

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 20/07/2026 à 09H à l'ENSA, Kénitra

La Thèse sera présentée par Mme REDDAD HAKIMA

Sous le thème :

**Optimisation et fiabilité des systèmes mécatroniques embarqués: développement
d'outils avancés d'aide à la décision**

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Titre	Etablissement
LIONEL AMODEO	Président	Université de Technologie de Troyes (UTT)
AYOUB ABDELLAOUI	Rapporteur	ENSAM, Rabat
SOUFIANE BELHOUIDEG	Rapporteur	ENSA, Beni Mellal
MOHAMED ER-RATBY	Rapporteur	ENSA, Khouribga
MOHAMMED BENBRAHIM	Examineur	ENSC, Kénitra
HASSANE ERGUIG	Examineur	EST, Kénitra
FAROUK YALAOUI	Invité	Université de Technologie de Troyes (UTT)
NOURLISLAM EL HAMI	Co-Directeur de thèse	ENSA, Kénitra
MARIA ZEMZAMI	Co-Directeur de thèse	ENSAM, Rabat
NABIL HMINA	Directeur de thèse	ENSA, Kénitra

Nom et Prénom : REDDAD HAKIMA
Date de soutenance : 20/07/2026
Directeur de Thèse : NABIL HMINA

Sujet de thèse :

Optimisation et fiabilité des systèmes mécatroniques embarqués: développement d'outils avancés d'aide à la décision

Résumé:

La fiabilité des systèmes mécatroniques embarqués constitue un enjeu scientifique et industriel majeur, en particulier pour les assemblages électroniques de type Ball Grid Array soumis à des sollicitations thermomécaniques sévères. Dans ces systèmes miniaturisés, les joints de soudure représentent des zones critiques de défaillance, en raison des phénomènes couplés de fatigue thermomécanique, de fluage et de désaccord des coefficients de dilatation thermique entre matériaux. Leur évaluation fiable nécessite des simulations par éléments finis haute fidélité, dont le coût computationnel limite toutefois l'intégration directe dans un processus d'optimisation fiable. Cette thèse s'inscrit dans ce contexte et vise à développer un framework d'optimisation de la conception basée sur la fiabilité robuste, sans gradient et applicable aux systèmes mécatroniques soumis à des incertitudes géométriques, matérielles et de chargement. Trois verrous scientifiques sont adressés : l'optimisation de fonctions de performance issues de simulations FEA coûteuses et non différentiables, l'analyse de fiabilité de fonctions fortement non linéaires et multimodales, et la réduction du coût numérique induit par les évaluations répétées du modèle haute-fidélité. La première contribution consiste en une évaluation comparative rigoureuse de six algorithmes métaheuristiques sous contraintes, couvrant plusieurs familles d'approches. À travers les benchmarks CEC 2006 et des tests statistiques de Friedman et Wilcoxon-Bonferroni, l'algorithme SAR est identifié comme l'optimiseur le plus performant, fournissant ainsi une base expérimentale solide pour son intégration dans la boucle externe du framework RBDO. La deuxième contribution introduit RMSA, un algorithme d'analyse de fiabilité fondé sur une recherche géométrique directe sur l'hypersphère de fiabilité. Contrairement aux méthodes PMA classiques, RMSA ne requiert pas le gradient de la fonction de performance et améliore la localisation du point cible le plus probable pour des fonctions non linéaires ou multimodales. Sa validation sur quatre problèmes RBDO de référence confirme sa robustesse pour la résolution de la boucle interne d'analyse de fiabilité. La troisième contribution concerne le couplage du framework proposé avec un modèle FEA haute-fidélité d'un assemblage BGA industriel WLP16T en alliage SAC305, soumis à un chargement thermomécanique cyclique. Cette modélisation permet d'intégrer les incertitudes géométriques et matérielles dans le processus de conception et de passer d'une optimisation déterministe à une conception fiable garantissant un indice cible $\beta \geq 3,0$. Enfin, afin de rendre la démarche compatible avec les contraintes industrielles de calcul, trois modèles de substitution (Kriging, Random Forest et XGBoost) sont construits à partir de 69 simulations FEA générées par un plan d'expériences LHS. Le surrogate retenu permet de remplacer les évaluations FEA coûteuses par des prédictions rapides, rendant la boucle RBDO opérationnelle en 1,68 secondes. Les résultats obtenus montrent une réduction du volume du joint de 67,4 % tout en maintenant la fiabilité cible. Ainsi, cette thèse propose une architecture SAR-RMSA assistée par surrogate ML, constituant une solution RBDO robuste, sans gradient et adaptée aux problèmes d'ingénierie caractérisés par des fonctions de performance coûteuses, non différentiables et fortement non linéaires. Les résultats démontrent son potentiel pour une conception fiable plus fiable, plus efficace et plus déployable des systèmes mécatroniques embarqués.

Abstract:

The reliability of embedded mechatronic systems represents a major scientific and industrial challenge, particularly for Ball Grid Array electronic assemblies subjected to severe thermomechanical loading. In these miniaturized systems, solder joints constitute critical failure locations due to coupled mechanisms such as thermomechanical fatigue, creep, and coefficient of thermal expansion mismatch between materials. Their accurate assessment requires high-fidelity finite element simulations, whose computational cost limits their direct integration into reliability-based optimization processes. This thesis addresses this challenge by developing a robust, gradient-free Reliability-Based Design Optimization framework applicable to mechatronic systems under geometrical, material, and loading uncertainties. Three main scientific barriers are tackled: the optimization of expensive and non-differentiable performance functions derived from FEA simulations, the reliability assessment of highly nonlinear and multimodal limit-state functions, and the reduction of the computational burden induced by repeated evaluations of high-fidelity models. The first contribution consists of a rigorous comparative assessment of six constrained metaheuristic algorithms covering several families of approaches. Based on the CEC 2006 benchmark suite and supported by Friedman and Wilcoxon-Bonferroni statistical tests, the Search and Rescue algorithm is identified as the most effective optimizer. This provides a solid experimental basis for its integration into the outer optimization loop of the proposed RBDO framework. The second contribution introduces RMSA (Reliability Manifold Search Algorithm), a reliability analysis algorithm based on a direct geometric search over the reliability hypersphere. Unlike classical PMA methods, RMSA does not require the gradient of the performance function and improves the localization of the most probable target point for nonlinear or multimodal functions. Its validation on four reference RBDO problems confirms its robustness for solving the inner reliability analysis loop. The third contribution concerns the coupling of the proposed framework with a high-fidelity FEA model of an industrial WLP16T BGA assembly made of SAC305 solder alloy and subjected to cyclic thermomechanical loading. This modeling strategy enables the integration of geometrical and material uncertainties into the design process, allowing the transition from deterministic optimization to reliability-based design while ensuring a target reliability index of $\beta \geq 3.0$. Finally, to make the approach compatible with industrial computational constraints, three surrogate models (Kriging, Random Forest, and XGBoost) are constructed from 69 FEA simulations generated through a Latin Hypercube Sampling design. The selected surrogate model replaces costly FEA evaluations with fast predictions, making the complete RBDO loop operational in 1.68 seconds. The obtained results show a 67.4% reduction in solder joint volume while maintaining the target reliability level. Overall, this thesis proposes a surrogate-assisted SAR-RMSA architecture as a robust, gradient-free RBDO solution for engineering problems involving expensive, non differentiable, and highly nonlinear performance functions. The results demonstrate its potential for enabling more reliable, computationally efficient, and industrially deployable reliability based design of embedded mechatronic systems.