

Nom et Prénom : FATHI SOPHIA

Date de soutenance : 19/09/2026

Directeur de Thèse : MHARZI HASSAN

Sujet de thèse :

Étude et Prédiction de la durée de vie des Segments Racleurs des Moteurs à Combustion dans l'Industrie Automobile

Résumé:

La question de la tenue en fatigue des segments racleurs des moteurs à combustion interne constitue le point central de cette étude. Malgré leur faible dimension, ces composants assurent des fonctions essentielles dans le moteur, notamment l'étanchéité des gaz de combustion, le contrôle de la consommation d'huile et une partie du transfert thermique entre le piston et la paroi du cylindre. Placés dans une zone fortement sollicitée, ils sont exposés à des charges mécaniques cycliques, à des gradients thermiques élevés et à des interactions tribologiques complexes. L'effet combiné de ces contraintes favorise l'amorçage de fissures, accélère l'usure et peut conduire à une rupture par fatigue. L'analyse de leur comportement représente donc un enjeu important pour améliorer la fiabilité des moteurs tout en réduisant les conséquences économiques et environnementales liées à leur défaillance. Pour traiter cette problématique, une démarche intégrée et pluridisciplinaire a été adoptée. Une revue approfondie de la littérature a d'abord permis de dresser un état de l'art des principales approches de modélisation de la fatigue. Cette analyse a porté sur les modèles empiriques classiques, tels que les lois de Basquin et de Coffin-Manson, sur les modèles de mécanique de la rupture fondés sur les lois de Paris et de Forman, ainsi que sur des critères multiaxiaux plus récents, notamment celui de Dang Van. Cette étude critique a mis en évidence les apports et les limites de chaque approche. Elle a surtout montré qu'aucun modèle, pris isolément, ne permet de représenter de manière satisfaisante la complexité des sollicitations réelles subies par les segments racleurs, ce qui justifie l'association d'approches classiques et avancées. Une part importante de l'étude a ensuite été consacrée à la modélisation numérique par la méthode des éléments finis (FEM). Cette approche a permis de reproduire avec précision les géométries complexes des segments, de simuler les chargements cycliques et d'analyser la répartition des contraintes et des déformations. L'intégration de défauts structurels réels, tels que la porosité, l'anisotropie ou la rugosité, a renforcé le réalisme des simulations. Les résultats numériques ont été confrontés à des validations expérimentales menées à l'aide de techniques comme la microscopie électronique à balayage (MEB) et la diffraction des rayons X (XRD). Ces analyses ont confirmé la pertinence des modèles développés et ont mis en évidence l'influence déterminante des propriétés des matériaux et des traitements de surface sur la résistance en fatigue des segments racleurs. Parallèlement, l'apport de l'intelligence artificielle et du machine Learning a été exploré afin d'améliorer les capacités prédictives. À partir des données issues des simulations et des essais expérimentaux, des modèles plus robustes ont été élaborés pour mieux estimer la durée de vie de composants soumis à des conditions de service aléatoires et multifactorielles. Cette orientation ouvre des perspectives concrètes en maintenance prédictive, en lien avec l'Industrie 4.0 et les jumeaux numériques. Enfin, l'étude propose la conception d'un banc d'essai expérimental innovant destiné à consolider la validité des modèles et à faciliter leur intégration dans des environnements industriels réels. Ce dispositif hybride constitue une contribution pratique importante en assurant le lien entre recherche fondamentale et application industrielle.

Abstract:

The fatigue performance of scraper rings used in internal combustion engines stands at the center of this study. Despite their small size, these components are essential to engine operation because they contribute to combustion gas sealing, oil consumption control, and part of the heat transfer between the piston and the cylinder wall. Owing to their critical location, scraper rings are exposed to severe service conditions involving cyclic mechanical loading, pronounced thermal gradients, and complex tribological interactions. The combined effect of these factors promotes crack initiation, accelerated wear, and, eventually, fatigue failure. For this reason, understanding, modeling, and predicting their fatigue life remains a major scientific and industrial issue, both for improving engine reliability and for limiting economic and environmental impacts. To address this challenge, the study follows an integrated and multidisciplinary approach. An extensive literature review was first conducted to establish the state of the art in fatigue assessment methods. The review covered conventional empirical models, including Basquin's and Coffin-Manson's laws, fracture mechanics approaches based on Paris' and Forman's laws, and more advanced multiaxial criteria such as Dang Van's. This critical examination made it possible to identify the strengths and limitations of each family of models and showed that no single approach is sufficient to capture the complexity of the actual loading conditions experienced by scraper rings in service. As a result, the combination of classical and advanced methods appeared necessary. A substantial part of the work was then devoted to numerical modeling using the finite element method (FEM). This approach enabled accurate representation of the complex ring geometries, simulation of cyclic loading conditions, and detailed analysis of stress and strain distributions. The introduction of real structural defects, including porosity, anisotropy, and surface roughness, improved the realism of the simulations. In parallel, experimental validation was carried out using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), which confirmed the consistency and reliability of the numerical results. These investigations also highlighted the strong influence of material properties and surface treatments on the fatigue resistance of scraper rings. At the same time, artificial intelligence and machine learning were explored as complementary tools for improving predictive performance. By relying on data generated from both numerical simulations and experimental analyses, more robust predictive models were developed to estimate fatigue life under random and multifactorial operating conditions. Such an approach opens promising perspectives for industrial implementation, particularly in predictive maintenance, in connection with Industry 4.0 technologies and digital twin development. The study also proposes the design of an innovative experimental test bench intended to strengthen model validation and support their transfer to real industrial environments. Conceived as a hybrid platform for measurement, analysis, and simulation, this system represents a practical contribution that links fundamental research with industrial application. Overall, the work combines materials mechanics, numerical simulation, experimental characterization, artificial intelligence, and systems engineering to advance the understanding of fatigue phenomena and to support the design of more reliable, efficient, and sustainable engines.

Keywords : Fatigue, Scraper rings, Prediction, Numerical simulation, Artificial intelligence, Fatigue life, Internal combustion engines.

رئاسة جامعة ابن توفيل، المركب الجامعي، ص.ب. 242 – القنيطرة – 14000

Presidency Ibn Tofail University, University Campus, BP.242 Kenitra 14000

☎ (+212) 537 32 92 00

☎ (+212) 79 45 21 30 05

🌐 UIT.ac.ma