AVIS DE SOUTENANCE D'UNE THESE DE DOCTORAT

Le Directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées a le plaisir d'informer le public qu'une soutenance de thèse de Doctorat en

«Sciences et ingénierie»

aura lieu le 11/04/2026 à 10H00 à l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie, Kénitra

La Thèse sera présentée par Mr BELLA NAOUFAL

Sous le thème :

Méthodologie intégrée de conception des systèmes mécatroniques orientée sûreté : application au secteur automobile

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Titre	Etablissement
BENBRAHIM MOHAMED	Président	ENSA, Kénitra
MOUNIR HAMID	Rapporteur	EMI, Rabat
MELLOULI EL MEHDI	Rapporteur	ENSA, Fès
AIT ERROUHI AHMED	Rapporteur	ENSA, Kénitra
IDRISSI SAID	Examinateur	EST, Salé
BENLAFKIH ABDESSAMAD	Examinateur	EST, Kénitra
LAGRAT ISMAIL	Directeur de thèse	ENSA, Kénitra

UNIVERSITE IBN TOFAIL ★ PÔLE DES ETUDES DOCTORALES ★ KENITRA

Nom et Prénom : BELLA NAOUFAL
Date de soutenance : 11/04/2026
Directeur de Thèse : LAGRAT ISMAIL

Sujet de thèse :

Méthodologie intégrée de conception des systèmes mécatroniques orientée sûreté : application au secteur automobile

Résumé:

L'évolution rapide de la complexité des véhicules modernes, marquée par l'intégration croissante de fonctions électroniques, logicielles et mécaniques, impose de repenser en profondeur les méthodologies de conception en ingénierie automobile. Cette thèse propose une démarche intégrée, centrée sur la modélisation hybride, le diagnostic embarqué, et la sûreté fonctionnelle avec validation expérimentale, appliquée à un système mécatronique critique : la boîte de vitesses automatique AL4. La première contribution concerne la modélisation multi-formalisme du système de transmission. En combinant les Bond Graphs (modélisation énergétique quantitative), Stateflow (logique événementielle) et les Réseaux de Petri (analyse formelle des transitions d'état), une architecture hybride cohérente est développée. Cette approche permet de capturer à la fois les dynamiques physiques continues et les comportements discrets, formant ainsi un jumeau numérique complet, exploitable pour la simulation, le contrôle et l'analyse de sûreté. La deuxième contribution porte sur la conception d'un autodiagnostic embarqué basé modèle (MBDiag), appliqué à une thermistance CTN utilisée pour la surveillance thermique de la boîte. En s'appuyant sur la loi de Steinhart-Hart et la génération de résidus entre modèle et mesure, un système de surveillance en temps réel est implémenté sous MATLAB (Simulink/Stateflow), capable de détecter des défauts comme les coupures, courts-circuits ou dérives thermiques, et d'engager une calibration automatique. La troisième contribution applique rigoureusem ent la norme ISO 26262 à un actionneur critique : l'électrovanne de séquence. Une analyse HARA, suivie d'une FMEA, d'une FMEDA et du calcul des métriques de sûreté quantitatives (SPFM, LFM, PMHF), permet de valider la conception selon un niveau ASIL C, avec définition des états sûrs, délais de tolérance aux fautes (FTT), et exigences de sécurité matérielles et logicielles. Enfin, l'ensemble de la démarche est consolidé par une validation expérimentale à travers des essais accélérés en laboratoire et des campagnes de roulage avec injection contrôlée de défauts. Ces tests permettent de confirmer la robustesse des mécanismes de diagnostic et la pertinence des stratégies de mise en sécurité, tout en fournissant des preuves tangibles de conformité selon le niveau ASIL C. Cette thèse met en évidence l'importance d'une approche systémique et modulaire, où la modélisation, le diagnostic et la sûreté sont conçus comme des fonctions intégrées dès les premières phases. Elle propose ainsi une feuille de route méthodologique pour le développement de systèmes mécatroniques sûrs, fiables et industrialisables, en phase avec les exigences du véhicule intelligent et sécurisé de demain.

Mots-clés : Systèmes mécatroniques, Transmission automatique, Boîte de vitesses AL4, Modélisation hybride, Modélisation multi-formalisme, Bond Graphs, Stateflow, Réseaux de Petri, Diagnostic embarqué, MBDiag, Surveillance en temps réel, Thermistance CTN, Loi de Steinhart-Hart, Calibration automatique, ISO 26262, HARA, FMEA, FMEDA, ASIL C, SPFM, LFM, PMHF, FTT, Sûreté de fonctionnement, Fiabilité, Validation expérimentale, Essais accélérés, Injection de défauts, Jumeau numérique, Model-Based Design, Véhicule intelligent, Ingénierie système, Système critique, Composant mécatronique, Électrovanne de séquence, MATLAB/Simulink.

Abstract:

The increasing complexity of modern vehicles, driven by the integration of electro- nic, software, and mechanical functions, requires a fundamental rethinking of design methodologies in the automotive industry. This thesis proposes an integrated approach, centered on hybrid modeling, model-based embedded diagnostics, and functional safety with experimental validation, applied to a critical mechatronic system : the AL4 auto- matic transmission. The first contribution focuses on the multi-formalism modeling of the transmission system. By combining Bond Graphs (quantitative energy modeling), Stateflow (discrete event logic), and Petri Nets (formal behavior modeling), a coherent hybrid architecture is developed. This architecture captures both the continuous physical dynamics and the discrete transitions, resulting in a digital twin that supports simulation, control design, diagnostics, and safety analysis. The second contribution concerns the design of a model-based embedded diagnostic (MBDiag) applied to a NTC thermistor used for oil temperature monitoring. Using the Steinhart-Hart equation and residual generation between the model and real data, a real-time health monitoring system is implemented in MATLAB (Simulink/Stateflow), capable of detecting sensor faults such as disconnec- tions, short circuits, or thermal drifts, and triggering automatic recalibration. The third contribution applies the ISO 26262 standard to a critical actuator : the sequence solenoid valve. A complete safety process is conducted, including HARA, FMEA, FMEDA, and the calculation of quantitative safety metrics (SPFM, LFM, PMHF). The method ensures compliance with ASIL C, through the definition of safe states, fault-tolerant times, and hardware/software safety requirements. Finally, the integrated methodology is validated through experimental testing, including accelerated life tests and on-vehicle testing with fault injection. These tests confirm the robustness of the diagnostic mechanisms and the reliability of degraded mode strategies, while providing evidence-based safety assurance. This thesis highlights the importance of a system-level, model-based development strategy, where modeling, diagnostics, and safety are co-designed from the early stages. It provides a structured roadmap for the development of safe, reliable, and certifiable mechatronic systems, aligned with the challenges of the future intelligent and secure vehicle.

Keywords : Mechatronic systems, Automatic transmission, AL4 gearbox, Hybrid modeling, Multi-formalism modeling, Bond Graphs, Stateflow, Petri Nets, Embedded diagnosis, Model-Based Diagnosis (MBDiag), Real-time monitoring, NTC thermistor, Steinhart-Hart law, Automatic calibration, ISO 26262, HARA, FMEA, FMEDA, ASIL C, SPFM, LFM, PMHF, Fault Tolerant Time (FTT), Functional safety, Reliability, Experi- mental validation, Accelerated testing, Fault injection, Digital twin, Model-Based Design, Intelligent vehicle, Systems engineering, Safety-critical system, Mechatronic component, Sequence solenoid valve, MATLAB/Simulink.