

**Abstract:**

Predicting the initiation and propagation of fatigue cracks in structures is a major challenge for the industry, aiming to move beyond the typically used conservative approaches to reduce costs, optimize designs, and ensure structural integrity over longer durations. Numerous numerical methods can be employed in this context, notably the phase-field approach, which offers significant flexibility in dealing with complex crack scenarios and addressing crack initiation and growth in a unified manner. However, the computational cost associated with applying this model to real-world cases is currently too high, limiting its application to academic scenarios. The objective of this thesis is to propose various acceleration approaches to mitigate this prohibitive computational cost, while maintaining the required precision and robustness. This is intended to make real-life application of the phase-field model feasible.

To achieve this goal, a phase-field fatigue model was implemented within the finite element code Cast3M. An approach based on toughness degradation was chosen and validated across several sample usual of the phase-field literature. Additionally, a new energy decomposition method was introduced to enhance efficiency and robustness of this critical step. Subsequently, several modifications of the initial implementation were suggested to accelerate computations. Firstly, the cycle calculation was optimized through the introduction of a staged solution scheme tailored for fatigue scenarios. Then, multiple cycle jump schemes were proposed to minimize the number of calculated cycles. Lastly, an adaptive mesh refinement approach was adopted to optimize the number of degrees of freedom considered during the simulation. These tools effectively address the various reasons behind the computational cost issues in phase-field fatigue modelling, including the need for the resolution of a non-linear coupled problem, on a large number of cycles, using a very fine mesh.

Subsequently, this accelerated phase-field framework was applied to several standard academic cases to validate its implementation and demonstrate the potential timesaving benefits. Furthermore, two numerical-experimental comparison cases were presented using the accelerated approach. These trials showcased the abilities of the accelerated model while also highlighting additional challenges associated with applying the model to real-life cases.

## **Résumé :**

La prédiction de l'initiation et de la propagation de fissure de fatigue dans les structures constitue un enjeu majeur de l'industrie, qui cherche à limiter les approches habituellement conservatives pour diminuer les coûts, optimiser les formes, et garantir l'intégrité des structures sur des durées plus longues. Un nombre important de méthodes numériques peuvent être exploitées dans ce contexte, et notamment l'approche champ de phase, qui bénéficie d'une grande flexibilité pour traiter des cas de fissuration complexe, et considérer l'initiation et la propagation de fissure de façon unifiée. Cependant, le coût numérique associé à l'application de ce modèle sur des cas réels est aujourd'hui trop important et limite donc son application à des cas académiques. L'objectif de ce mémoire est de proposer plusieurs approches d'accélération pour diminuer ce coût de calcul prohibitif, tout en maintenant le niveau de précision et de robustesse, dans le but de rendre possible l'application du modèle sur des cas réels.

Pour ce faire, un modèle champ de phase étendu en fatigue est implémenté dans le code éléments finis Cast3M. Une approche par dégradation de la ténacité est choisie et validée sur plusieurs cas usuels de la littérature champ de phase. Par ailleurs, une nouvelle méthode de décomposition de l'énergie est également mise en place, permettant d'en améliorer l'efficacité et la robustesse. Nous proposons ensuite plusieurs modifications de cette implémentation initiale qui permet d'accélérer les calculs. D'abord, le calcul de cycle est optimisé à travers l'introduction d'un schéma de résolution étagée adapté au cadre en fatigue. Ensuite, nous introduisons plusieurs schémas de saut de cycle permettant de minimiser le nombre de cycles calculés. Enfin, une approche de raffinement adaptatif de maillage est mise en place, afin d'optimiser le nombre de degrés de liberté pris en compte pendant la simulation. Ces outils répondent en fait aux différentes raisons pour lesquelles le coût de calcul du modèle champ de phase en fatigue est prohibitif: la résolution d'un problème non-linéaire, sur un nombre très important de cycles, avec un maillage extrêmement fin dans la zone endommagée.

Ce cadre champ de phase accéléré est ensuite exploité sur plusieurs cas académiques usuels pour valider son implémentation, et montrer les gains en temps de calcul possibles. Puis, deux cas de comparaisons numériques-expérimentales utilisant l'approche accélérée sont proposés. Ces essais mettent en évidence les capacités du modèle accéléré tout en soulignant d'autres difficultés liées à l'application du modèle sur des cas réels.