

**Titre :** Imprégnation capillaire anisotherme et polymérisation d'une résine thermodurcissable dans un bobinage composite de rotor électrique : caractérisation expérimentale, modélisation et simulation du couplage multiphysique.

**Mots clés :** Imprégnation, capillarité, couplage multiphysique, caractérisation, simulation.

**Résumé :** Dans le cadre de l'électrification du parc automobile, Renault assemble ses propres moteurs électriques : le rotor est principalement composé d'un noyau en acier sur lequel sont bobinés des fils de cuivre isolés. Le bobinage est ensuite immergé dans un bain de résine liquide thermodurcissable assurant la performance et la durabilité du moteur. L'imprégnation, faite à température contrôlée pour faciliter l'écoulement et la polymérisation, n'implique pas de pressurisation. Cela suggère que la capillarité et la gravité jouent un rôle significatif. L'objectif global est d'évaluer la qualité de l'imprégnation. Cela requiert de caractériser, modéliser et simuler un procédé multi-matériaux et multi-physiques dans lequel transfert thermique, cinétique de polymérisation et écoulement capillaire sont fortement couplés. Les matériaux sont caractérisés (cinétique de polymérisation, viscosité, propriétés thermiques

et de surface) pour modéliser leur comportement temporel et thermique. Ensuite, pour un cas unidirectionnel idéal, un montage expérimental original de suivi de l'imprégnation par prise en masse à température contrôlée est conçu et développé. Des essais de 20°C à 120°C permettent de mieux comprendre les phénomènes et l'influence des paramètres. Un modèle analytique simplifié est optimisé pour correspondre aux expériences. Pour compléter, une simulation anisotherme 2D couplée est réalisée sur un domaine homogénéisé, fournissant les gradients de polymérisation et thermiques et leur impact sur la dynamique d'écoulement. Enfin, l'analyse est montée en échelle sur une bobine de type rotor. Un autre montage original basé sur les diélectriques est développé pour mesurer le flux de résine. La simulation de l'imprégnation de la bobine est présentée.

**Title:** Anisothermal capillary impregnation and polymerization of thermosetting resin in composite electric rotor winding: experimental characterization, modeling & simulation of the multi-physical coupling.

**Keywords:** Impregnation, capillary effect, multiphysics' coupling, characterization, simulation

**Abstract:** In the mobility electrification context, the Renault Group assembles its own electric engines: the rotor is mainly composed of a steel core wound by insulated copper wires. The winding is immersed into a thermosetting resin bath ensuring the performance and durability of the motor. The impregnation occurs under controlled temperature to facilitate the flow and the polymerization. This process does not involve any pressurization. This suggests that capillary and gravity forces play a significant role. The global objective is to evaluate the impregnation quality. It requires characterizing, modeling and simulating a multi-materials and multi-physics process in which heat transfer, polymerization kinetics and capillary-driven resin flow are strongly coupled. The materials are characterized (polymerization kinetics, viscosity, thermal and surface properties) to model their temporal and thermal behavior. Then, for an ideal unidirectional coil, an original temperature-controlled experimental resin weight intake follow-up setup is designed and developed. Tests from 20°C to 120°C enable a deeper understanding of the phenomena and parameters' influence. A simplified analytical model is optimized to match the experimental results. To complete, a coupled 2D anisothermal simulation is performed on a homogenized domain, providing the polymerization and thermal gradients and their impact on fluid dynamics. Finally, the analysis is up-scaled for a rotor-like coil. Another original dielectric-based setup is developed to measure the resin flow experimentally. The simulation of the coil's impregnation is provided.