

PROJET DE RECRUTEMENT D'UN DOCTORANT

Titre de la thèse

Modélisation probabiliste des hétérogénéités microstructurales et étude de leurs effets sur la prédiction de la durée de vie en fatigue

Problématique :

La maîtrise de la résistance en fatigue des matériaux et des structures est d'une importance capitale dans de nombreux secteurs industriels (transports, énergie, santé ...). Les mécanismes d'endommagement associés sont néanmoins d'une telle complexité qu'il est très difficile de procéder à des prédictions fiables quel que soit le matériau et la structure considérés. Dans le **domaine des grandes durées de vie**, il est habituel d'observer des variations de plusieurs ordres de grandeur quant aux durées de vie à la rupture. Il a été démontré à plusieurs reprises dans la littérature [1-5] que les **hétérogénéités microstructurales** jouent un rôle d'autant plus important que le niveau de sollicitation est faible (i.e. niveau de la limite de fatigue). Dans ce domaine de la fatigue, la variabilité de la réponse mécanique observée à l'échelle macroscopique a pour origine principale les conditions très variées d'amorçage et de propagation de microfissures à l'échelle microscopique. De ce fait, la prise en compte de la variabilité liée à la microstructure (taille, orientation et morphologie des grains, texture locale autour de chacun des grains, anisotropie élastique des grains, développement des structures de dislocations, nature, taille et morphologie des défauts géométriques et/ou métallurgiques introduits par le procédé de fabrication ...) est une étape indispensable dans le développement de modèles prédictifs fiables et robustes. De nombreuses études conduites par un des deux laboratoires partenaire de ce projet (le LAMPA) a clairement montré que la prise en compte de l'aléa sur les défauts (taille et morphologie de pores dans les alliages de fonderie par exemple [6]) constitue un facteur déterminant dans la prédiction de la durée de vie en fatigue et de sa variabilité.

Les progrès considérables réalisés durant ces dernières années en simulations numériques notamment à partir d'une représentation explicite de microstructures [1-5] ont permis de mettre en évidence certains paramètres microstructuraux et mécaniques locaux responsables de l'amorçage et dans une moindre mesure de la propagation des microfissures de fatigue. Les modèles (géométriques et de comportement) utilisés sont néanmoins souvent entachés d'incertitudes et restent une représentation simplifiée de la réalité. Ceci est dû au fait que certains mécanismes physiques sont parfois méconnus (c'est particulièrement vrai dans le cas de la fatigue) et que de nombreuses hypothèses simplificatrices sont faites. Une description fine de ces incertitudes à l'aide des distributions statistiques s'avère donc nécessaire pour améliorer la prédictibilité de ces modèles et estimer la durée de vie en fatigue avec un niveau de confiance élevé [7-13].

L'objectif principal de cette thèse est donc de mieux comprendre l'effet de la variabilité de chaque paramètre lié à la microstructure sur la prédiction de la durée de vie en fatigue. Puis d'établir une corrélation claire entre les hétérogénéités microstructurales et la dispersion observée sur la réponse mécanique macroscopique. Les modèles (empiriques ou physiques) proposés dans la littérature comprennent un nombre important de paramètres souvent difficiles à identifier. Afin de réduire la taille du problème, une étude de sensibilité basée sur l'estimation des indices de Sobol peut s'avérer adaptée. Elle consiste à déterminer la part de variabilité de la réponse du modèle due à un ensemble de paramètres d'entrée. Cette étude de sensibilité permet ainsi de hiérarchiser la contribution des paramètres d'entrée et de leurs interactions à la variabilité de la réponse du modèle (la durée de vie en fatigue). Une fois les paramètres les plus importants identifiés, une densité de probabilité est associée à chaque paramètre. Les densités de probabilité (associées aux propriétés microstructurales, mécaniques, etc.) sont cependant souvent mal connues ou définies sur la base d'avis d'experts. Pour pallier ce problème, **l'inférence bayésienne** semble une alternative prometteuse permettant de remonter aux densités de probabilités des paramètres incertains. La propagation de ces incertitudes permet par la suite de mieux estimer la durée de vie en fatigue considérant la variabilité liée à la microstructure.

Le premier volet de la thèse vise donc à traiter du passage entre l'échelle de la microstructure et celui du Volume élémentaire représentatif. Le deuxième volet de l'étude concerne la mise en place d'une méthodologie de dimensionnement à l'échelle de la structure et ceci en se basant sur l'étude faite à l'échelle de l'éprouvette. Les essais à l'échelle de l'éprouvette sont en effet indispensables mais insuffisants pour mettre en place une approche de dimensionnement globale de structures. Pour qu'une approche de dimensionnement soit transposable à l'échelle de la structure, elle doit intégrer les effets ignorés sur éprouvette (les effets de géométrie, les effets de l'environnement, etc.). Ainsi, les courbes de fatigue (courbes S-N) générées à partir d'observations sur éprouvettes ne sont pas en réalité directement utilisables pour dimensionner une structure réelle. Pour tenir compte de ces effets, l'approche classique de dimensionnement consiste à décaler ces courbes de fatigue par un facteur en se basant sur l'avis d'experts. Ce facteur n'est pas un coefficient de sécurité, mais un facteur d'incertitude visant à couvrir les effets négligés. Cette méthode est souvent critiquée, puisqu'elle est trop conservatrice et ne repose sur aucun fondement mathématique ou physique rigoureux. De ce fait, une compréhension fine des phénomènes à l'échelle de la structure et une quantification de ces effets sont indispensables pour réaliser un transfert réaliste et sûr vers la structure. Pour résumer, l'objectif est de préciser les effets qui peuvent être considérés pour définir les facteurs qui doivent être intégrés explicitement avant l'utilisation des courbes de fatigue obtenues à l'échelle de l'éprouvette. Pour y parvenir, une analyse probabiliste de ces effets est nécessaire. Ceci requiert d'une part, une caractérisation probabiliste des différentes incertitudes affectant le comportement en fatigue et d'autre part l'utilisation de méthodes de fiabilité « système » pour estimer la probabilité de défaillance de la structure en fatigue. Une des méthodes qui pourrait être appliquée, est de considérer la structure comme un système composé de N éprouvettes en série, de générer un ensemble de scénarios possibles avec des méthodes statistiques adaptées pour déterminer le nombre de cycle à l'amorçage d'une fissure macroscopique et de retenir à chaque fois le scénario le plus défavorable (*worst case analysis*). La possibilité de coupler des critères de défaillance définis à l'échelle de l'éprouvette avec de modèles de vie accélérés pour tenir compte des effets négligés est une deuxième piste à explorer.

La validation de l'approche développée sur une application industrielle est une étape importante et fait partie des objectifs à atteindre dans le cadre de cette thèse. Des essais sur éprouvettes avec des essais supplémentaires dans les conditions de service (de la structure réelle) seront nécessaires pour la validation de la stratégie de transposition.

Pour conclure, la principale originalité de l'approche proposée réside dans l'utilisation combinée de méthodologies actuelles et avancées qu'il s'agisse de la simulation du comportement en fatigue ou de l'analyse fiabiliste conduite afin de lever le verrou scientifique de la prédiction de la variabilité du comportement en fatigue à partir de la connaissance de certaines hétérogénéités microstructurales. Pour le problème en fatigue, on désire conduire des simulations à partir de microstructures synthétiques afin d'accéder aux conditions d'amorçage qu'on considère représentées une part prépondérante de la durée de vie. Pour obtenir des prédictions avec un niveau de fiabilité suffisant, il est envisagé d'associer à chaque paramètre une densité de probabilité représentative de la variabilité réelle. Ensuite, de propager cet aléa à l'aide d'un modèle physique afin d'estimer une quantité d'intérêt (la durée de vie en fatigue dans ce cas). Le choix de modèle est loin d'être trivial et une des principales contributions de cette partie est de considérer simultanément plusieurs modèles plausibles. La discrimination entre les modèles se fait à l'aide de l'inférence Bayésienne qui a fait ses preuves dans des domaines variés. Elle permet de mesurer l'évidence associée à chaque modèle candidat [14-15] et de sélectionner le meilleur. Dans le paradigme Bayésien, le meilleur modèle est celui qui permet à la fois un bon ajustement des données expérimentales et des prédictions fiables.

Quelques références bibliographiques :

[1] R. Guerchais, N. Saintier, F. Morel, C. Robert. Micromechanical investigation of the influence of defects in high cycle Fatigue, *International Journal of Fatigue*. 67 (2014) 159-172.

[2] R. Guerchais, C. Robert, N. Saintier, F. Morel. Micromechanical study of the loading path effect in high cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*. 59 (2014) 64-75.

[3] R. Guerchais, F. Morel, N. Saintier. Effect of defect size and shape on the high-cycle fatigue behavior. *International Journal of Fatigue*. 100 (2017) 530-539.

- [4] C. Robert, N. Saintier, T. Palin-Luc, F. Morel. Micro-mechanical modelling of high cycle fatigue behaviour of metals under multiaxial loads. *International Journal of Fatigue*. 55 (2012) 112-129.
- [5] S.R. Yeratapally, M.G. Glavicic, Ch. Argyrakis, M.D. Sangid. Bayesian uncertainty quantification and propagation for validation of a microstructure sensitive model for prediction of fatigue crack initiation. *Reliability Engineering and System Safety*. 164 (2017) 110–123.
- [6] V.D. Le, F. Morel, D. Bellett, N. Saintier, P. Osmond. Multiaxial high cycle fatigue damage mechanisms associated with the different microstructural heterogeneities of cast aluminium alloys. *Materials and Science Engineering A*. 100 (2016) 426-440.
- [7] P. Beaumont. Optimisation des plans d'essais accélérés : Application à la tenue en fatigue de pièces métalliques de liaison au sol. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2013.
- [8] VOICULESCU S., GUERIN F. and BARREAU M. "Bayesian estimation in accelerated life testing", *Journal of Quality Technology and Quantitative Management*, Volume 8, Number 4, December 2011, pp 439-450.
- [9] P. Beaumont, F. Guérin, P. Lantieri, M.L. Facchinetti, G.M. Boret. Accelerated Fatigue Tests for reliability estimation of chassis parts. IEEE, Orlando, USA, 2013.
- [10] GUERIN F. and HAMBLI R., "Lifetime Distribution Estimation of Boot seals in Automotives Application by Bayesian Method", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol 129, n°3, March 2007, pp 275-282.
- [11] LANTIERI P., GUERIN F., HAMBLI R., "Reliability estimation by ALT when no analytical model holds", *Journal of Quality and Reliability Engineering*, Volume 26, Issue 6, 2010, pp 605-613.
- [12] J. Baussaron. Modèles prédictifs de fiabilité pour les pièces mécaniques soumises à dégradation. Thèse de doctorat, Université d'Angers, 2011.
- [13] Fabrice GUERIN, Amel DEMRI, M. BARREAU, S. CLOUPET, J. HERSANT and R. HAMBLI, *Mathematical and Statistical Models and Methods in Reliability*, Chapter « Bayesian estimation of degradation model defined by a Wiener process », Birkhäuser Boston, Springer, 2011, ISBN 978-0-8176-4970-8.
- [14] A. Ben Abdesslem, N. Dervilis, D. J. Wagg and K. Worden, Automatic kernel selection for Gaussian processes regression with approximate Bayesian computation and sequential Monte Carlo, *Frontiers in Built Environment* 3 (2017) 52.
- [15] A. Ben Abdesslem, N. Dervilis, D. Wagg, K. Worden, Model selection and parameter estimation of dynamical systems using a novel variant of approximate Bayesian computation, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018 (Accepted for publication).

Déroulement, phasage des travaux :

Le planning prévisionnel peut se décliner sur les 3 ans de thèse comme suit :

T0 : 1^{er} Octobre 2018

T0-T0+3mois : Bibliographie et choix des cas d'études.

T0+3 - T0+6 : Mise en place des simulations numériques d'agrégats polycristallins. Identification, quantification et modélisation de l'aléa lié à la microstructure (par une approche bayésienne). Mise en place d'une campagne expérimentale ciblée (si nécessaire)

T0+6 -T0+18 : Etude de sensibilité globale, classification des paramètres : corrélation entre la variabilité microstructurale et la durée de vie en fatigue. Choix/sélection de modèles (en utilisant l'inférence bayésienne). Etude expérimentale complémentaire ciblée.

T0+18-T0+24 : Implémentation d'une approche probabiliste permettant la propagation des incertitudes pour une estimation de la durée de vie en fatigue : vérification et validation en se basant sur des données empiriques. Analyse des résultats de la campagne expérimentale ciblée. Comparaison avec les prédictions du modèle.

T0+24-T0+30 : Développement d'une approche permettant le passage de l'échelle de l'éprouvette à l'échelle d'une structure réelle pour la prédiction de la durée de vie (vérification et validation sur un composant industriel).

T0+30-T0+36 : Proposition d'une nouvelle méthodologie permettant l'évaluation de la fiabilité à l'échelle de la structure (introduction des processus Gaussiens et d'une nouvelle méthode d'échantillonnage pour la construction de métamodèles). Rédaction du rapport de thèse

Profil requis :

Étudiant en master 2 ayant une formation dans le domaine des matériaux, le candidat devra posséder des compétences en statistiques appliquées et une affinité pour la programmation numérique et la modélisation par éléments finis. Les titulaires d'un diplôme d'ingénieur peuvent également se porter candidat.

Encadrants et contacts :

Franck Morel, ENSAM-LAMPA,

Email : franck.morel@ensam.eu

Fabrice Guérin, ISTIA-LARIS,

Email : fabrice.guerin@univ-angers.fr

Anis Ben Abdesslem, Université d'Angers-LARIS,

Email : anis.ben-abdesslem@univ-angers.fr