



# Geeps

Génie électrique et électronique de Paris

## LABORATOIRE GEEPS THÈSES 2021



université  
PARIS-SACLAY



## Abdellahi Abderahmane

### Méthode d'imagerie par tomographie d'ondes élastiques guidées des contraintes multiaxiales d'une plaque ferromagnétique au moyen d'EMAT

La contrainte mécanique peut modifier la forme et les propriétés physiques d'une structure. Elle peut la rendre plus résistante comme elle peut causer sa rupture. L'évaluation de l'état de contrainte est donc importante pour contrôler la santé des structures. Cette évaluation se fait en mesurant des grandeurs physiques qui sont affectées par la contrainte, puis en utilisant des lois pour retrouver la contrainte à partir de ces grandeurs. L'objectif du présent travail est de proposer une nouvelle méthode d'imagerie de la contrainte, pour résoudre certaines problématiques pour lesquelles il n'existe pas une solution pratique dans la littérature. Parmi ces problématiques, la caractérisation d'un état de contrainte multiaxial et inhomogène dans les plaques métalliques. L'approche suivie lors du développement de cette méthode se base sur la mesure des effets magnétoélastique et acoustoélastique. Pour ce faire les capteurs EMAT (Electro-Magnetic-Acoustic-Transducer) sont utilisés. Tout d'abord un modèle acoustoélastique permettant de trouver les variations des vitesses des ondes de Lamb et SH induites par la contrainte, est développé. Puis une version analytique de ce modèle est proposée pour remonter à la contrainte à partir de ces variations. Cette version est utilisée pour développer une nouvelle méthode tomographique pour l'imagerie d'un état de contrainte multiaxial. La modélisation de la détection d'une onde élastique par un EMAT en milieu ferromagnétique est étudiée, et un modèle est développé. Finalement une méthode qui considère l'EMAT comme un capteur à courants de Foucault, et qui permet de trouver la contrainte locale à partir de la tension induite dans l'EMAT est proposée.

**Mots-Clés :** Électromagnétisme, Effet acoustoélastique, Tomographie, Ondes guidées, Effet magnétoélastique

### An elastic guided wave tomographic method for multiaxial stress imaging in a ferromagnetic plate using EMAT

Mechanical stress can affect structures in many ways. It can for example deform their shape, or alter their physical properties. These effects can have positive or negative outcomes such as rendering a structure more resistant or causing it to fail prematurely. It is therefore of great interest to assess the stress state in a given structure. This is done by evaluating the effect of stress on measurable physical quantities, and using certain laws to deduce the stress from these quantities. The aim of the current work is to propose a new stress imaging method that allows the treatment of certain problems, to which there are no practical solutions in the literature. One of these problems is to image a multiaxial inhomogeneous stress state in metallic plates. The approach adopted to develop the imaging method is based on the measurement of the magneto elastic and acoustoelastic effects. For this the method uses Electro-Magnetic-Acoustic-Transducers (EMAT), which can measure both effects. First, a model that allows calculating the stress induced velocity changes for Lamb and SH waves is developed. Then, an analytical version of this model is proposed in order to get the stress from the velocity changes. This version is used to develop a new tomographic technique for multiaxial stress imagery. The mechanism with which an EMAT can detect the arrival of an elastic wave in a ferromagnetic material is developed. Finally a local characterisation method, is proposed. This method considers the EMAT to be an Eddy current sensor, and gives the local stress as a function of the voltage induced in the EMAT.

**Keywords :** Electromagnetism, Acoustoelastic effect, Tomography, Guided waves, Magnetoelastic effect

## Aleksandra Bojar

### Hétérostructures et cellules tandem à base de silicium et pérovskites

Les matériaux pérovskites (PVK) hybrides connaissent un engouement retentissant depuis quelques années pour les applications photo-voltaïques, notamment car la combinaison d'une sous-cellule supérieure en PVK avec une sous-cellule inférieure en silicium cristallin (c-Si) dans une configuration tandem est une voie prometteuse pour dépasser la limite théorique de rendement d'une cellule unique. Malgré l'amélioration des performances de ces systèmes, la recherche fondamentale sur leur fonctionnement fait toujours défaut. Dans cette thèse nous avons mis en oeuvre un ensemble de techniques avancées de caractérisation pour analyser les propriétés de l'interface PVK/c-Si, dans le but de réduire les pertes par recombinaison des porteurs photoengendrés et par leur mauvaise extraction des cellules. En effectuant des mesures de phototension de surface (Surface Photovoltage, SPV) en fonction de la longueur d'onde à l'aide d'un système de microscopie à force atomique à sonde de Kelvin et en analysant les contributions de la surface et de l'interface, nous avons pu étudier le pouvoir de séparation des porteurs et révéler l'existence de variations lentes liées à des modifications d'ordre chimique. Les mesures complémentaires de phototension de surface dans une configuration métal-isolant-semi-conducteur et des études de spectroscopie de photoémission du système PVK/c-Si nous ont permis de reconstruire l'alignement des bandes à l'interface de ces deux matériaux. Nos résultats servent de base à l'étude de la compatibilité de pérovskites hybrides et du c-Si, en guidant ainsi le développement de cellules solaires tandem pérovskite-silicium dans des architectures de dispositifs monolithiques.

**Mots-Clés :** Pérovskites, Photovoltage de surface, Silicium, Photovoltaïque, Hétérojonctions

### Heterojunctions and silicon/perovskite tandem solar cells

Perovskite (PVK) materials have been attracting a lot of attention in recent years for solar cell applications, notably because combining a top PVK subcell with a crystalline silicon (c-Si) bottom subcell in a tandem configuration is a promising way for overcoming the theoretical single-cell efficiency limit. Even though the performance of such devices has been well improved, the fundamental research of how this material system works is still lacking. While in practical solar cell devices, these two materials are normally not in direct contact, the knowledge of the carrier transport and band alignment at their interface would allow for a better understanding of their performance and compatibility. The aim of this thesis was to use a combined set of characterisation techniques to improve the understanding of the PVK/c-Si interface properties which can be used to develop strategies to reduce losses by minimising recombination of photogenerated carriers and improving their extraction in each sub-cell. By performing wavelength-dependent surface photovoltage measurements in Kelvin probe force microscopy configuration and analysing the surface and interface contributions to the signal measured at the top of the stack, we were able to determine whether the PVK/c-Si interface helps in carrier separation, or not, and to reveal long-term changes attributed to chemical-based processes. Complementary AC SPV measurements in a metal-insulator-semiconductor configuration and photoemission spectroscopy studies of the PVK/c-Si system allowed us to reconstruct the band alignment at the interface of these two materials. Our results serve as a foundation to study the compatibility of perovskite and c-Si, elucidating band alignment, charge transport and light induced photovoltage of this interface, and thus guiding the development of perovskite-silicon tandem solar cells in monolithic device architectures.

**Keywords :** Photovoltaics, Perovskites, Silicon, Surface photovoltage, Heterojunctions

## Ali Mostafa

### Interface de lecture ratiométrique analogique-numérique conscient en température pour les capteurs MEMS résonants

La technologie MEMS a permis le développement de capteurs avec bonnes performances en termes de résolution, de sensibilité, de consommation, etc... Comme dans tout capteur, la sensibilité à la grandeur mesurée doit être maximisée, et la sensibilité aux fluctuations, telles que le dérives et le bruit, doivent être minimisées pour améliorer la résolution. L'effet de température peut être compensé en utilisant des capteurs différentiels basés sur des résonateurs MEMS faiblement couplés. Dans tels dispositifs, les informations détectées différentiellement sont modulées à travers les signaux de sorties de deux résonateurs, et mesurées soit par la différence de phase, soit par le rapport d'amplitude entre ces signaux. Alors que le premier est généralement préféré en raison de sa nature quasi numérique, le dernier offre une résolution plus élevée, mais aussi une bonne immunité contre les fluctuations indésirables, améliorant donc le rapport signal sur bruit. Ces caractéristiques de la mesure du rapport d'amplitude motivent nos recherches pour un moyen efficace de déterminer et de convertir cette quantité du domaine analogique vers le domaine numérique. L'interface de lecture proposée est basée sur un convertisseur analogique-numérique sigma-delta (Sigma-Delta-ADC), et est destinée aux applications automobiles, avec une plage de température de -40 à 125 °C. Les circuits ont été conçus sous la technologie SOI-180nm de la série XH018 des Fonderies X-FAB.

**Mots-Clés :** MEMS, Résonateurs couplés, Résolution élevée, Sigma Delta ADC, Temperature

### Temperature-aware ratio metric analog-to-digital readout interface for MEMS resonant sensors

MEMS technology has allowed the development of sensors with good performance in terms of resolution, sensitivity, consumption, etc... As in every sensor, the sensitivity to the measured quantity must be maximized, and the sensitivity to every other fluctuations, such as drifts and noises, must be minimized or compensated for enhanced resolution. Recently, differential architectures based on weakly coupled MEMS resonators have emerged as a good candidate for high thermal stability measurement. In such devices, the differentially sensed information is modulated through the resonators output signals, and measured by either extracting the phase difference or the amplitude ratio of these signals. While the former is generally preferred because of its quasi-digital nature, the latter offers higher resolution, and higher immunity from undesired fluctuations, improving the signal to noise ratio. These features of the amplitude ratio measurement have motivated our research for an efficient way of computing and converting this quantity from the analog into the digital domain. The proposed readout interface is based on sigma-delta analog-to-digital converter (Sigma-Delta ADC), and targeted for automotive applications with a temperature range from -40 to 125 °C. The circuits are implemented using SOI-CMOS 180nm technology of XH018 series from X-FAB Silicon Foundries.

**Keywords :** MEMS, Coupled resonators, High resolution, Sigma Delta ADC, Temperature

## Baojie Li

### Surveillance de l'état de santé des modules photovoltaïques à partir des mesures électriques

La détection et le diagnostic des défauts sont des éléments essentiels pour la maintenance conditionnelle des panneaux photovoltaïques (PV). Cette thèse propose une nouvelle stratégie en quatre étapes (modélisation, prétraitement, extraction et analyse des signatures) basée sur l'utilisation des caractéristiques courant-tension (courbes I-V) complètes. La modélisation s'appuie sur une approche pilotée par les données simulées ou mesurées. Pour le prétraitement, afin d'atténuer les effets des différentes conditions de mesure, nous avons proposé une procédure de correction améliorée des courbes I-V qui est mieux adaptée aux panneaux défectueux que celles de la norme, ainsi qu'un ré-échantillonnage du vecteur courant pour toujours disposer du même nombre de points. Pour l'extraction des caractéristiques après ce prétraitement, trois méthodes sont développées : l'utilisation directe de la courbe I-V ou sa transformation par la technique Gramian Angular Difference Field (GADF) ou celle de Recurrence Plot (RP). L'analyse en composantes principales (ACP) est également appliquée pour réduire la dimension de la matrice des caractéristiques. Pour l'analyse des caractéristiques, six techniques courantes d'apprentissage automatique sont évaluées : le réseau de neurones artificiels (ANN), la machine à vecteurs de support (SVM), l'arbre de décision (DT), la forêt aléatoire (RF), les k-plus proches voisins (kNN), et le classifieur naïf bayésien (NBC). Pour évaluer les différentes combinaisons entre les signatures et les classifieurs, les critères de performances retenues sont la précision de la classification et la complexité du calcul. Huit conditions (une saine et sept défectueuses) des panneaux PV sont étudiées à partir de courbes I-V simulées et mesurées pour constituer la base de données. Les résultats montrent que l'utilisation des caractéristiques issues de la transformation GADF des courbes I(V) comme entrées du classifieur ANN permet d'obtenir une précision de classification de 100 %, aussi bien pour les données simulées que celles mesurées sur un banc de test développé au laboratoire. La robustesse aux perturbations, l'impact de l'ACP et de la transformation des caractéristiques sont également traités. La stratégie proposée est également comparée à celles qui n'utilisent que partiellement les informations de la courbe I-V et les techniques dans la littérature.

**Mots-Clés :** Défauts PV, Courbe I-V, Détection de défaut et diagnostic, Méthodes d'apprentissage automatique

### Health monitoring of photovoltaic modules using electrical measurements

Fault detection and diagnosis are essential elements for the condition monitoring of photovoltaic (PV) panels. This thesis proposes a new four-step strategy (modelling, pre-processing, extraction, and analysis of signatures) using full current-voltage characteristics (I-V curves). The modelling is based on an approach driven by simulated or measured data. For the pre-processing, to mitigate the effects of the different measurement conditions, we proposed an improved I-V curve correction procedure that is better adapted to defective panels than the standard ones. Besides, the current vector is resampled to have the same number of points. For feature extraction after this pre-processing, three methods are developed: direct use of the I-V feature or its transformation by the Gramian Angular Difference Field (GADF) or Recurrence Plot (RP) technique. Principal component analysis (PCA) is also applied to reduce the dimension of the feature matrix. For feature analysis, six common machine learning techniques are evaluated: artificial neural network (ANN), support vector machine (SVM), decision tree (DT), random forest (RF), k-nearest neighbour (kNN), and Bayesian naive classifier (NBC). To evaluate the different combinations of features and classifiers, the performance criteria used are classification accuracy and computational complexity. Eight conditions (one healthy and seven defective) of the PV panels are studied using simulated and measured I-V curves to build the database. The results show that using the features from the GADF transformation of the I-V curves as inputs to the ANN classifier achieves 100% classification accuracy for both simulated and measured data on a test bench developed in the laboratory. The robustness to perturbations, the impact of PCA and the feature transformation are also addressed. The proposed strategy is also compared to those that only partially use the I-V curve information and techniques in literature.

**Keywords :** PV faults, I-V curve, Fault detection and diagnosis, Machine learning

## Benjamin Loyer

### Méthodologie de conception de convertisseur DC-DC isolé et régulé basse tension

Les travaux proposés sont liés à une architecture de chaîne de traction innovante. Celle-ci permet d'associer un ensemble de cellules Li-ion à une machine électrique de traction au travers de convertisseurs statiques permettant une commande dont la granulométrie est plus fine que celle des architectures conventionnelles. Dans la solution proposée, la gestion de l'énergie prélevée à la batterie d'accumulateur est fractionnée et réalisée par un ensemble de convertisseurs (structure multicellulaire) de faible puissance et de faible tension. Ceux-ci gèrent les transferts d'énergie sur un groupe de cellule de la batterie plutôt que sur l'ensemble des éléments. Cette architecture non conventionnelle ne peut être viable que si l'ensemble des charges électriques embarquées peuvent être alimentées (réseau continu 12 V). Ainsi, cette thèse vise à fournir un ensemble de convertisseurs optimaux pour réaliser cette fonction. L'étude des niveaux de tensions adressables mène au choix d'une structure parallèle comportant deux convertisseurs assurant respectivement le transfert de puissance et sa régulation. La topologie du convertisseur principal est ensuite étudiée afin de choisir le meilleur candidat au vu du cahier des charges. Finalement, un outil de dimensionnement de composant magnétique est développé afin de permettre l'optimisation de celui-ci. Cet outil permet d'employer des techniques de simulation par éléments finis en deux dimensions qui nécessitent des temps de calculs moins long qu'une analyse tridimensionnelle en limitant la perte de précision. Une variante triphasée de convertisseur permettant d'augmenter la puissance transférée est également proposée.

**Mots-Clés :** Convertisseurs isolés, DC-DC, Composants magnétiques, Topologie de régulation, Éléments finis, Commutation douces, Optimisation

### Design methodology of isolated and regulated low voltage DC-DC converters

The proposed work is related to an innovative powertrain architecture dedicated to electric vehicles. It aims to associate a set of Li-ion cells and an electric machine through a group of DC-DC converters. This approach allows the use of smaller voltage steps compared to conventional topologies. It increases the reliability of the motor as well as the efficiency of the powertrain. The proposed solution is a multicellular structure comprising low power and low voltage converters. They manage the energy transfer on a group of cells of the battery rather than on all of its elements. This unconventional architecture can only be viable if all the on-board electrical loads can be powered (12 V DC network). Thus, this thesis aims to provide a set of optimal converters to supply the needed energy. The study of the input and output voltage levels leads to the choice of a parallel structure comprising two converters ensuring respectively the power transfer and its regulation. The topology of the main converter is then studied in order to choose the best candidate according to the specifications. Finally, a magnetic component design tool is developed to allow the optimization of its transformer. This software uses two 2D finite elements methods that requires less calculation time than a three dimensional technic while enhancing the precision compared to a traditional single 2D one. A three-phase variant of the converter which increases the transferred power and the power density is also proposed.

**Keywords :** Isolated converters, DC-DC, Magnetic component, Topology of regulation, Finite elements, Soft switching, Optimization

## Felipe Gonzalez Venegas

### Intégration des véhicules électriques dans les réseaux de distribution : Considérations des comportements des utilisateurs et mécanismes d'implémentation de flexibilité

L'intégration massive des véhicules électriques (VEs) dans les systèmes électriques peut créer des contraintes si la recharge n'est pas gérée de façon appropriée. Cependant, les VEs peuvent apporter de la flexibilité opérationnelle aux systèmes électriques en adoptant des stratégies de recharge et décharge intelligente. Cette thèse étudie l'intégration des VEs aux réseaux de distribution d'électricité en considérant des aspects techniques, comportementaux, économiques et réglementaires. Premièrement, les cas d'utilisation de flexibilité des VE les barrières associées pour leur déploiement sont identifiés. Ensuite, on étudie le comportement de recharge des utilisateurs de VE et son impact sur les réseaux de distributions et le potentiel de flexibilité. Après, on a développé une méthodologie pour évaluer l'impact des VEs sur les réseaux moyenne tension qui exploite des données à granularité fine. On met en évidence les impacts des schémas de mobilité local (urbain vs. rural) sur la recharge des VE et sur le réseau de distribution, et les possibles de complémentarités avec la génération renouvelable distribuée (photovoltaïque). Finalement, on analyse des mécanismes de flexibilité implémentés par des opérateurs de réseau de distribution en Europe. Un cas d'étude numérique permet d'identifier les principales règles de marché qui impactent la participation des VE à ces mécanismes et le niveau de rémunération qu'ils peuvent atteindre. Des recommandations de réglementation sont formulées.

**Mots-Clés :** Réseaux de distribution d'électricité, Véhicules électriques, Recharge intelligente, Vehicle-To-Grid

### Electric vehicle integration into distribution systems : Considerations of user behavior and frameworks for flexibility implementation

The massive integration of electric vehicles (EVs) can pose challenges for electricity systems if charging is not appropriately managed. However, EVs can provide flexibility, improving system operation, by using smart charging and discharging strategies. This thesis studies EV integration into distribution systems through technical, behavioral, economic, and regulatory aspects. First, the use-cases for flexibility at the distribution level are identified, along with the remaining technical, economic, and regulatory barriers for their deployment. Second, an assessment of the impact of plug-in behavior (i.e., users not plugging in every day) in EV integration studies was carried out. For this, an agent-based model was developed and calibrated with real-world data. The impact of EV charging and EV fleets' potential to provide flexibility are evaluated and consequences of current trends towards larger battery sizes are derived. Third, a framework to assess EV charging impact in realistic medium voltage grids that considered granular open-source datasets was developed. We evidence the impact that local mobility patterns (rural vs. urban) and spatial distribution of EVs have on EV grid integration and its coupling with distributed renewable generation. Finally, we studied market mechanisms to procure flexibility at the local level implemented by European distribution system operators. Using a regulatory analysis framework, barriers to entry for EV aggregators were identified, and a case study to assess the potential revenues of different types of EV fleets participating in these schemes was carried out. Policy recommendations for market design were derived.

**Keywords :** Electricity distribution systems, Electric vehicles, Smart charging, Vehicle-To-Grid, Flexibility

## João Roberto Raposo de Oliveira Martins

### Une méthodologie de conception des circuits analogiques consciente de la température basée sur gm/ID

La quatrième révolution industrielle et l'arrivée de l'Internet des Objets introduisent de nouveaux défis pour la conception de circuits fiables. Dans les nouveaux véhicules, les circuits doivent pouvoir fonctionner de manière fiable dans une plage de température étendue. Les caractéristiques des transistors sont connues pour être fortement dépendantes de la température. Pour minimiser ces effets de dérive thermique, l'utilisation de points de polarisation ZTC (Zero Temperature Coefficients) a déjà été proposée. Cependant, cette approche ZTC considère l'influence d'un seul transistor sur le comportement en température des différentes spécifications du circuit et ne permet pas une approche plus générale et méthodologique. D'autre part, les techniques de conception tels que la gm/ID permettent une approche méthodologique pour la conception analogique, sans possibilité d'analyse en température. Ce travail propose une extension de la méthodologie gm/ID en introduisant le concept de paramètres gm/ID normalisés en température. Ces paramètres permettent au concepteur de prendre en compte les effets de la température à un stade très précoce de la conception de la plupart des circuits analogiques, permettant ainsi une méthodologie unifiée pour la conception sensible à la température. Ces résultats sont validés à partir de données de simulation et de mesures de -40 °C à 200 °C avec la technologie XT018 de X-FAB. Trois exemples de conception différents sont également présentés dans cette thèse: circuit de référence de tension (Bandgap), Amplificateur à Transconductance (OTA), et oscillateur contrôlé par tension (VCO). Ces circuits présentent une meilleure performance en température comparable aux spécifications de l'état de l'art.

**Mots-Clés :** Electronique analogique, gm/ID, Effets de température, Physique des semiconducteurs

### A Temperature-Aware Framework for Analog Design Using a gm/ID Approach

The fourth industrial revolution and the Internet of things introduce new challenges to reliable circuit design. In this context, new transports circuits must be able to reliably work at an extensive temperature range. Transistor characteristics have been known to be highly temperature-dependent. Zero Temperature Coefficients (ZTC) bias points have already been proposed to minimize transistor's temperature drift effects. However, this ZTC approach considers the influence of a single transistor on the different circuit specifications' temperature behavior. Moreover, it does not allow and does not allow a more general and methodological approach. On the other hand, design frameworks such as the gm/ID allow a methodological approach for analog design, with no possibility of temperature analysis. This work proposes an extension of the gm/ID methodology by introducing the concept of temperature normalized gm/ID parameters. This concept allows the designer to take temperature effects in a very early design stage in most analog circuits, allowing a unified methodology for temperature-aware design. Those results are validated from simulation and measurement data from -40 °C to 200 °C on the XT018 technology node of X-FAB. Three different design examples are also presented in this thesis, being: a Band Gap voltage reference, an operational transconductance amplifier (OTA), and a voltage-controlled oscillator (VCO). Those circuits present a better presenting a better temperature performance comparable to the state-of-the-art specifications.

**Keywords :** Analog design, gm/ID, Temperature effects, Semiconductor physics

## Michael Derrick Odhiambo

### Focalisation spatiale de données avec modulation à étalement de spectre

Ce travail propose la mise en œuvre de la focalisation spatiale de données (FSD) en utilisant des techniques de spectre étalé. La FSD a récemment été proposée comme alternative aux schémas classiques de focalisation de puissance dans des scénarios de geocasting (diffusion géolocalisée des données). Dans la FSD, ce sont des données à transmettre qui sont traitées de telle qu'elles ne peuvent être décodées qu'à un endroit prédéfini. Ce travail exploite la double orthogonalité due aux IQ et aux séquences orthogonales d'étalement Gold pour concevoir le schéma de focalisation spatiale de données basé sur le IQ et le spectre étalé (DSSS-SDF-IQ). Il est démontré que la FSD permet d'obtenir des faisceaux plus étroits par rapport aux scénarios de focalisation de puissance. La robustesse du schéma proposé est ensuite démontrée par sa mise en œuvre sur un modèle de canal à trajets multiples. Il est démontré que la FSD atteint une largeur de faisceau allant jusqu'à 1 degré avec un réseau de 4 antennes seulement. Le chapitre 1 introduit le concept de geocasting. Le chapitre 2 passe en revue les différentes techniques qui permettent d'obtenir des capacités directionnelles sur les stations de base. Le chapitre 3 présente les principes de l'étalement du spectre par séquence directe basé sur la FSD. Le chapitre 4 étudie l'influence du canal à trajets multiples sur le schéma proposé. Pour tous les cas étudiés ci-dessus, des simulations pertinentes sont mises en œuvre pour valider les discussions. Le chapitre 5 résume le travail avec une conclusion et une perspective sur les orientations possibles de la recherche future.

**Mots-Clés :** Focalisation spatiale de données, Geocasting, Modulation à étalement de spectre, Beamforming, Codes orthogonaux, Canaux à trajets multiples

### Spatial data focusing using direct sequence spread spectrum modulation

This work proposes the implementation of Spatial Data Focusing (SDF) using spread spectrum techniques. SDF was recently proposed as a candidate alternative to classical power focusing schemes in wireless geocasting applications. Unlike power focusing approaches where radiated power is directed to a defined direction, in SDF, it is the data to be transmitted that is processed in such a manner that it can only be decoded at a predefined location. This work exploits the dual orthogonality due to classical quadrature components and orthogonal Gold spreading sequences to design the IQ and spread spectrum based spatial data focusing (DSSS-SDF-IQ) scheme. It is demonstrated that SDF attains better spatial selectivity than classical power focusing for a given antenna array size. The robustness of the proposed scheme is subsequently demonstrated by implementing it over a classical Urban Canyon 6-ray multipath channel model, where it is shown that the scheme can exhibit beamwidth as narrow as 1 degree with only a 4-antenna array. In SDF, the beamwidth is defined as the area within which data can be decoded as opposed to classical half power beamwidth. Chapter 1 introduces the concept of geocasting. Chapter 2 reviews the different techniques that enable directional capabilities on base stations. Chapter 3 introduces the principles of direct sequence spread spectrum based SDF. Chapter 4 investigates the influence of multipath channel on DSSS-SDF scheme. For all the cases studied above, relevant simulations are implemented to validate the discussions. Chapter 5 summarizes the work with a conclusion and perspective on possible future research directions.

**Keywords :** Spatial Data Focusing, Geocasting, Spread spectrum modulation, Beamforming, Orthogonal codes, Multipath channels

## Moch Arief Albachrony

### Modélisation du contrôleur de prévision pour la coordination énergétique en zone résidentielle et dans un contexte d'ouverture du marché

La consommation d'énergie dans le secteur résidentiel – en particulier l'électricité – est amenée à croître de plus en plus du fait d'une plus grande électrification des usages. Par ailleurs, les objectifs de décarbonations de l'énergie, et la réduction de la part du nucléaire, conduit à un fort développement des sources d'énergie renouvelable. Parmi celles-ci il y a la production solaire photovoltaïque distribuée à l'échelle locale. Dans de nombreux pays, des incitations existent pour encourager les ménages à installer un système PV local afin de répondre à leur demande. Toutefois, sans actions spécifiques de contrôle de la demande locale, un surplus de production apparaît à certains moments de la journée. Ce surplus d'énergie peut être revendu au réseau selon un tarif fixé. Néanmoins, ce tarif diminue régulièrement pour tenir compte d'une réduction des coûts des solutions photovoltaïques et pour encourager une autoconsommation. La technique de gestion de l'énergie, à savoir le transfert de charge, est introduite lorsqu'elle permet à l'utilisateur de réduire ses coûts et d'améliorer son taux d'autoconsommation (SCR). Pour anticiper cette situation, les travaux de thèse ont permis de développer une gestion d'énergie pour transformer le client résidentiel (propriétaire PV) en prosumer qui deviendrait actif dans un contexte de libéralisation du secteur électrique. Ces prosumers peuvent aussi contribuer à un objectif d'autoconsommation collective pour réduire le soutirage d'électricité du réseau par une communauté locale d'utilisateur (consommateur et producteurs). Le problème de la coordination de la consommation et de la production dans une communauté de prosumers est complexe. D'une part, il y a de nombreux facteurs à prendre en compte pour assurer un partage optimale d'énergie. D'un autre côté, le problème de la confidentialité survient lors du partage de données entre prosumers. Ces travaux de recherche développent un contrôle prédictif (MPC) pour le système de gestion de l'énergie en utilisant la bibliothèque MORE où le chauffe-eau électrique (EWH) est également modélisé pour valider l'objectif. Le MPC est appliqué à plusieurs stratégies de coordination énergétique, comme les contrats bilatéraux, la coordination centralisée de l'énergie et la coordination de l'énergie entre les pools. La programmation linéaire mixte (MILP) devient une optimisation pour atteindre la réduction des coûts dans chaque ménage en s'appuyant sur les données de consommation du CEA et du logiciel "load profile generator". De plus, le modèle thermique du bâtiment a également été considéré comme un facteur important pour réduction de coût en raison du fonctionnement du contrôleur HVAC. Un case d'étude District à Chambéry et à Jakarta pour analyser l'impact des algorithmes développées dans deux climats différents.

**Mots-Clés :** Consommation d'énergie, Home Energy Management System, Transfert de charge, Coordination énergétique, Model predictive controller, Mixed Integer Linear Programming

### Modeling of a prediction controller for energy coordination in the residential pools, considering the market model

Energy consumption in the residential sector particularly electricity is expected to grow more and more in the next years and decades. In addition, low emissions targets and reduction of the nuclear power plants, are driven the strong deployment of renewable energy sources. Among them, PV solar plays a huge role at a very local scale. In many countries, there are incentives to encourage residential households to install PV panels to meet their demand. Nevertheless, without specific control actions of the demand, an energy surplus will emerge at certain period of the day. This surplus can be injected into the grid and sold to an energy supplier at a fixed tariff. However, this tariff is decreasing in order to consider the drop of PV solutions costs, and to encourage self-consumption. The energy management technique namely load shifting is introduced as it enables the users to reduce its costs and to improve its self-consumption rate (SCR). To anticipate this fact, Energy coordination is developed for making the prosumer (PV owner) more active, and to enable them to search their incentive through the electricity market. These prosumers can also contribute to a collective selfconsumption operation inside a pool or community to subsequently reduce the dependency for grid electricity. The challenge of coordination the consumption and production in a community of prosumer complex. In one hand, there many factor to take into account as control based on the optimal dispatch. In another hand, the privacy issue happens when sharing data between prosumer. This thesis research has developed a Model Predictive Controller (MPC) for energy management system using the MORE library for large scale where it could handle several constraints and solve the objective function. Electric water heater (EWH) is considered to participate for improvement of cost reduction. Then, MPC is applied for several energy coordination strategies such as bilateral contracts, centralized energy coordination and pool-to-pool energy coordination. Mixed Integer Linear Programming (MILP) become an optimization to reach cost reduction in each household

relying on consumption data from CEA and load profile generator software. Furthermore, the building model is also considered as supporting factor for electricity cost because of HVAC controller operation. Consequently, it should be controlled in the MPC in accordance the household occupation and the environmental factor through weather data. District Chambéry and Jakarta become the use case for energy coordination where selfconsumption in the both district for demonstrated the performance of developed algorithms in two different climate.

**Keywords :** Energy consumption, Home Energy Management System, Load shifting, Energy coordination, Model predictive controller, Mixed Integer Linear Programming

## Mohamed Boukhelifa

### Contribution à l'étude des arcs électriques sur réseau HVDC (540 VDC) en conditions aéronautiques

Les travaux menés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'augmentation de la part de l'énergie électrique embarquée dans les réseaux aéronautiques et des augmentations de tension qui en découlent (passage à 230V AC et à +/- 270V DC ou 0-540V DC). Dans ces conditions les avionneurs vont être confrontés à des difficultés techniques concernant la commutation de fortes intensités en régime DC sous de fortes tensions et au risque de défaut d'arc électrique au sein des réseaux. Les travaux présentés dans ce travail concernent la caractérisation des arcs électriques alimentés sous 540 VDC en conditions de pression aéronautiques de 100 hPa à 1000 hPa. Les études menées dans cette thèse sont principalement à caractère expérimental et pour ce faire, une plateforme expérimentale a été mise au point en vue de réaliser dans des conditions de pression contrôlables des arcs en régime DC sous des tensions continues (jusqu'à 540 VDC) et des intensités pouvant atteindre 300 A. Les principaux axes de recherche sont les suivants : i) la caractérisation d'un arc électrique d'un arc sous 540 VDC (extinction de l'arc, extension spatiale de l'arc, énergie dissipée dans l'arc et caractérisation électrique), ii) l'étude du déplacement d'un arc en conditions de pression aéronautique, iii) l'étude des phénomènes qui précèdent l'apparition du défaut d'arc électrique dans le cas d'un amorçage de défauts d'arc par voie humide comme cela est préconisé dans les normes aéronautiques.

**Mots-Clés :** HVDC, Arc électrique, Aéronautique, Coupure, Défauts d'arc

### Contribution to the study of electrical arcs on HVDC (540 VDC) in aeronautical conditions

The work carried out in this thesis concerns the consequences of the increase of the part of electrical energy embedded in aeronautical networks and of the resulting voltage increases (change to 230V AC and +/- 270V DC or 0-540V DC). Under these conditions, aircraft manufacturers will be faced with technical difficulties concerning the switching of high currents in DC under high voltages and the risk of arcing faults within the networks. The work presented here concerns the characterization of electric arcs supplied under 540 VDC under aeronautical pressure conditions from 100 hPa to 1000 hPa. The studies carried out in this thesis are mainly of an experimental nature and for this purpose, an experimental platform has been developed in order to carry out under controlled pressure conditions, arcs in DC regime under DC voltages (up to 540 VDC) and currents up to 300 A. The main lines of research are as follows: i) characterization of an arc under 540 VDC (arc extinction, spatial extension of the arc, energy dissipated in the arc and electrical characterization), ii) study of the displacement of an arc under aeronautical pressure conditions, iii) study of the phenomena that precede the appearance of the arc fault in the case of wet arc fault initiation as recommended in aeronautical standards.

**Keywords :** HVDC, Electric arc, Aeronautic, Switching, Arc fault

---

## Mohammad Bagheriasl

### Analyse et conception de métasurfaces symétriques supérieures

Les métasurfaces plus symétriques montrent un comportement dispersif intéressant par rapport aux structures sans symétrie supérieure. Par exemple, ils assurent une propagation non dispersive dans leur bande passante et une forte atténuation dans leur bande d'arrêt. En raison de ces comportements dispersifs intéressants, des structures symétriques supérieures peuvent être utilisées dans de nombreuses applications telles que la communication mobile 5G. Dans cette thèse, nous développons et discutons une méthode d'analyse pour les structures avec des symétries supérieures. Nous appliquons également cette méthode pour concevoir une technologie de guide d'ondes reconfigurable pouvant être utilisée dans les commutateurs à ondes mm.

**Mots-Clés :** Métasurfaces, Symétrie supérieure, Symétrie de glissement, Symétrie de torsion, Guide d'ondes reconfigurable, Matrice de transmission

### Analysis and design of higher-symmetric metasurfaces

Higher-Symmetric metasurfaces show interesting dispersive behavior compared to structures with no higher symmetry. For instance, they provide non-dispersive propagation in their passband and high attenuation in their stopband. Due to these interesting dispersive behaviors, higher-symmetric structures can be used in many applications such as in 5G mobile communication. In this thesis, we develop and discuss an analysis method for structures with higher symmetries. We also apply this method to design a reconfigurable waveguide technology that can be used in mm-wave switches.

**Keywords :** Metasurfaces, Higher symmetry, Glide symmetry, Twist symmetry, Reconfigurable waveguide, Transmission matrix

## Mokrane Bala

### Contributions à l'amélioration de la loi de commande d'une machine électrique d'un compresseur de climatisation : réduction du nombre de capteurs de courant

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans le cadre du projet EDC (Electrical Driven Compressor), qui vise à développer des compresseurs de climatisation électriques fiables, compacts, conformes aux normes automobiles et à faible coût de production. Cette thèse est composée de deux parties. La première partie est consacrée à la suppression des capteurs de courants de phase et à leur remplacement par un seul capteur de courant au niveau du bus continu. Cette suppression a été accompagnée du développement d'un algorithme de reconstruction des courants de phase. La modification de la loi de commande SVPWM par un algorithme analytique a été rendue nécessaire afin d'assurer la reconstruction des courants de phase sur toute la plage de fonctionnement. Des résultats de simulation et d'expérimentation ont montré le bon fonctionnement de l'algorithme de reconstruction des courants de phase en utilisant la SVPWM modifiée. La deuxième partie de ce travail a consisté à réduire les interférences électromagnétiques via la commande, en utilisant des techniques d'étalement spectral basée sur la PWM aléatoire. La complexité de cette partie a principalement concerné l'adaptation de cette méthode à notre algorithme de reconstruction basé sur la SVPWM modifiée. Les résultats de simulation et les résultats expérimentaux ont montré un bon étalement spectral des différentes harmoniques des courants de phase et des tensions de sortie de l'onduleur.

**Mots-Clés :** Moteur synchrone à aimants permanents, Commande vectorielle, Commande sans capteurs, Modulation de largeur d'impulsion vectorielle modifiée, Étalement spectral

### Improvement of the control of an electric machine of an air conditioning compressor : reduction of the number of current sensor

This thesis work is part of the EDC (Electrical Driven Compressor) project, which aims to develop reliable, compact electric air conditioning compressors that comply with automotive standards and have low production costs. This thesis is made up of two parts. The first one is devoted to the elimination of phase current sensors and their replacement by a single current sensor at the DC bus level. This removal was performed with the help of an algorithm for the reconstruction of phase currents. The modification of the SVPWM control law by an analytical algorithm was made necessary in order to ensure the reconstruction of the phase currents over the entire operating range. Simulation and experimentation results have shown the good working of the phase current reconstruction algorithm using the modified SVPWM. The aim of the second part of this work was to reduce electromagnetic interference by control, using spread spectral techniques based on random PWM. The complexity of this part mainly concerned the adaptation of this method to our reconstruction algorithm based on the modified SVPWM. The simulation results and the experimental results showed good spectral spreading of the different harmonics of the phase currents and the output voltages of the inverter.

**Keywords :** Permanent Magnet, Synchronous Motor, Field oriented control, Sensorless control, Space Vector, Pulse Width Modulation, Spread spectrum

## Nicolas Moron

### Modélisation analytique et simulation numérique de la technique de photoluminescence modulée appliquée à des matériaux semi-conducteurs

Le photovoltaïque est de plus en plus considéré comme une technologie privilégiée de la transition énergétique. Pour concevoir des panneaux photovoltaïques performants, il est nécessaire d'étudier les matériaux semi-conducteurs utilisés avec des techniques de caractérisation avancée. Différentes techniques expérimentales basées sur l'étude de la photoluminescence émise par ces matériaux ont déjà montré leur intérêt. Dans cette thèse, je m'intéresse à la photoluminescence modulée (MPL) qui a récemment permis d'observer des résultats expérimentaux intéressants sur des échantillons de couche mince de CIGS. Les travaux effectués cherchent à expliquer le lien entre les propriétés d'un échantillon (en particulier les mécanismes de recombinaisons des porteurs libres) et le diagramme de phase obtenu. Pour cela, j'ai développé un modèle analytique simplifié, basé sur les équations de la physique des semi-conducteurs, grâce auquel je peux faire le lien entre la présence d'un piège à porteurs minoritaires et l'apparition d'une forme particulière sur le diagramme de phase. Ce modèle a ensuite été validé par des simulations numériques par éléments finis avec le logiciel Silvaco Atlas. L'utilisation de simulations numériques a également permis d'approfondir l'étude de la technique de MPL, pour illustrer certaines applications au-delà de ce que permet le modèle analytique. Alors que la technique de MPL avait été utilisée pour caractériser la durée de vie effective dans le silicium, les résultats prometteurs obtenus dans cette thèse montrent qu'elle peut aussi l'être pour des semi-conducteurs à faible durée de vie.

**Mots-Clés :** Matériaux semi-conducteurs, Photovoltaïque, Photoluminescence, Photoluminescence modulée, Modélisation

### Analytical modeling and numerical simulation of modulated photoluminescence applied on semiconductor materials

Photovoltaics is increasingly seen as a key technology for the energy transition. To design efficient photovoltaic panels, it is necessary to study the semiconductor materials used with advanced characterization techniques. Different experimental techniques based on the study of the photoluminescence emitted by these materials have already shown their interest. In this thesis, I am interested in modulated photoluminescence (MPL) which has recently produced interesting experimental results on CIGS thin film samples. The work carried out seeks to explain the link between the properties of a sample (in particular the recombination mechanisms of free carriers) and the phase diagram obtained. For this purpose, I have developed a simplified analytical model, based on the equations of semiconductor physics, through which I can relate the presence of a minority carrier trap to the appearance of a particular shape on the phase diagram. This model was then validated by numerical simulations using finite elements with the software Silvaco Atlas. The use of numerical simulations also enables further study of the MPL technique, to illustrate some applications beyond what the analytical model can do. While the MPL technique had been used to characterize the effective lifetime in silicon, the promising results obtained in this thesis show that it can also be used for short-lifetime semiconductors.

**Keywords :** Semiconductor materials, Photovoltaics, Photoluminescence, Modulated photoluminescence, Modeling

## Quentin Herbette

### Gain des antennes et réflectivité des cibles en ondes de surface

Les radars HF (entre 3 et 30 MHz) ont la capacité de détecter des cibles au-delà de l'horizon radioélectrique. Des radars de ce type ont déjà été testés par l'ONERA, notamment plusieurs radars à ondes de surface (ROS). Cependant, certains aspects liés à la propagation en ondes de surface restent encore à l'étude. En effet, les ondes de surface se propagent en incidence rasante, dans deux milieux (l'air et la mer). Dans ce cas, l'onde ne peut pas être considérée comme plane et homogène. Ainsi, l'amplitude du champ électromagnétique ne suit pas la loi de décroissance habituelle, inversement proportionnelle à la distance. Par conséquent, les définitions classiques du gain et de la SER, établies pour une propagation en espace libre, ne sont alors théoriquement plus applicables. Par ailleurs, on sait bien que l'environnement d'utilisation des antennes de radars HF a une forte influence sur leurs caractéristiques de rayonnement. L'objectif de ces travaux de thèse est de répondre à plusieurs questions. Quelle est l'erreur réalisée, sur le bilan radar, en utilisant les définitions classiques de la SER et du gain ? Comment, en tirant à profit des connaissances sur la propagation en ondes de surface, peut-on améliorer les définitions de la SER et du gain ? Comment effectuer une caractérisation champ proche, en amplitude et phase, d'antennes HF en condition opérationnelle ?

**Mots-Clés :** Radar, Onde de surface, Surface équivalente radar, Mesure en champ proche, Gain, Électromagnétisme

### Antenna gain and target reflectivity using surface waves

HF radars (between 3 and 30 MHz) have the ability to detect targets beyond the radar horizon. Radars of this type have already been operated by ONERA, including several surface wave radars (HFSWR). However, some aspects related to surface wave propagation are still under consideration. Thus, the surface waves propagate at grazing incidence, in two media (air and sea). In this case, the wave cannot be considered as plane and homogeneous. Also, the amplitude of the electromagnetic field does not obey the usual diminishing law, inversely proportional to the distance. Consequently, the classical definitions of gain and RCS (Radar Cross Section), which hold for free space propagation, are no longer theoretically applicable. Moreover, it is well known that the operating environment of HF radar antennas has a strong influence on their radiation characteristics. The objective of this thesis work is to answer several key issues. What is the error made, on the received power, when using the classical definitions of RCS and gain ? How, using the knowledge about surface wave propagation, can we improve the definitions of RCS and gain ? How to perform a near field characterization, in amplitude and phase, of HF antennas in operating condition ?

**Keywords :** Radar, Surface wave, Near field measurement

## Shuoliang Ding

### Conception d'un système de transmission d'énergie sans fils pour les implants autonomes biomédicaux

Ce travail est destiné à concevoir un système de transmission d'énergie sans fil complet, qui est constitué par les éléments suivants : une antenne externe pour fournir la puissance ; une antenne bi-bande circulaire miniaturisée implantée pour la réception d'énergie et un circuit de redressement—doubleur de tension. Quelques capteurs issus de la littérature sont aussi mentionnés et discutés. Le scénario complet garantit l'intégrité du système et donc valide sa faisabilité. En comparant avec des publications récentes, le système proposé dans cette thèse possède la taille électrique la plus petite. Même si l'efficacité de transmission peut être considérée comme basse, le travail montre que le système est capable d'alimenter plusieurs types de capteur sans difficulté. La partie d'antenne, afin de maximiser la puissance transmise, fonctionne à 915 MHz selon la contrainte internationale de puissance de transmission. L'antenne est circulaire et a un diamètre de 11 mm. Plusieurs améliorations ont été réalisées pendant la procédure de conception, par exemple, réduire la taille du patch ou augmenter le rayon de la fente d'antenne. En plus, dans l'intention d'envisager toutes les améliorations possibles de l'antenne, le rôle et l'influence de chaque paramètre sont détaillés. Plusieurs résultats numériques importants sont présentés et le scénario de la transmission est évalué. Quelques éléments annexes du système, comme l'antenne externe et le réflecteur sont aussi étudiés et la composition l'optimisée est déterminée. Les contraintes de sécurité sont également satisfaites. Le rendement de l'antenne dans le corps humain peut atteindre -35 dB pour une distance de 400mm. Enfin, une méthode mathématique récente est présentée. Elle est capable d'analyser la sensibilité et d'estimer des résultats de simulation à moindre coût. Pour la partie de circuit, plusieurs idées sont proposées et comparées afin d'atteindre la meilleure performance. Les caractéristiques électromagnétiques de tous les éléments du circuit sont prises en compte afin d'obtenir des valeurs optimales. Une simulation totale (antenne et circuit ensemble) est également réalisée. Avec l'analyse antenne-circuit, le système complet est capable de recevoir 56.9  $\mu\text{W}$  pour une distance de transmission de 400 mm et 233.6  $\mu\text{W}$  pour 200 mm avec la configuration optimisée. Le scénario a été finalisé tout en présentant des capteurs de basse consommation. Finalement, plusieurs mesures ont été réalisées pour valider le comportement du système. Pendant la première mesure, un certain nombre de problèmes ont été diagnostiqués et certaines hypothèses ont été étudiées. Ensuite, elles ont été prouvées correctes et la deuxième mesure s'est avérée une réussite. Différents environnements de simulation ont été comparés et les résultats ont été discutés. Le circuit a également été mesuré.

**Mots-Clés :** Rectenna, Antenne implantée, Biotéléométrie, Transmission d'énergie sans fil, Industrial, Scientific and Medical Band

### Design of a Power-Efficient Radiative Wireless System for Autonomous Biomedical Implants

The work in this thesis is dedicated to designing a complete wireless power transmission system including an external power delivery patch antenna, a miniaturized dual-band circular embedded power reception dipole antenna, and a voltage doubler rectifying circuit. Some sensors in the previous literature are mentioned and discussed as well. This entire scenario guarantees the completeness of this system and thus validates its feasibility. Comparing to the previous literature, the system in this thesis has the smallest electrical size. Although the total efficiency seems as low as in other designs, our work proves that it could support several kinds of sensors without any difficulty. For the antenna part, in order to have the maximum power transmitted, the power transmission operates at 915 MHz because of the power limit standards. The circular antenna has a diameter of 11 mm. Several improvements have been made during the design process, including reducing the patch size or increasing the slot radius, etc. Also, in order to simplify any improvement in the future, the influence of each antenna's parameters is detailed. Several important simulation results are presented and the transmission scenario is evaluated. Different accessories such as the external antenna and the reflector are also evaluated. The most optimized parameter for the reflector is found and safety issues are considered. The in-body transmission efficiency could reach -35 dB for 400 mm distance. At last, a new mathematical method with the capability of analyzing the parameters' sensitivity and predicting results is introduced. For the circuit part, several designs are proposed and compared in order to achieve the best performance. The electromagnetic properties of all parts in the circuit are considered and taken into account. Each component is altered for the purpose of finding the optimized value and an antenna-circuit simulation is done. Through antenna-circuit combination analysis, with the most optimized configuration, the entire system is able to receive 56.9  $\mu\text{W}$  for 400 mm power transmission distance and 233.6  $\mu\text{W}$  for 200 mm power transmission distance. By introducing the sensors, the entire scenario has been completed. Finally, several measurements are done in order to validate the performance of the system. During the first measurement, some issues were found and some assumptions were made. Then the assumptions were proved to be right and the second measurement was a success. Different operation environments were compared and differences were discussed. The circuit was measured as well.

**Keywords :** Rectenna, Implantable antenna, Wireless power transmission, Biomedical engineering, Industrial, Scientific and Medical Band

---

## Sidney Golstein

### Sécurité à la couche physique pour des communications dans le domaine fréquentiel implémentant un renversement temporel

Une technique de sécurité à la couche physique implémentant un renversement temporel dans le domaine fréquentiel est étudiée dans cette thèse. Plusieurs configurations de systèmes sont envisagées, i.e., SISO, SIMO et MISO systèmes. Les performances en terme de débit de sécurité sont étudiées en présence d'un dispositif d'écoute passif possédant une ou plusieurs antennes. Des modèles analytiques du débit de sécurité sont dérivés en fonction des hypothèses étudiées.

**Mots-Clés** : Sécurité, Domaine fréquentiel, Couche physique, Renversement temporel

### Physical layer security for frequency domain time reversal communications

A physical layer security technique implementing time reversal in the frequency domain is studied in this thesis. Several system configurations are considered, i.e., SISO, SIMO and MISO systems. Performance in terms of security flow is studied in the presence of a passive listening device having one or more antennas. Analytical models of safety throughput are derived based on the hypotheses studied.

**Keywords** : Physical layer security, Frequency domain, Time reversal

## Sleimane Nasser El Dine

### Modélisation multi-physique du refroidissement de transformateurs de puissance plongés dans un ferrofluide

Des considérations écologiques amènent à utiliser des huiles végétales ensemencées par des nanoparticules magnétiques comme une alternative aux huiles issues du pétrole au sein des transformateurs de puissance. Cependant, les propriétés physiques macroscopiques de ces suspensions et les forces qui en découlent sont mal connues. Pour les étudier, nous proposons une approche couplée, numérique et expérimentale, de ce problème multi-physique alliant des effets thermique, magnétique et fluïdique. Le problème multi-physique nécessite l'utilisation des équations de Navier-Stokes dans l'approximation de Boussinesq, de l'équation de conservation de l'énergie, et des équations de la magnétostatique. Les simulations sont d'abord réalisées avec deux codes éléments finis pour vérifier l'impact de la convection thermomagnétique sur le refroidissement d'un solénoïde immergé dans un ferrofluide. Les résultats numériques ont montré une diminution de 2°C de la température de la bobine. Les résultats numériques ont été comparés à des mesures expérimentales et ont montré un très bon accord. Ensuite, nous avons effectué deux tests pour améliorer la convection thermomagnétique dans le modèle de solénoïde. Le premier test vise à étudier l'effet de nanoparticules magnétiques à faible température de Curie. Le second test évalue l'impact d'un aimant annulaire placé à un emplacement optimisé pour maximiser le flux de fuite dans le ferrofluide. Nous avons également inséré un noyau ferromagnétique dans ce système comme première approche vers un transformateur de puissance afin d'augmenter le transfert de chaleur à l'intérieur du réservoir. Nous avons également effectué une validation 3D du système de solénoïde comme transition vers la modélisation 3D. Un modèle axisymétrique 2D d'un transformateur de puissance monophasé de 40 kVA, 20kV/400V est ensuite étudié. L'impact de la convection thermomagnétique sur le processus de transfert de chaleur est vérifié. La diminution maximale de la température dans les enroulements est évaluée à 2°C en utilisant le ferrofluide. Nous avons réalisé une étude 3D pour le même modèle de transformateur simplifié lorsqu'il est immergé dans de l'huile végétale. Les résultats ont montré un accord relativement bon. Enfin, nous avons modélisé un transformateur de puissance monophasé non axisymétrique de 3 kVA, 400/230V. Les résultats numériques ont montré une diminution significative de la température maximale des enroulements de 10°C lorsque la force magnétique est présente.

**Mots-Clés :** Mécanique des fluides, Électromagnétisme, Transfert de chaleur, Couplage multiphysique, Transformateurs, Refroidissement, Éléments finis

### Multi-physics modeling of cooling of power transformers immersed in a ferrofluid

Ecological considerations lead to nanoparticles with low Curie temperature. The use of vegetable oils seeded with magnetic nanoparticles as an alternative to petroleum oils in power transformers. However, the macroscopic physical properties of these suspensions and the resulting forces are poorly known. To study them, we propose a coupled approach, both numerical and experimental, of this multi-physical problem combining thermal, magnetic, and fluidic effects. The multiphysics problem consists of the Navier-Stokes equations with Boussinesq approximation, the energy conservation equation, and the magnetostatic equations. The simulations are performed first with two finite element codes to verify the impact of the thermomagnetic convection in a solenoid immersed in a ferrofluid. Numerical results have shown a decrease by 2°C of the temperature of the coil. In parallel, the numerical results have been compared to experimental ones and have shown a very good agreement. Then, we have made two tests to improve the thermomagnetic convection in the solenoid model. The first test consists of studying the effect of magnetic nanoparticles with low Curie temperature. The second test investigate the impact of an annular magnet at an optimized location to maximize the leakage flux in the ferrofluid. We have also inserted a ferromagnetic core in the coil system as a first approach for the power transformer to increase the heat transfer inside the tank. We have also performed a 3D validation of the solenoid system as a transition to the 3D modeling. A 2D axisymmetric model of a 40 kVA, 20kV/400V single-phase power transformer is then studied. The impact of the thermomagnetic convection on the heat transfer process is verified. The maximum temperature decrease in the windings is evaluated to 2°C when using ferrofluid. We have performed a 3D study for the same model of the simplified transformer when it is immersed in regular oil. Results have shown a relatively good agreement. Finally, we have modeled a 3 kVA, 400/230V non-axisymmetric single-phase power transformer. The numerical results have shown a significant decrease in the maximum temperature of the windings by 10°C when the magnetic force is present.

**Keywords :** Fluid mechanics, Electromagnetism, Heat transfer, Multiphysics coupling, Transformers, Cooling, Finite elements

## Taha Ajnada

### Activation de surfaces bistables par matériaux piézoélectriques, application au retour haptique

L'objectif de cette thèse est de modéliser, concevoir et réaliser un système à retour haptique, basé sur l'activation d'une surface bistable par actionnement piézoélectrique. L'activation de surface est un enjeu technologique majeur. Parmi les fonctions recherchées, la détection et le positionnement d'un contact sont des défis d'ampleur. Les matériaux piézoélectriques sont particulièrement bien positionnés pour relever ce défi. Ils intègrent par nature les fonctions capteur et actionneur, permettent une conversion électrique-mécanique efficace dans un volume restreint et, moyennant un dimensionnement optimal, peuvent permettre d'obtenir des amplitudes de déplacement intéressantes. La surface réalisée est constituée d'une structure passive de type poutre rendue bistable, sur laquelle sont collés ou imprimés des actionneurs piézoélectriques. Ces actionneurs sont placés de façon optimale pour minimiser la tension de basculement d'un état d'équilibre stable à l'autre de la structure bistable. Ce travail fait appel à un large éventail de connaissances dans le domaine de l'ingénierie mécanique et électrique. Deux types de systèmes bistables sont modélisés, prototypés et caractérisés mécaniquement pour comprendre les niveaux de force caractéristiques qu'ils doivent subir pour le basculement bistable. Les modèles d'actionnement piézoélectrique de la littérature sont comparés entre eux, par le biais d'une étude paramétrique, puis comparés à un modèle numérique pour conclure sur leur validité d'usage dans le cas de notre système. Ce résultat est par la suite utilisé pour modéliser l'actionnement des matériaux piézoélectriques sur les structures passives et l'optimiser, afin de réaliser une preuve de concept. Le travail réalisé incorpore à la fois des aspects 'Matériaux' pour la compréhension des mécanismes physiques à l'œuvre, et des aspects 'systèmes' pour une bonne compréhension des sollicitations subies par les structures.

**Mots-Clés :** Flambement, Basculement bistable, Actionnement piézoélectrique, Modèles équivalents, Modélisation analytique, Modélisation numérique, Approche énergétique

### Bistable surfaces activation by piezoelectric materials, application to haptic feedback

The objective of this thesis is to model, design and realise a haptic feedback system, based on the activation of a bistable surface by piezoelectric actuation. Surface activation is a major technological challenge. Among the functions sought, the detection and positioning of a contact are a major issue. Piezoelectric materials are particularly well positioned to meet this defiance. They inherently integrate the sensor and actuator functions, allow efficient electrical-mechanical conversion in a small volume and, with optimal sizing, can achieve interesting displacement ranges. The surface is made of a passive beam structure made bistable, on which piezoelectric actuators are glued or printed. These actuators are optimally placed to minimise the snap-through voltage from one stable equilibrium state to another of the bistable structure. This thesis work involves a wide range of knowledge in the field of mechanical and electrical engineering. Two types of bistable systems are modelled, prototyped and mechanically characterised to understand the characteristic force levels they have to endure in bistable snap-through. Piezoelectric actuation models from the literature are compared to each other, through a parametric study, and then compared to a numerical model to conclude on their validity for our system. This result is then used to model and optimise the actuation of piezoelectric materials on passive structures in order to achieve a proof of concept of the intended haptic feedback application. The work carried out incorporates both 'Materials' aspects for the understanding of the physical mechanisms involved, and 'Systems' aspects for a good understanding of the stresses endured by the structures.

**Keywords :** Buckling, Bistable snap-through, Piezoelectric actuation, Equivalent models, Analytical modeling, Numerical modeling, Energy approach