

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur
AVIS DE SOUTENANCE DE THÈSE DE DOCTORAT

Monsieur Abdelmounaim DADDA

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat en Sciences de l'ingénieur

Spécialité : Génie énergétique

Le 18 Octobre 2025 à 10h00 au Grand Amphi à l'ENSAM de Rabat

Intitulé de la thèse

**THERMAL MANAGEMENT OF MOSFET POWER MODULES IN
ELECTRIC VEHICLES FAST CHARGERS: CFD MODELING, STAGGERED-
FIN HEAT SINK, ANN SURROGATES, AND EXPERIMENTAL
VALIDATION**

Président :

Pr. Hamid OUADI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Mohamed ASBIK, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Rapporteurs :

Pr. Abdellah OUSEGUI, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Meknès

Pr. Mostapha TARFAOUI, PES, GEP-GSMI, Université Mohammed VI Polytechnique, Benguerir

Pr. Moha CHERKAOUI, PES, ENSMR, Université Mohammed V de Rabat

Examineurs :

Pr. Abdellah BAH, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Pr. Omar ANSARI, PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat

Pr. Amine BNEDARMA, PH, Arts et Métiers Campus de Rabat

Invité :

Dr. Abdelghani KOUKOUCH, Green Energy Park, UM6P/IRESEN, Benguerir

Résumé :

Vu que les modules de recharge rapide des véhicules électriques (VE) se miniaturisent tout en supportant des densités de puissance croissantes, la gestion thermique des MOSFET discrets constitue un obstacle majeur. Les composants TO-247 et TO-220 standard doivent évacuer plusieurs dizaines de watts sur des petites surfaces, ce qui entraîne une augmentation de la température de la jonction qui compromet la fiabilité et l'efficacité. Parallèlement, les simulations à résolution complète du transfert de chaleur conjugué s'avèrent coûteuses en temps de calcul, et les dissipateurs à ailettes parallèles classiques n'apportent que des gains limités. Les concepteurs manquent donc d'outils rapides et fiables pour explorer l'espace multidimensionnel des configurations de refroidissement.

Cette thèse propose un cadre méthodologique intégrant des modèles CFD détaillés et simplifiés, des conceptions innovantes de dissipateurs à ailettes segmentées et décalées, une validation expérimentale systématique, et des modèles de substitution (surrogate) fondés sur l'apprentissage automatique. Dans un premier temps, des modèles CFD détaillés ont capturé les chemins de conduction interne et le transfert de chaleur conjugué pour les boîtiers TO-247 et TO-220, en convection naturelle et forcée. À partir de ces résultats, des modèles simplifiés (MS) remplacent les géométries complexes par des termes sources homogénéisés et des conditions aux limites rigoureuses. Pour un TO-247 sans dissipateur, le MS reproduit les champs de température de jonction tout en réduisant plus de 90 % la taille de maillage et le temps de calcul (passé de 5 min à 2 min), sans sacrifier plus de 2 % de précision pour des puissances de 1 à 25 W. En convection naturelle, la variante adaptée au TO-220 (MS1) présente des écarts de température max. de 1,7 % à 1 W (0,8 % à 0,1 W), et les géométries affinées montées sur dissipateur (MS2-2) conservent les prédictions dans une marge de 5,1 % par rapport au modèle détaillé pour l'ensemble des pertes testées. Des essais en convection naturelle sur boîtiers isolés et des mesures en soufflerie sur dissipateurs extrudés valident ces prédictions, les modèles simplifiés affichant des erreurs moyennes inférieures à 2 K sur la température de jonction.

Pour aller au-delà des performances des ailettes plates conventionnelles, 5 configurations de dissipateurs (HS–HS6) avec des ailettes segmentées (L/3, L/4, L/7) et décalées longitudinalement (L/14, L/28) ont été étudiées. Les résultats CFD et expérimentaux révèlent une réduction de la résistance thermique jonction-ambiante jusqu'à 46,8 % pour la configuration HS5 (44,2 % pour HS6) par rapport à la référence HS1. L'analyse des critères de performance (PEC) identifie les designs modérés (HS2, HS3) comme offrant le meilleur compromis, conservant au moins 70 % de l'efficacité hydraulique de base tout en multipliant par 1,3 le nombre de Nusselt.

Enfin, un réseau de neurones artificiels (ANN) à propagation avant, entraîné sur 120 simulations CFD couvrant six designs de dissipateurs, quatre débits massiques et cinq niveaux de pertes de puissance, prédit la température maximale de jonction et la chute de pression avec un $R^2 > 0,99$, des RMSE $< 1,5$ °C et 21 Pa, et des MAE $< 1,1$ °C et 14 Pa. Deux corrélations empiriques combinant perte de puissance, longueur et position des ailettes, et débit, permettent également de prédire ces grandeurs dans l'espace de design.

Ce travail offre un outil multi-échelle pour la conception thermique des modules de recharge rapide. Les modèles CFD à maillage réduit garantissent des simulations rapides et précises. Les dissipateurs innovants

optimisent le refroidissement. Les modèles d'apprentissage automatique accélèrent l'exploration des designs. Cette approche associe performance de calcul et fiabilité prédictive et prépare des solutions compactes, adaptatives et fiables pour l'électronique de puissance.

Mots-clés:

Charge rapide des véhicules électriques, gestion thermique, refroidissement des MOSFET, Computational Fluid Dynamics (CFD), convection naturelle et forcée, réseaux neuronaux artificiels (ANN), corrélations basées sur les données, conception de dissipateurs thermiques.

Abstract:

As electric-vehicle (EV) fast-charging modules continue to shrink in size while handling ever-higher power densities, effective thermal management of discrete MOSFET packages becomes a critical bottleneck. Standard TO-247 and TO-220 devices must dissipate tens of watts through small surfaces, leading to junction-to-ambient temperature rises that threaten reliability and efficiency. At the same time, fully resolved conjugate heat transfer (CHT) simulations incur substantial computational cost. Moreover, conventional parallel-plate fin heat sinks deliver only modest performance gains. Designers lack rapid, reliable tools to explore the multi-dimensional design space of cooling configurations. This thesis presents a framework that uses detailed and simplified CFD models, innovative heat-sink designs, experimental validation, and data-driven surrogate models to overcome these challenges.

First, detailed CFD models (DM) of TO-247 and TO-220 MOSFETs capture internal conduction pathways and conjugate heat transfer under both natural and forced convection. Building on these, simplified models (SM) replace intricate geometries with homogenized source terms and adequate boundary conditions. For TO-247 devices without a heat sink, the SM reproduces junction-level temperature fields while using 94.5 % fewer mesh elements than the DM and reducing iteration time from about 5 min to 2 min. This was achieved without sacrificing accuracy beyond 2% for moderate power levels (1-25 W). Under natural convection, a variant of the SM for TO-220, SM1 deviations peak at 1.7 % for 1 W, rising from 0.8 % at 0.1 W. When mounted on a heat sink, further refined simplified geometries (SM2-2) maintain temperature predictions within 5.1 % of the DM across all tested power losses. Complementing the modeling work, systematic experimental setups benchmark both package-level and sink-level performance. Natural-convection tests on standalone TO-247 and TO-220 packages, and wind-tunnel measurements of MOSFETs mounted on custom extruded sinks, validate the CFD predictions. Across these experiments, the SMs demonstrate mean junction-temperature errors below 2 K, confirming their utility for rapid preliminary design.

To enhance convective cooling beyond conventional plate fins, six innovative staggered-fin heat-sink configurations were investigated. A heat sink with the overall length L , referred to as HS1, was used for the subsequent five modified configurations. By segmenting fins by $L/3$ (HS2), $L/4$ (HS3), $L/7$ (HS4, HS5, and

HS6) and introducing longitudinal displacements of $L/14$, $L/28$, these designs disrupt thermal boundary layers and promote mixing. CFD and wind-tunnel experimental results reveal that extreme segmentation reduces junction-to-ambient thermal resistance by up to 46.8% in HS5 relative to the baseline. HS6 also achieved a 44.2 % reduction under similar flow conditions. Performance-Evaluation Criteria analysis identifies moderate segmentation and staggering in configurations like HS2 and HS3 as offering the best trade-offs. They sustained at least 70% of baseline hydraulic efficiency while delivering up to 1.3 times the reference Nusselt number.

Finally, surrogate modeling tools were developed to enable near-instantaneous performance predictions. A feed-forward Artificial Neural Network (ANN), trained on 120 CFD simulations. The data represented the six sink designs, four mass-flow rates, and five power loss levels. The ANN predicts maximum junction temperature and pressure drop with high fidelity. Across training, testing, and validation datasets, the ANN achieves $R^2 > 0.99$, RMSEs below $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ for temperature and 21 Pa for pressure drop, and MAEs under $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 14 Pa. Two correlations were derived. They combine power loss, fin length and position, and flow rate to predict both maximum junction temperature and pressure drop within the validated design space. Together, these contributions deliver a practical, multi-scale toolkit for thermal design in high-power EV charging modules: mesh-reduced CFD models for fast but accurate simulations, validated heat sink designs for enhanced cooling, and Machine Learning-based models for rapid design exploration. This approach balances computational efficiency with predictive accuracy, laying the groundwork for real-time optimization, adaptive control, and the next generation of compact, reliable power electronics cooling solutions.

Keywords:

EV fast charging, thermal management, MOSFET cooling, Computational Fluid Dynamics (CFD), natural and forced convection, Artificial Neural Networks (ANN), data-driven correlations, heat sink design.