords : Geocasting, Spatial Data Focusing, OFDM, Frequency Diverse Array

Koffi Ahanogbe

Optimisation de cellules solaires tandem à trois terminaux à base de pérovskites

Le concept de cellule solaire à haut rendement appelé « cellule tandem à trois terminaux » montre que l'on pourrait atteindre un rendement équivalent à celui des cellules tandem à quatre terminaux et meilleur que les tandem deux terminaux. Dans le but de concevoir de manière rapide une preuve de concept d'une cellule solaire tandem à trois-terminaux à barrière sélective (3T-SBOB) breveté au GeePs en 2017, à partir des techniques d'élaboration moins compliquées avec des coûts de production abordables, nous avons fabriqué et caractérisé des sous-cellules pérovskite et silicium constituant la cellule tandem 3T-SBOB. A partir des résultats de caractérisations électrique et optique d'une part, et des résultats de simulations d'autre part, nous avons identifié les verrous relatifs aux incompatibilités entre procédés et techniques de dépôt des couches sélectives nécessaires à l'intégration des sous-cellules dans une configuration tandem. Nous avons simulé grâce à l'outil d'aide à la conception « Atlas-Silvaco » les performances individuelles des sous-cellules, puis celles de la cellule tandem 3T-SBOB. Cette dernière a été optimisée et son rendement optimal porté à ~ 32%. Nous avons apporté ensuite, une solution innovante à la problématique d'interconnexion des cellules tandem 3T au sein des modules solaires, et pour laquelle il n'existe encore aucun modèle de réalisation industrialisable. L'architecture originale proposée est une architecture souple, pratique et robuste d'interconnexion de cellules tandem 3T complémentaires de polarités inversées dans un « bloc unité » à deux terminaux. Le bloc unité 2T résultant est un élément à deux terminaux dont l'intégration dans un module est très efficace et à perte très négligeable. Nous avons démontré qu'une optimisation du courant dans une branche du bloc unité permet, à partir de deux cellules tandem 3T complémentaires ayant chacune une efficacité comprise entre 32% et 33%, d'atteindre un rendement de ~ 32,6%. Cette méthode d'« interconnexion C3T » originale a fait l'objet d'un dépôt de brevet en 2022.

Mots-Clés : Générateurs photovoltaïques, Surfaces (technologie), Analyse Simulation numérique directe

Optimization of three-terminal tandem solar cells based on perovskites

A new high-efficiency solar cell concept called the "three-terminal tandem cell" can achieve an efficiency equivalent to four-terminal tandem cells and better than two-terminal tandem cells. To design a proof-of-concept of a Selective Band Offset Barrier three-terminal tandem solar cell (3T-SBOB) patented at GeePs in 2017, using less complicated manufacturing techniques with low production costs, we fabricated and characterized the perovskite and silicon subcells of the 3T-SBOB tandem cell. From the electrical and optical characterization results and the simulation results, we identified the incompatibilities between the process and deposition techniques of the selective layers used for the subcells integrating into a tandem configuration. We have simulated with the design tool "Atlas-Silvaco" the individual performances of the subcells, then those of the 3T-SBOB tandem cell. The tandem has been optimized, and its efficiency was improved to ~ 32%. In addition, we demonstrated an innovative solution to the problem of the interconnection of 3T tandem cells within solar modules, for which no industrialized model exists yet. The original architecture proposed is a flexible, functional, and robust architecture for interconnecting complementary 3T tandem cells of reversed polarity in a two-terminal "unit block." The resulting 2T unit block is a two terminal element that can be integrated into a module very efficiently and with negligible losses. We have demonstrated that by optimizing the current in the unit block, two complementary 3T tandem cells, each with an efficiency of 33%, can achieve an efficiency of ~ 32.6%. This novel "C3T interconnection" method will be patented in 2022.

Keywords : Numerical simulation, Characterization, High-Efficiency concept, Solar cell, Tandem three-Terminal, Interconnection

Kokouvi Etse

Optimisation d'un blindage électromagnétique composite métallique pour des applications basses fréquences : approches numériques et expérimentales

L'intégration croissante de l'électronique dans tous les secteurs d'activité génère des problèmes de compatibilité électromagnétique et soulève des préoccupations concernant l'impact sur la santé des êtres vivants exposés aux champs résultants. Ainsi, l'utilisation d'un blindage peut être nécessaire pour confiner les champs électromagnétiques rayonnés et/ou pour protéger un système sensible à ces champs. Cependant, la nécessité de développer des écrans de blindage légers et efficaces sur un large spectre de fréquences constitue un véritable défi. Les systèmes de blindage électromagnétiques contiennent souvent des métaux. Ces derniers possèdent une grande conductivité électrique ou une perméabilité magnétique élevée favorable au blindage. L'association de différents métaux par colaminage peut permettre d'obtenir un composite alliant les avantages d'un matériau magnétique, ayant une haute perméabilité pour un blindage efficace en basses fréquences, et un matériau conducteur électrique pour un blindage intéressant à plus hautes fréquences. De précédents travaux entre les 3 laboratoires impliqués dans ce projet ont montré qu'il est possible d'obtenir un écran bimétallique de quelques centaines de micromètres d'épaisseur par le colaminage de feuilles d'acier et d'aluminium. Cette solution permet de couvrir une gamme de fréquences de 0 à 100 kHz mais est peu efficace en basses fréquences. Par des approches numériques et expérimentales, cette nouvelle thèse étudie l'intérêt des multicouches associant l'aluminium et le cuivre à un alliage à grande perméabilité magnétique (mumétal) pour l'atténuation du champ magnétique du DC à plusieurs dizaines de kilohertz. Dans un premier temps, une approche de discrétisation de fines couches conductrices hétérogènes est proposée afin de limiter le coût des calculs numériques par la méthode des éléments finis. Ensuite, une étude numérique a permis d'évaluer l'impact du nombre de couches, de l'ordre de superposition des couches et de l'épaisseur de chaque couche sur l'efficacité d'un écran de blindage bimétallique. En se basant sur l'étude numérique, des matériaux multicouches optimisés constitués d'aluminium et de mumétal ont été élaborés par colaminage. L'impact de ce procédé de soudage à froid sur l'efficacité du composite laminé est analysé et des recuits ont ensuite été effectués. Enfin, les impacts des recuits sur la structure du composite métallique notamment sur l'adhérence des tôles et sur son efficacité de blindage sont étudiés. Les travaux expérimentaux ont permis de montrer que l'association de l'aluminium au mumétal peut permettre, à iso épaisseur, un gain de 78% en efficacité de blindage du bimétallique résultant par rapport au meilleur des deux métaux.

Mots-Clés : Blindage électromagnétique, Homogénéisation, Laminage, Composite métallique

Optimization of electromagnetic composite shield for low frequency applications: numerical and experimental approaches

Optimization of electromagnetic composite shield for low frequency applications: numerical and experimental approaches
Keywords : Cold roll bonding, magnetic shielding, multilayer shields
 Abstract : The constantly increasing number of electronic systems within the same electromagnetic environment poses a problem of electromagnetic compatibility and raises issue of the impact on the health of living being exposed to the radiated electromagnetic field. Therefore, the use of shielding may be necessary to confine radiated electromagnetic fields and/or to protect sensitive electronic systems to these fields. However, the need to develop lightweight and effective shields over a wide frequency range is a challenge. Electromagnetic shields often contain metals either because of their high electrical conductivity or because of their high magnetic permeability., which are favorable for electromagnetic field attenuation. Combining different metals through cold roll bonding can result in a laminated composite that combines the advantages of a magnetic material with high permeability for effective low-frequency shielding and a conductive material that provides effective shielding at higher frequencies. Previous work between the three laboratories involved in this project has shown that it is possible to obtain a bimetallic shield of a few hundred micrometers thick by cold rolling steel and aluminum sheets. This solution covers a frequency range from 0 to 100 kHz but is less effective at low frequencies. Through a numerical and experimental approaches, this new thesis study the benefits of multilayers combining aluminum and copper with a high magnetic permeability alloy (mu-metal) for attenuating the magnetic field over a wide frequency range, including low frequencies. First, a discretization approach of heterogeneous conductive thin layers is proposed to reduce the cost of numerical calculations using the finite element method. Then, a numerical study has been carried out to evaluate the impact of the number of layers, the order of layer superposition, and the thickness of each layer on the effectiveness of a bimetallic magnetic shield. Based on the numerical study, multilayer materials combining aluminum and mu-metal, or aluminum, copper, and mu-metal have been elaborated by cold roll bonding. The impact of this cold-welding process on the effectiveness of the laminated composite is analyzed, and thermal annealing processes were subsequently performed to improve their shielding effectiveness. Finally, the effects of annealing on the structure of the laminated composite, including sheet bonding strength and its shielding effectiveness, are revealed. Experimental work has shown that the combination of aluminum with mu-metal can result in a 78% improvement in shielding effectiveness compared to the best of the two materials having the same total thickness.

Keywords : Electromagnetic shielding, Homogeneization, Rolling, Composite material

Lingeshwaren Sobrayen

Le convertisseur résonnant LLC à pont hybride et sa mise en œuvre à fréquence élevée, de l'ordre du MHz

Cette étude porte sur un convertisseur continu-continu : 400 V en entrée et 18 à 36 V en sortie pour une puissance nominale de 1 kW, qui servira comme la cellule de base d'un futur chargeur de batterie industriel adaptable en tension. S'alignant avec la transition actuelle des composants classiques en silicium vers des composants à grand gap, les transistors en nitrure de gallium (GaN) sont envisagés pour viser des fréquences de découpages élevés et gagner en compacité du convertisseur. L'étage de puissance est réalisé par une structure récemment parue - le LLC résonnant à pont hybride qui répond efficacement à la problématique des larges plages de tensions avec peu de composants supplémentaires et une commande simple. En effet le pilotage par modulation de largeur d'impulsion (MLI) à fréquence fixe associé aux caractéristiques de commutations douces de la résonance, rendent ce convertisseur attrayant pour la haute fréquence tout en permettant l'optimisation des dimensions de ses composants magnétiques et filtres. Des études à des fréquences usuelles (autour de 100 kHz) sont d'abord réalisées sur ce nouveau convertisseur, utiles à d'autres applications avec des plages de tensions étendues. Un modèle unifié dans le domaine temporel a été développé pour comparer les performances du convertisseur à d'autres convertisseurs de la même « famille » LLC pouvant eux aussi opérer à fréquence fixe. Une stratégie de modulation à deux paramètres a été introduite pour réduire les courants de circulation ; cette modulation est particulièrement intéressante dans les applications à faible tension et fort courant. Le convertisseur a été modélisé en régime dynamique par la méthode des « Extended Describing Functions ». Une méthodologie de conception optimale a également été proposée, fournissant un outil automatisé plus efficace pour aborder le dimensionnement du convertisseur. Partant d'une meilleure maîtrise de la structure, la problématique de la fréquence élevée est ensuite abordée. Un modèle plus pertinent dans le domaine temporel a été proposé : la dynamique des temps morts n'est plus ignorée et les limites de commutation ZVS sont précisées. Outre son utilité pour la conception, ce modèle permet des estimations plus précises des pertes associées aux blocages et aux durées de conduction inverse des interrupteurs GaN, de sorte que les pénalités de fonctionnement à fréquence élevée peuvent être évaluées. L'influence de la fréquence sur la compacité du transformateur a été analysée. Il s'agissait de minimiser les pertes dans les enroulements tout en minimisant la capacité parasite entre enroulements. Un prototype de convertisseur mettant en œuvre ce transformateur et des transistors GaN a été construit et testé à 1 kW/1 MHz.

Mots-Clés : Llc, Plage étendue, Courant élevé, Fréquence élevée, GaN, HEMTs, Transformateur planar

The hybrid-bridge LLC resonant converter and its application to MHz-level operation

A 1-kW, 400-V input and 18-36V output dc-dc converter is developed as the basic cell of a future voltage-adaptable industrial battery charger. Aligned with the current paradigm shift from tradition silicon to wide-bandgap devices, gallium nitride high electron mobility transistors (GaN HEMTs) are used for high switching frequency and converter compactness objectives. The power stage is realized by the recently proposed hybrid-bridge LLC resonant topology, which can effectively address wide-range converter concerns with low component surplus and minimal control complexity. Fixed-frequency PWM control combined with soft-switching resonant characteristics makes the converter particularly attractive to work at high switching frequencies while allowing its magnetic components and filters to be optimally sized. Studies at conventional switching frequencies (100 kHz) are first carried out on the hybrid-bridge LLC resonant converter, relevant to other mainstream wide-range applications. A unified time-domain model is developed to compare the performance of the converter against other similar fixed-frequency LLC-type converters. A two-parameter modulation strategy is introduced for reducing circulating currents, of particular interest in low voltage/high current applications. The dynamic modeling of the converter is explored based on extended describing functions. An optimal design methodology is also proposed, providing a more effective automated design tool than conventionally-used parameter sweeps. A more thorough comprehension of this new topology, enables high frequency targets to be then pursued. An improved time-domain model is developed where deadtime dynamics are considered, from which more accurate ZVS limits and estimates of semiconductors frequency-related losses are inferred. The scope for size reduction of the power transformer with frequency rise, is analyzed. A planar transformer with low ac resistance and low parasitic capacitance is realized, and extended to various construction variants. A GaN prototype of the converter is built and tested at 1 MHz, identified as the optimal switching frequency of the converter.

Keywords : Llc, Wide-Range, High current, High frequency, GaN, HEMTs, Planar transformer

Lucas Pniak

Vers une modélisation électromagnétique exhaustive et rapide du transformateur planaire par le principe de moindre action. Application à la conception d'un convertisseur isolé modulaire répondant aux contraintes aéronautiques

L'électrification des avions définit les nouvelles exigences imposées à l'électronique de puissance moderne. Augmenter la densité de puissance, le rendement, et la fiabilité des convertisseurs, tout en faisant face à des contraintes spécifiques, faibles pressions, haute température, normes, est une priorité pour l'industrie aéronautique. Le développement de nouvelles technologies de semi-conducteurs à grand gap (SiC et GaN) répond à ces besoins d'intégration et permet d'envisager l'augmentation des fréquences de découpage des convertisseurs de la centaine de kilohertz au mégahertz. Cette évolution a des conséquences sur les composants magnétiques qui subissent d'autant plus les effets de peau et de proximité dans leurs enroulements, les couplages capacitifs parasites entre spires et les courants de Foucault dans leur noyau magnétique. Ce manuscrit explore la modélisation électromagnétique analytique des transformateurs planaires, technologie bénéficiant de nombreux avantages : bonnes caractéristiques thermiques, haute densité de puissance, facilité, reproductibilité et faible coût de fabrication et éléments parasites prédictibles. L'objectif de ces travaux est de fournir au concepteur un outil et une méthode lui permettant d'estimer rapidement l'ensemble des paramètres électriques macroscopiques nécessaires au dimensionnement d'un tel composant, résistance AC, inductance de fuite, fréquences de résonance dues aux couplages capacitifs parasites et impédance en mode commun, et cela uniquement à partir de ses dimensions géométriques et des propriétés des matériaux. L'approche lagrangienne employée offre un formalisme mathématique puissant dont la complexité est à la hauteur de la difficulté du problème traité.

Mots-Clés : Transformateur planaire, Modélisation électromagnétique analytique, Euler-Lagrange, Convertisseur DC/DC isolés modulaires, Dual Active Bridge, Transistors GaN

Towards an exhaustive and fast electromagnetic modeling of planar transformers using the principle of least action

The electrification of aircraft defines new requirements for modern power electronics. Increasing power density, efficiency and reliability of converters, while facing specific constraints, low pressure, high temperature, standards, is a priority for the aircraft industry. The development of new wide band gap semiconductor technologies (SiC and GaN) responds to these integration needs and allows the increase of converter switching frequencies from a hundred kilohertz to megahertz. This evolution affects the magnetic components which are even more affected by skin and proximity effects in their windings, parasitic capacitive couplings between turns and eddy currents in their magnetic cores. This manuscript explores the analytical electromagnetic modeling of planar transformers, a technology with many advantages: good thermal characteristics, high power density, ease, reproducibility and low cost of fabrication and predictable and controllable parasitics. The purpose of this work is to provide the designer with a tool and a method allowing him to quickly estimate all the macroscopic electrical parameters necessary for the sizing of such a component, AC resistance, leakage inductance, resonance frequencies due to parasitic capacitive couplings and common mode impedance, only from its geometric dimensions and material properties. The Lagrangian approach used offers a powerful mathematical formalism whose complexity matches the difficulty of the addressed problem.

Keywords : Planar transformer, Analytical electromagnetic modeling, Euler-Lagrange, Modular isolated DC/DC converters, Dual Active Bridge, GaN transistors

Mattia da Lisca

Microscopies à sonde locale pour l'étude de matériaux et structures pour le photovoltaïque

La microscopie à sonde de Kelvin (KPFM) et la technique AFM à pointe conductrice (c-AFM) ont été étudiées pour la caractérisation des matériaux et des dispositifs photovoltaïques, en accordant une attention particulière aux analyses en coupe transversale. Dans cette thèse, nous présentons les résultats obtenus sur diverses structures développées à l'IPVF et dans les laboratoires partenaires: des structures multicouches et cellules solaires à base de III-V, des cellules solaires en pérovskite à différents stades de traitement, des cellules solaires en CZTGS et en CIS, ainsi que des hétérojonctions au silicium. Parmi les technologies PV existantes, les dispositifs solaires à base de III-V font partie de la technologie photovoltaïque des films minces. En conséquence, la démonstration expérimentale de la sensibilité de la technique KPFM aux couches plus minces peut jouer un rôle crucial dans l'investigation et la compréhension des propriétés de surface locales. En particulier, nous avons examiné une structure multicouche InP:S/InP:Fe ainsi qu'une structure multicouche InP:Zn/GaInAs:Zn comportant des couches de largeurs et de concentrations de dopage différentes. Pour cette analyse, nous avons défini différents objectifs: le premier était l'évaluation de la résolution spatiale de notre configuration KPFM dans des conditions ambiantes. Le deuxième était une compréhension complète des résultats de VCPD combinée à une description des principaux facteurs qui affectent les mesures KPFM avec l'application de la modélisation numérique de la sonde Kelvin. Une évaluation quantitative de la distribution des concentrations de défauts de surface a été proposée pour expliquer les résultats expérimentaux de VCPD. L'analyse C-AFM et KPFM a ensuite été poursuivie sur une structure multicouche et cellule solaire hétérojonction AlGaAs:Be/GaInP:Si. L'analyse C-AFM s'est avérée être une méthode fiable pour mesurer la résistance locale le long d'une structure multicouche, permettant ainsi l'identification de différentes couches. Une analyse approfondie a été effectuée pour élucider la nature du contact électrique entre la pointe de l'AFM et la surface de l'échantillon, qui s'est révélé être un contact de Schottky. Par conséquent, une barrière de potentiel sera toujours présente à l'interface pointe/échantillon, ce qui peut entraver la collecte de charges et affecter la résistance locale mesurée. KPFM a été utilisée pour fournir une preuve expérimentale de la performance PV insatisfaisante du dispositif CZTGS sous éclairage. En particulier, KPFM a révélé la présence d'une couche épaisse de MoS₂ qui agissait comme une barrière à une collecte efficace des porteurs de charge positifs. La KPFM a également été réalisée pour évaluer la variation du potentiel de surface à travers une hétérojonction n-cSi/i-aSi:H/p- μ cSiO_x. Une attention particulière a été consacrée à élucider la méthodologie permettant d'identifier le véritable bord de l'échantillon tout en atténuant la présence d'un artefact distinct en forme de V, susceptible de gêner et de fausser une interprétation précise des données. KPFM a été utilisée pour la caractérisation d'une cellule solaire CIS. L'analyse SPV a permis de déterminer la VOC de l'échantillon, ce qui aurait été difficile à estimer en utilisant des techniques conventionnelles en raison de la haute résistivité de la couche CIS due à l'oxydation. La technique KPFM a été efficacement utilisée pour évaluer le changement potentiel de FTO résultant de l'incorporation de couches de SnO₂ et de SnO₂/NaF. Les résultats ont montré une augmentation du potentiel de surface, signifiant une diminution de la fonction de travail induite par ces couches supplémentaires. Dans une expérience similaire, il a également été démontré qu'une fine couche d'Al₂O₃ est également capable de réduire la fonction de travail de la couche de SnO₂. Ces méthodes pourraient être utilisées pour améliorer la collecte d'électrons dans les dispositifs à base de pérovskite.

Mots-Clés : Photovoltaïque, Kpfm, Interfaces, Microscopie à sonde de Kelvin, Microscopie à force atomique à pointe conductrice, Section transversale

Local probe microscopies for the study of photovoltaic materials and structures

Kelvin probe force microscopy (KPFM) and conductive-AFM (c-AFM) techniques have been investigated for the characterization of PV materials and devices, with particular attention for cross-section analyses. In this thesis we present results on a variety of structures developed at IPVF and partner laboratories: III-V-based multilayer structures and finalized solar cells, half and fully processed perovskite solar cells, CZTGS and CIS solar cells and Silicon heterojunctions have been studied. Among the existing PV technologies, III-V-based solar devices belong to the PV technology of thin and ultra-thin films in which layers with widths of the order of a few nm are often integrated for an optimal surface passivation or for better carrier extraction, considerably enhancing device efficiency. Consequently, the experimental demonstration of the sensitivity of the KPFM technique to the narrower layers can play a crucial role in the investigation and comprehension of the local surface properties and charge transport mechanisms at the interfaces. In particular, we have investigated an InP:S/InP:Fe and an InP:Zn/GaInAs(P):Zn multilayer structure with layers of different widths and doping concentrations. For this analysis we have set different objectives: the first objective was the evaluation of the spatial resolution of our KPFM setup in ambient conditions. The second objective was a full understanding of the VCPD results combined with a description of the principal factors that affect KPFM measurements with the application of Kelvin Probe (KP) numerical modelling. A quantitative evaluation of the distribution of surface defects concentrations was proposed to explain the experimental VCPD results. C-AFM and KPFM analysis was then continued

on a p-AlGaAs:Be/n-GaInP:Si heterojunction multilayer structure and finalized solar cell. C-AFM analysis proved to be a reliable method for measuring the local resistance along a III-V based multilayer structure, enabling the identification of various layers and regions with different doping type. Nonetheless, a thorough analysis was performed to elucidate the true nature of the electrical contact between the AFM tip and the surface of the sample which resulted to be a Schottky contact. Therefore, a potential barrier will be always present at the tip/sample interface which can hinder (or facilitates) the collection of charges and in turn affect the local measured resistance. Furthermore, cross-sectional KPFM was used to offer experimental evidence of the unsatisfactory PV performance of the CZTGS device under illumination. In particular, KPFM revealed the presence of a bulky MoS₂ layer which acted as a barrier for an efficient collections of positive charge carriers. Cross-sectional KPFM was also performed to evaluate the surface potential variation across a n-cSi/i-aSi:H/p- μ cSiOx heterojunction. Special attention was dedicated to elucidating the methodology for identifying the real physical edge of the specimen while mitigating the presence of a distinctive V-shaped artifact, which has the potential to impede and mislead accurate data interpretation. In addition, KPFM was used an effective tool for the characterization of an unfinalized Mo-detached CIS solar cell. Specifically, SPV analysis allowed to determine the VOC of the sample, which would have been challenging to estimate using conventional techniques due to the high resistivity of the CIS layer due to oxidation. KPFM technique was effectively employed to assess the potential change of FTO resulting from the incorporation of SnO₂ and SnO₂/NaF layers. The findings unambiguously demonstrated an increase in surface potential, signifying a decrease in work function induced by these additional layers. In a similar experiment, it was also demonstrated that a thin layer of Al₂O₃ is also capable of reducing the WF of the SnO₂ layer. These methods could be used for improving electrons collection in perovskite-based devices.

Keywords : Photovoltaics, Kpfm, Interfaces, Kelvin probe force microscopy, Conductive-AFM, Cross- section

Mohammad Saif Khan

Système de mesure étalon pour la mesure traçable au SI des impulsions haute tension jusqu'à 500 kV dans le domaine nanoseconde et sub-nanoseconde

Le travail de cette thèse de doctorat est dédié au développement d'un système de mesure étalon pour assurer la traçabilité SI des hautes puissances pulsées dans le domaine nanoseconde et subnanosecond (HPPNS). Cette traçabilité est nécessaire pour les mesures exactes et précises des formes d'onde de tension qui constituent l'élément clé des systèmes basés sur la haute puissance pulsée. Un système d'étalonnage a été développé pour la caractérisation d'impulsions haute tension d'amplitudes jusqu'à 500 kV avec des temps de montée aussi faibles que quelques centaines de picosecondes. Le système de mesure HPPNS développé est divisé en quatre composants : le diviseur de tension, la charge de terminaison, les connecteurs haute tension et les cônes de transition. Le diviseur de tension est le composant central de ce système de mesure car il permet l'analyse des formes d'onde HPPNS à travers un oscilloscope calibré en abaissant les amplitudes de tension des formes d'onde HPPNS à des niveaux adéquats qui peuvent être mesurés à travers un oscilloscope sans déformation de forme d'onde. Le diviseur de tension conçu par calculs analytiques et numériques a une valeur élevée du rapport de division qui est relativement constante en fonction de la fréquence jusqu'à au moins 2 GHz, ainsi que des réponses de phase linéaires. Cependant, ses performances en termes de mesure exacte et précise des formes d'onde HPPNS incidentes dépendent également des caractéristiques de la charge de terminaison de ligne de transmission puisque les réflexions d'une charge de terminaison de ligne insuffisamment adaptée pourraient conduire à une mauvaise interprétation de la forme d'onde mesurée à la sortie du diviseur. Une charge de terminaison de ligne de 50 Ω est développée et caractérisée. Elle possède des propriétés d'isolation élevées pour des amplitudes de tension jusqu'à 500 kV et un coefficient de réflexion maximum de -27 dB en fonction de la fréquences jusqu'à 2 GHz. La caractérisation du système de mesure HPPNS complet a été réalisée en deux étapes. Premièrement, le système de mesure HPPNS a été caractérisé à de faibles niveaux de puissance d'entrée par deux méthodes différentes, à savoir la caractérisation au VNA et la caractérisation par une méthode de mesure d'atténuation haute fréquence traçable au SI. Les résultats obtenus à partir de ces deux méthodes ont été comparés aux résultats de la modélisation CST et tous ces résultats se sont avérés en bon accord les uns avec les autres. Ces caractérisations ont démontré que le système de mesure HPPNS développé possède un rapport de division élevé d'environ 85 dB, une bande passante de 2 GHz et une réponse de phase linéaire. De plus, un atténuateur commercial ayant une bande passante de 7 GHz a été ajouté en sortie du diviseur et tout ce système a été re-caractérisé par les deux méthodes basse puissance. Les résultats obtenus sont les suivants : près de 110 dB de rapport de division, une bande passante de 2 GHz et une réponse de phase linéaire. Dans la deuxième étape de caractérisation, ce système a été testé à des niveaux de puissance élevés via un générateur de Max. Différentes formes d'onde haute tension de pics de tension aussi élevés que 300 kV et de temps de montée aussi bas que 420 picosecondes ont été mesurés avec succès grâce à ce système et un budget d'incertitude a été établi. Les incertitudes de mesure pour ces mesures à haute tension ont été calculées à 3,4 % pour les pics de tension et à 87 picosecondes pour les paramètres temporels.

Mots-Clés : Haute puissance pulsée, Étalon de mesure, Diviseur de tension, Étalonnage, Incertitude de mesure

Standard measurement system for SI traceable measurement of high voltage pulses up to 500 kV in the nanosecond and sub-nanosecond range

The work of this PhD thesis is dedicated to developing a standard measurement system to ensure the SI traceability of high pulsed power in the nanosecond and subnanosecond domain (HPPNS). This traceability is mandatory for the accurate and precise measurements of the voltage waveforms which constitutes the key element of systems based on high pulsed power. A calibration system has been developed for the characterization of high voltage pulses of amplitudes up to 500 kV with rise times as low as few hundreds of picoseconds. The developed HPPNS measurement system is divided into four components: The voltage divider, the termination load, the high-voltage connectors, and the transition cones. The voltage divider is the central component of this measurement system as it permits the analysis of HPPNS waveforms through a calibrated oscilloscope by lowering the voltage amplitudes of the HPPNS waveforms to adequate levels which could be measured through an oscilloscope and without waveform deformation. Some voltage dividers of the scientific literature are discussed and compared. The voltage divider designed through analytical and numerical calculations has a high value of the division ratio which is relatively constant as a function of frequency up to at least 2 GHz, together with a linear phase response. However, its performances in terms of measuring accurately and precisely the incident HPPNS waveforms depend also on the characteristics of the transmission line termination load since the reflections from an inadequately matched line termination load could lead to the misunderstanding of the measured waveform at the output of the divider. A 50 Ω line termination load is developed and characterized. It has high insulation properties for voltage amplitudes up to 500 kV and a maximum reflection coefficient of -27 dB as a

function of frequencies up to 2 GHz. The characterization of the complete HPPNS measurement system was carried out in two steps. Firstly, the HPPNS measurement system was characterized at low levels of input power by two different methods, namely, VNA characterization and characterization through a SI traceable high frequency attenuation measurement method. The results obtained from these two methods were compared to the CST modelling results and all of these results were found to be in good agreement with each other. These characterizations demonstrated that the developed HPPNS measurement system possesses a high division ratio of around 85 dB, a bandwidth of 2 GHz, and a linear phase response. Furthermore, a 7 GHz bandwidth commercial attenuator was added at the output of the divider and this whole system was re-characterized by both low power methods. The results obtained are as follows: almost 110 dB of division ratio, a bandwidth of 2 GHz and a linear phase response. In the second characterization step, this system was tested at high power levels through a Max generator. Different high voltage waveforms of voltage peaks as high as 300 kV and rise times as low as 420 picoseconds were successfully measured through this system and an uncertainty budget is drafted. The measurement uncertainties for these high voltage measurements were calculated to be 3.4 % for the voltage peaks and 87 picoseconds for the temporal parameters.

Keywords : High pulsed power, Measurement standard, Voltage divider, Calibration, Measurement uncertainty

Mohsen Dini

Apprentissage automatique appliqué à la gestion d'énergie dans un micro-réseau

Pour faire face aux problèmes liés au réchauffement climatique la part des énergies renouvelables doit être significativement augmentée. Dans ce contexte, les micro-réseaux électriques équipés de PV à l'échelle de bâtiments (building microgrid BMG) représentent un chemin prometteur. La gestion efficace des micro-réseaux et la réduction des coûts opérationnels présentent des défis, notamment en raison de la nature intermittente des sources d'énergie renouvelable, des limitations de stockage et des incertitudes liées à la production d'énergie renouvelable et à la demande d'énergie liée aux activités humaines. Par conséquent, un système fiable de gestion de l'énergie domestique (home energy management system - HEMS) doté de stratégies de prise de décision efficaces devient impératif pour faire face à ces complexités. Ce travail de recherche s'intéresse à la gestion d'un micro-réseau à l'échelle d'un bâtiment, en mettant spécifiquement l'accent sur les opérations en temps réel. La méthodologie principale utilisée dans cette étude est l'apprentissage par renforcement profond (DRL). Contrairement aux méthodes d'optimisation traditionnelles, l'apprentissage par renforcement ne nécessite pas de prévisions parfaites de la consommation et de la production, qui sont souvent indisponibles dans des conditions réelles. De plus, par rapport à d'autres approches d'apprentissage machine, l'apprentissage par renforcement offre des avantages tels que la non-nécessité de vastes ensembles de données étiquetées. L'objectif de l'apprentissage par renforcement est que l'agent explore l'espace état/action du système et développe des séquences d'actions optimales pour différents états. Cette thèse vise à concevoir un cadre de processus décisionnel de Markov pour modéliser un micro-réseau de bâtiment et à développer un système complet de gestion de l'énergie domestique (HEMS) qui contrôle à la fois l'unité de batterie et les charges thermiques (eau chaude sanitaire et système de chauffage) au sein d'un BMG. Ce HEMS sera formé en utilisant une approche de DRL pour maximiser les économies d'énergie et réduire les émissions de carbone, en tenant compte des prix variables de l'électricité, de la demande de charge et des incertitudes liées à la génération d'énergie renouvelable. Par conséquent, notre étude commence par la construction d'un HEMS dans un environnement simplifié, en se concentrant initialement sur la gestion de l'unité de batterie seule, en mettant l'accent sur l'apprentissage par Q-learning, un algorithme de RL fondamental mais limité à des états et des actions discrets. Ensuite, un algorithme plus avancé, le DQN (deep Q-network) et quelques variantes de cet algorithme comme DDQN et DDQN+PER, sont déployés pour gérer les états continus. Dans la deuxième étape, notre objectif principal est de former le HEMS à gérer exclusivement les charges thermiques, en tenant compte des modèles thermodynamiques de la chaudière et de la maison. La phase finale implique l'apprentissage d'un HEMS pour contrôler à la fois l'unité de batterie et les charges thermiques. Tout au long de cette étude, nous abordons des défis tels que l'évaluation de l'impact de l'initialisation de l'algorithme de la Q-table de l'algorithme de Q-learning grâce à des connaissances préalables. Nous utilisons également une approche par essais-erreurs pour déterminer les hyper paramètres optimaux de l'algorithme DQN. De nombreuses expériences numériques et des résultats de simulation démontrent que l'agent peut acquérir des stratégies efficaces grâce à des interactions avec son environnement. Dans le premier cas d'utilisation, l'algorithme DDQN+PER présente des performances supérieures lors des phases d'apprentissage et de test par rapport à d'autres algorithmes RL. De plus, il est évident que ce HEMS fait preuve de robustesse à travers différentes saisons et surpasse une méthode basée sur des règles quasi-optimales.

Mots-Clés : Micro-Réseau, Système de gestion d'énergie, Apprentissage par renforcement profond, Algorithme DQN, Energie renouvelable

Supervision a building microgrid by machine learning approaches

The share of renewable energy resources, such as PV production, must be significantly increased to achieve environmental goals and address global warming concerns. In this context, Building Microgrids (BMGs) represent a promising avenue. However, deploying energy storage units and solar panels entails substantial investments. Therefore, optimizing the utilization of existing PV panels and Energy Storage Systems (ESS) is crucial to enhance BMGs' self-consumption rates and reduce local production costs compared to dependence on the main grid. Efficiently managing BMGs and reducing operational costs present challenges, including the intermittent nature of Renewable Energy Sources (RESs), storage limitations, and uncertainties related to renewable energy production and energy demand tied to human activities. Therefore, a reliable home energy management system (HEMS) with effective decision-making strategies becomes crucial to address these complexities. This research delves into advanced HEMS within building microgrid environments, specifically emphasizing real-time operations. The principal methodology employed in this study is deep reinforcement learning (DRL), a contemporary machine learning approach that learns by interacting with the system. Reinforcement learning approaches (RL) have demonstrated their effectiveness in solving complex decision-making problems across various domains. Unlike traditional optimization methods, RL for optimal strategies does not necessitate perfect forecasts of consumption and production, which are often unavailable in real-world conditions. Furthermore, compared to other machine learning approaches, reinforcement learning

offers advantages such as not requiring extensive labeled datasets, reducing bias from labeled data, and enabling exploration of novel task-solving approaches. RL can transcend simple input-output tasks and propose innovative methods to achieve goals. The training objective in RL is for the agent to explore the state/action space and develop sequences of optimal actions for various states. This doctoral thesis aims to design a Markov decision process framework to model BMGs and develop a comprehensive Home Energy Management System (HEMS) that controls both the battery unit and thermal loads (hot water boiler and heating system) within a BMG. This HEMS will be trained using RL to maximize energy savings and reduce carbon emissions, accounting for variable electricity prices, load demand, and uncertainties in renewable energy generation. Consequently, our study begins by constructing a HEMS in a simplified environment, initially focusing on managing the battery unit alone, emphasizing Q-learning, a fundamental RL algorithm. Subsequently, a more advanced algorithm, Deep Q-Network (DQN), and some variants like DDQN and DDQN+PER are deployed to handle continuous states. In the second step, our primary objective is to train the HEMS to manage thermal loads exclusively, considering the boiler's and house's thermal dynamic models. The final phase involves training a HEMS to control the battery unit and thermal loads. Throughout this study, we address challenges such as evaluating the impact of initializing the Q-table algorithm with prior knowledge. We also employ trial and error approaches to determine optimal hyperparameters for DQN training. Numerous numerical experiments and simulation results demonstrate that the agent can acquire effective strategies through interactions with its environment. In the first use case, the DDQN+PER algorithm exhibits superior performance during the learning and testing phases compared to other DRL algorithms. Additionally, it is evident that this EMS shows robustness across different seasons and outperforms a near-optimal rule-based method.

Keywords : Microgrid, Home energy management system, Deep reinforcement learning, DQN algorithm, Renewable energy

Pakédam Lare

Méthodologie de modélisation et de détection des défauts de court-circuit inter-spores d'un Moteur Synchrone Réductant Assisté par Aimant Permanent dans les véhicules électriques

L'essor des véhicules électrifiés (VE) dans le transport routier a accru les préoccupations concernant la fiabilité et la sécurité. Par conséquent, il existe une demande impérieuse de stratégies de détection précoce des défauts dans le groupe motopropulseur électrique (GMPE), crucial pour l'exploitation des véhicules électriques. Cette thèse propose une méthodologie de détection de défauts basée sur les données utilisant exclusivement les signaux de courant statoriques du moteur. Dans notre étude, nous avons généré un ensemble de données synthétiques en simulant un moteur à réductance synchrone assisté par aimant permanent (MSRAP) dans diverses conditions de fonctionnement et entraînements en boucle fermée. Pour obtenir la précision nécessaire à la modélisation des défauts du moteur et la vitesse de calcul requise par les contrôleurs en boucle fermée, nous avons développé un modèle hybride combinant la méthode analytiques et le modèle éléments finis pour représenter le comportement du moteur. Ce modèle a été validé expérimentalement avec une précision de plus de 70%. Dans la phase préliminaire de détection de défaut, nous avons sélectionné l'écart absolu médian (MAD), le Skewness et le Kurtosis calculés sur des fenêtres glissantes pour extraire les caractéristiques pertinentes de notre ensemble de données. Pour détecter les défauts dans les différentes conditions de fonctionnement du système, nous avons proposé une extension de l'ACP basée sur la projection d'attributs de nuisance (NAP). Cette approche nous a permis d'atténuer la non-linéarité des données liée à la variation de charge, permettant ainsi la mise en oeuvre d'une détection de défauts insensible aux variations de charge. Suite à une évaluation des performances de détection des défauts, nous avons sélectionné le T^2 de Hotelling comme mesure de surveillance fiable pour la détection des défauts de court-circuit inter-spores par l'ACP. Pour estimer la sévérité du défaut, nous avons développé un modèle analytique de la pente de la fonction de décision CUSUM de T^2 . À partir de ce modèle analytique, nous avons pu estimer le défaut dans des données sans bruit avec une précision supérieure à 99%. L'évaluation de la robustesse de notre méthode d'estimation de défaut au bruit a révélé sa robustesse à des niveaux de bruit allant jusqu'à $SNR = 30\text{dB}$. En conclusion, nous avons discuté des limites inhérentes à notre approche et formulé des suggestions de recherches futures pour les surmonter.

Mots-Clés : Détection de défaut, Machine Synchro-Réductant Assistée d'Aimants Permanents (MSRAP), Suivi d'état de santé, Maintenance prédictive, Traitement de l'information

Methodology for Modeling and Detection of inter-turn short-circuit faults of a Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor in Electric vehicles

The advent of Electrified Vehicles (EV) in road transportation raises various concerns regarding reliability and safety. Hence, there is a demand for strategies for faults detection at their early stages in the electric powertrain (EPT) that is the heart of EV operations. This thesis has proposed a fault detection methodology intended for predictive maintenance for synchronous electrical machines used in the EPT. We have proposed a data-driven approach that relies exclusively on processing motor stator phase current signals for fault detection. In our study, we generated a synthetic dataset by simulating of a permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMaSynRM) under various operating conditions and closed-loop drives. To get the accuracy needed to model motor faults and the computation speed required by the closed-loop controllers, we developed a hybrid model combining analytical and finite element methods to represent motor behavior. This model has been validated experimentally with an accuracy of more than 70%. In a preliminary fault detection stage, we selected the sliding windows median absolute deviation (MAD), variance, and kurtosis to extract relevant features from our dataset. To detect faults in the system's varying operation conditions, we have proposed an extension of the PCA based on Nuisance Attribute Projection (NAP). This approach allowed us to mitigate the non-linearity of the data caused by load variation, thus allowing the implementation of fault detection insensitive to load variations. Following an evaluation of the fault detection performance, we used Hotelling's T^2 as a reliable monitoring metric for inter-turn fault detection with the PCA method. To estimate the fault severity, we developed an analytical model of the slope of the CUSUM decision function of T^2 . From this analytical model, we could estimate the fault in noise-free data with an accuracy exceeding 99%. The evaluation of the robustness of our fault estimation method to the noise interference has revealed its robustness to noise levels up to $SNR = 30\text{dB}$. In conclusion, we have discussed the inherent limitations in our approach and made suggestions for future research to overcome them.

Keywords : Fault detection, Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Machine (PMaSynRM), Condition monitoring, Predictive maintenance, Information processing

Paul Lagouanelle

Metamodel-based methodology for fast prediction of human exposure due to high power systems

Les systèmes de transfert de puissance inductifs (WPT) représentent un atout majeur dans la course au développement des véhicules électriques. Un tel système en fonctionnement génère des niveaux de champs magnétiques importants susceptibles d'être dangereux pour les humains à proximité. Ainsi, lors du dimensionnement de nouveaux systèmes WPT, l'exposition des personnes doit être quantifiée en adéquation avec les standards et normes existantes. Les travaux présentés ici démontrent l'utilisation de méthodes stochastiques non-intrusives pour construire des prédicteurs de modèles numériques complexes (à coûts de calcul élevés). Le prédicteur est un métamodèle, une simple fonction analytique à bas coût de calcul qui peut être utilisé à la place du modèle réel pour calculer des analyses de sensibilités ou optimiser le système. Partant d'observations sur des métamodèles simples de systèmes WPT, un algorithme d'apprentissage itératif a été développé afin de construire un estimateur précis de la sortie d'un modèle complexe de WPT à bas coût de calcul. L'utilisation de cet algorithme a été validé sur divers cas: estimation d'inductance mutuelle pour système WPT dynamique, dimensionnement de ferrites par optimisation... Enfin, en couplant cet algorithme à des modèles 3D de corps humain, une méthodologie a été développée pour une analyse dosimétrique à bas coût de l'exposition des personnes à un système WPT (modélisation et expérience). Cette méthodologie a été étendue avec succès à un système générant des impulsions magnétiques, un pistolet de soudure moyenne fréquence, un système industriel plus complexe à étudier.

Mots-Clés : Métamodélisation, Exposition des personnes, Compatibilité électromagnétique

Métamodélisation pour le calcul rapide d'exposition des personnes aux systèmes haute puissance

Wireless power transfer systems (WPT) are a key factor in the development of electric mobility. Such high power systems create a high level of magnetic field in the vicinity area, which can be dangerous for operators or bystanders. Thus, when designing new WPT systems, the human exposure needs to be properly assessed in order to be compliant with the current standards and guidelines. The work presented here used non-intrusive stochastic tools to build a consistent predictor of complex computational models. The resulting predictor is a metamodel which is simply an analytical function that can be used afterwards to perform fast computation on the outputs of the real model such as Sobol'-based sensitivity analysis or optimization. Based on initial observations on basic metamodels for both simplified and realistic WPT systems, an active learning metamodeling algorithm has been developed to build consistent predictor and perform accurate sensitivity analysis at a low computation cost. The algorithm has been validated for the evaluation of mutual inductance in the case of dynamic charging. Consistent predictors have been computed for a realistic WPT computational model which have been used to optimize its design of 3F3 ferrite cores (position and dimension). Finally, a dosimetric methodology for assessing the safety of WPT systems at a low computation cost, using the adaptive algorithm coupled with a voxelized 3D human model, has been developed. Safety areas for a simulated WPT system and a practical system available at the GeePs have been computed. The methodology has been applied to a system needier of human exposure assessment: mid-frequency direct current welding guns, treating the case of exposure to a pulsed magnetic field.

Keywords : Metamodel, Human exposure, Electromagnetic compatibility

Rania Shahbaz

Conception et réalisation d'un biocapteur microondes miniaturisé pour une exploration fonctionnelle des tissus biologiques athéromateux

Les indications chirurgicales de l'endartériectomie carotidienne sont devenues ambiguës ces dernières années en raison des progrès de la thérapie médicale optimale des maladies vasculaires athérosclérotiques. Il est donc crucial de développer de nouvelles méthodes non invasives pour évaluer la vulnérabilité des plaques carotidiennes et déterminer les indications de l'endartériectomie carotidienne. L'analyse histopathologique post-opératoire de la plaque extraite est actuellement la seule méthode permettant de décrire avec précision sa composition. Ce manque et ce besoin ont été présentés par le Pr Koskas et le Dr Davaine, chirurgiens vasculaires des Hôpitaux Universitaires Pitié Salpêtrière - Charles Foix, au Pr Kokabi, à Mme Deshours et au Pr Alquie du laboratoire GeePs. Cette dernière équipe a proposé son idée d'un capteur à micro-ondes, initialement conçu pour détecter le taux de glucose dans le doigt, afin qu'il soit développé et exploité pour distinguer les plaques d'athérome dans l'artère carotide via la fenêtre du cou. Le fruit de cette collaboration a été cette thèse. Le concept du capteur est qu'il peut distinguer les tissus biologiques, comme les plaques fragiles, des plaques stables calcifiées en mesurant la différence de leur constant diélectrique. Ainsi, une plaque fragile aurait une permittivité similaire à celle du sang, tandis qu'une plaque stable calcifiée aurait une lecture aussi basse que celle de l'os. Le principal objectif du doctorat était d'évaluer le modèle de capteur primaire existant sur des plaques carotidiennes ex-vivo et de comparer ses résultats avec l'histologie et les modalités radiologiques actuelles telles que l'échographie Doppler et la tomographie. L'objectif est d'établir un lien entre eux et l'histologie qui est l'étalon-or actuel pour caractériser la composition des plaques d'athérome. L'unité Hounsfield (HU) et l'échelle de Grey-Weale ont été utilisées comme marqueurs pour les résultats de la tomographie et de l'échographie respectivement. Pour les résultats histopathologiques, les niveaux de calcification, de noyau nécrotique fibreux et riche en lipides ont été déterminés par une analyse semi-quantitative. Selon les résultats préliminaires, le constant diélectrique des plaques carotides symptomatiques diffère de celle des plaques asymptomatiques. Le travail s'est concentré au début sur la caractérisation des plaques carotides (ex-vivo) via les calculs de décalage de fréquence pour extraire la permittivité via le logiciel HFSS. La deuxième partie du programme de doctorat a vu le développement de mesures plus concentrées visant à réguler tous les paramètres pouvant influencer les observations de la constante diélectrique. Il a été décidé que l'objectif initial du travail était quelque peu limité. Par conséquent, le nouvel objectif comprenait la gestion et la modification de facteurs tels que la température et l'humidité, afin de présenter des résultats de mesures ex-vivo aussi proches que possible des valeurs in-vivo. Il était également essentiel d'estimer correctement la profondeur de pénétration du champ électrique du capteur et d'étudier expérimentalement l'effet de différentes pressions et leur impact sur l'épaisseur de l'échantillon. Ces variables ont été surveillées pendant les mesures de la plaque carotidienne et pour les tests supplémentaires qui ont suivi sur des multicouches de tissus animaux simulant le cou, qui ont été analysés à plusieurs reprises. Les examens finaux ont été effectués sur des fantômes de couches de cou humain.

Mots-Clés : Capteur, Microonde, Carotide, Csrr, Résonateur

Design and Realisation of a Miniaturized Microwave Biosensor for a Functional Exploration of Atheromatous Biological Tissues

The surgical indications for Carotid endarterectomy (CEA) have become ambiguous in recent years due to the progress in the Optimal Medical Therapy (OMT) of atherosclerotic vascular diseases. Therefore, developing new, non-invasive methods to gauge the vulnerability of carotid plaques and determine CEA indications is crucial. Histopathological analysis post-operation of the extracted plaque is currently the only method to accurately describe its composition. This shortage and need were presented by Prof. Koskas & Dr Davaine, vascular surgeons at Hôpitaux Universitaires Pitié Salpêtrière - Charles Foix, to Prof. Kokabi, Mrs Deshours, and Prof. Alquie in GeePs laboratory. The latter team proposed their idea of a microwave sensor, initially designed to detect glucose levels in the finger, for it to be developed and operated to distinguish atherosclerotic plaques in the carotid artery via the neck window. The fruit of this collaboration was this PhD. The sensor's concept is that it can distinguish biological tissues, such as fragile plaques, from calcified stable ones by measuring the difference in their constant dielectric. Thus a vulnerable plaque would have a permittivity rating similar to blood, whereas a stable calcified plaque would have a reading as low as bone. The major goal of the PhD was to evaluate the existing primary sensor model on ex-vivo carotid plaques and compare its results with histology and current radiological modalities such as Doppler Ultrasonography (DUS) and Computed Tomography (CT). The objective is to establish a link between them and histology which is the current gold standard for characterising atherosclerotic plaque composition. Hounsfield Unit (HU) and Grey-Weale scale were used as markers in CT and US results respectively. For the histopathological findings, the calcification, fibrous and lipid-rich necrotic core levels were determined by semi-quantitative analysis. According to preliminary findings, the dielectric constant of symptomatic carotid plaques

differs from that of asymptomatic plaques. The work has focussed at the start on the characterisation of carotid plaques (ex-vivo) via the frequency shift calculations to extract the permittivity via HFSS software. The second part of the PhD programme saw the development of more concentrated measurements geared to regulating all parameters that can influence constant dielectric observations. The original focus of the work was decided to be somewhat limited. As a result, the new focus included managing and modifying factors, such as temperature and humidity, to present results of ex-vivo measures as close as possible to in-vivo values. It was similarly critical to correctly estimate the penetration depth of the sensor's electrical field and to experimentally investigate the effect of different pressures and their impact on sample thickness. These variables were monitored during the carotid plaque measurements and for the additional testing that followed of multilayers of animal tissues simulating the neck, which were analysed on various occasions. The final examinations were performed on human neck layers' phantoms.

Keywords : Microwave, Carotid artery, Atheromatous plaque, Resonator, Rf

Saman Fatima

Conception d'un circuit de lecture intégré CMOS pour un photodétecteur infrarouge à faible résistance interne pour le contrôle en temps réel du vieillissement des polymères

La maîtrise du vieillissement des polymères est cruciale pour améliorer les performances et assurer la sécurité des centrales électriques. A l'heure actuelle, une méthode invasive est utilisée pour le contrôle du vieillissement des polymères dans les centrales électriques. Elle consiste prélever, par carottage, des échantillons de polymères sur les installations électriques et à les envoyer aux laboratoires pour effectuer les tests et analyses nécessaires à une évaluation de la qualité. Cette méthode est en effet fiable mais coûteuse et chronophage. Ce doctorat, les travaux se concentrent sur la conception d'un circuit de lecture CMOS intégré pour détecter un courant pulsé photo-généré dans un photodétecteur infrarouge (IR) à faible résistance interne. Le circuit d'acquisition du signal proposé est réalisé en technologie X-FAB 0.18 μ m CMOS et ouvre la voie à la conception d'un SOC ou d'un SIP pour un système de surveillance IoT potentiellement largement déployé. Le flux de conception de circuit intégré proposé est piloté par des contraintes provenant de la faible résistance de shunt des détecteurs infrarouges, du bruit de fond énorme, de la courte durée et faible dynamique des impulsions émises, avec une exigence de maximisation de la sensibilité et SNR pour l'application visée. Il se compose de deux blocs principaux : un circuit de lecture du signal et un convertisseur analogique-numérique. La lecture du signal est en outre composée d'un circuit d'interface de détecteur, d'une suppression d'une amplification avec suppression du bruit de fond et d'un intégrateur. De plus, afin d'atténuer les bruits basse et haute fréquences, une technique de CDS (double échantillonnage corrélé) a été implémentée ainsi qu'un moyennage numérique. L'ensemble du système après identification et correction d'une caractéristique polynomiale conduit à une résolution équivalente de 8-bit, voire 10-bit selon le dimensionnement de l'amplificateur.

Mots-Clés : Circuit intégré de lecture (ROIC), Photodétecteur infrarouge à faible résistance interne, Conversion analogique-Numérique (ADC), Double échantillonnage corrélé, Suppression de fond, Moyenne numérique

Design of CMOS integrated readout circuit for low shunt resistance infrared photodetector for real-time polymer aging control

Polymer aging control is crucial for improved performance and ensuring the safety of electrical power plants. By now, the invasive method is being utilized for polymer aging control in electrical power plants. It consists of taking, by coring, samples of polymers from electrical installations and sending them to laboratories to carry out the tests and analyses necessary for a quality assessment. This method is indeed reliable yet expensive and time-consuming. This Ph.D. work focuses on designing an integrated CMOS readout circuit to detect a pulsed current photogenerated in a low-shunt resistance Infrared (IR) photodetector. The proposed signal acquisition circuit is realized in X-FAB 0.18 μ m CMOS technology which paves the way for the design of a SOC or a SIP for a potential widespread IoT monitoring system. The proposed integrated circuit design flow is driven by constraints originating from the low-shunt resistance of infrared detectors, large background noise, the short duration and low dynamics of the emitted pulses, with a requirement of maximizing the sensitivity and SNR for the targeted application. It consists of two principal blocks: a signal reading circuit and an analog-to-digital converter. The signal readout is further comprised of a detector interfacing circuit, background suppression, and signal amplification. In addition, to attenuate low and high-frequency noise frequencies, a CDS (Correlated Double Sampling) technique has been implemented as well as digital averaging. The whole system, after identification and correction of a polynomial characteristic leads to an equivalent resolution of 8-bit or even 10-bit depending on the dimensioning of the amplifier.

Keywords : Readout integrated circuit (ROIC), Low shunt resistance infrared photodetector, Analog-To-Digital conversion (ADC), Correlated double sampling (CDS) Background suppression, Digital averaging

Sénami Zogbo

Modélisations, caractérisations et optimisations du transport électronique aux interfaces des cellules PV à contacts passivants

Les cellules photovoltaïques (PV) à hétérojonction de silicium (SHJ) ont récemment atteint de haut niveau de rendement de conversion, supérieur 26 %, en laboratoire et à l'échelle industrielle, grâce à la substitution des couches de silicium amorphe hydrogéné par des couches de nanocristallin hydrogéné. Cependant, les mécanismes de transport dans ces cellules ne sont pas toujours compris notamment aux niveaux des hétérointerfaces, sources de pertes résistives, où plusieurs phénomènes de transport sont impliqués. La caractérisation des pertes résistives aux interfaces nécessite la mesure de la résistivité de contact (ρ_c) et de la résistance de couche (R_{sheet}) qui sont généralement déterminées à l'obscurité ce qui ne constitue pas les conditions de fonctionnement d'une cellule PV. L'une des méthodes les plus couramment utilisées est la méthode « Transfer Length Method » (TLM). Actuellement, il n'existe pas encore de compromis pour caractériser et modéliser ces pertes de façon fiable dans les conditions typiques de fonctionnement d'une cellule sous illumination et en température sur des structures de test TLM proches du procédé de fabrication cellule. Pour cette raison, un équipement de mesure électrique a été développé afin de réaliser des mesures TLM dans les conditions typiques de fonctionnement d'une cellule afin d'identifier les mécanismes de transport électronique mis en jeu lorsque la cellule est en fonctionnement. Au cours de cette thèse, les travaux ont été menés sur la caractérisation de l'interface Métal/TCO, qui ne dépend pas de l'illumination ainsi que sur la caractérisation du contact électron et trou qui dépendent de l'illumination. Dans un premier temps l'identification des contributions à la résistance série a été réalisée à partir du modèle de Haschke et al. par simulation à partir d'une feuille Excel « maison ». L'interface Métal/Oxyde Transparent Conducteur (TCO) a une faible contribution sur le facteur de forme (FF) lorsque que la valeur de ρ_c est inférieure à $10 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$. Cependant, la dégradation du contact entre le métal et le TCO peut mener à une augmentation de ρ_c d'un facteur 10 et ainsi à la diminution du FF de l'ordre de 10 %abs. Ce résultat montre l'importance de caractériser l'interface Métal/TCO. Toutefois, peu de méthodes et de spécifications sur les structures de test sont décrites dans la littérature. Par simulation TCAD et approche expérimentale, nous avons pu identifier que la variation de l'énergie d'activation ($E_A = E_C - E_F$) des couches a-Si:H permet de mettre en évidence un seul régime de distribution de courant dans la structure TLM (0,6 eV < E_A < 1,4 eV) permettant d'isoler l'interface métal/TCO. Dans un second temps, par simulation et toujours à partir du modèle de Haschke et al., il a été identifié que le contact électron et le contact trou impactent le facteur de forme de la cellule lorsque la valeur de ρ_c est supérieure à $10 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$. Afin de comprendre les mécanismes de transport mis à jeu lorsque la cellule SHJ est en fonctionnement, nous avons proposé une méthode permettant d'extraire la résistivité de contact électron et trou sous illumination et en température en utilisant les propriétés physiques du c-Si sur des structures de test TLM proches de la cellule SHJ finale. Les résultats ont montré que la résistivité de contact (électron/trou) diminue avec la température à cause de l'augmentation de la conductivité des couches a-Si : H. De plus, la résistivité de contact (électron/trou) augmente avec les faibles niveaux d'injection de porteurs de charge. Une augmentation significative de la résistivité de contact trou atteignant $800 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$ à MPP soit 4 fois plus que sa valeur à l'obscurité a été mesurée conduisant à une diminution de 3,5 %abs du FF par rapport à la valeur expérimentale à température ambiante. Ce résultat permet de mettre en évidence que des mécanismes physiques de transport différents sont mis en jeu lorsque la cellule est à l'obscurité ou sous illumination.

Mots-Clés : Contact passivant, Cellule solaire silicium, Transport électronique, Interface

Modelling, Characterization and optimizations of electronic transport at the passivating contact PV cells interfaces

Silicon heterojunction (SHJ) photovoltaic (PV) solar cells have recently achieved high conversion efficiencies, exceeding 26 %, both in the laboratory and on an industrial scale, thanks to the substitution of hydrogenated amorphous silicon layers by hydrogenated nanocrystalline silicon layers. However, the transport mechanisms in these cells are not completely understood, particularly at hetero-interfaces where several transport phenomena are involved, resulting in resistive losses. Resistive losses at interfaces are usually characterized by the Transfer Length Method (TLM), that allows the measurement of both the contact resistivity (ρ_c) and the sheet resistance (R_{sheet}). However, those measurements are generally performed in dark conditions, which are not the operating condition of a PV solar cell. Currently, there are no method for characterising and modelling these losses reliably in typical cell operating conditions (under illumination and temperature) on TLM test structures which are close to the cell manufacturing process. For this reason, a special equipment was developed to carry out TLM measurements under typical cell operating conditions, in order to identify the electronic transport mechanisms involved when the cell is in operation. During this thesis, a focus was made on both the characterisation of the Metal/TCO interface, which does not depend on illumination, and on the characterisation of the electron-hole contact, which does

depend on illumination. Firstly, the contributions to series resistance were identified from the Haschke et al. model by simulation using an in-house Excel spreadsheet. The Transparent Conductive Oxide (TCO)/Metal interface has only a minor contribution to the Fill Factor (FF) when the value of ρ_c is lower than $10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$. However, degradation of the contact between the metal and the TCO can lead to an increase in ρ_c by a factor of 10, resulting in a FF reduction in the order of 10 %abs. This result shows the importance of characterising the Metal/TCO interface. However, few methods and specifications for TLM test structures are described in the literature. Using TCAD simulation and an experimental approach, we have been able to identify that the variation in the activation energy ($EA = EC - EF$) of the a-Si:H layers reveals a single current distribution regime in the TLM structure ($0.6 \text{ eV} < EA < 1.4 \text{ eV}$) that isolates the metal/TCO interface. Secondly, by simulation and still using the Haschke et al. model, it was identified that the electron and hole contacts impact the FF of the SHJ solar cell when the value of ρ_c is greater than $10 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$. In order to understand the transport mechanisms involved when the SHJ cell is in operation, we proposed a method to extract the electron and hole contact resistivity under illumination and temperature using the physical properties of c-Si on TLM test structures close to the final SHJ cell. The results showed that the contact resistivity (electron/hole) decreases with temperature due to the increase in conductivity of the a-Si:H layers. In addition, the contact resistivity (electron/hole) increases with low levels of charge carrier injection. A significant increase in hole contact resistivity reaching $800 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ at MPP, i.e. 4 times higher than its value in the dark, was measured, leading to a 3.5 %abs FF reduction compared to the experimental value at room temperature. This result shows that different physical transport mechanisms are involved when the cell is in the dark or under illumination.

Keywords : Passivating contact, Silicon Heterojunctions, Electronic transport, Interface