

Contribution à la modélisation et à la simulation numérique de l'usure

Contexte et objectifs généraux

Le phénomène d'usure est un mode d'endommagement complexe difficile à appréhender du fait de son caractère pluridisciplinaire qui fait intervenir la mécanique, la science des matériaux et la chimie. La nature des matériaux en contact et les conditions de fonctionnement (pression, température, lubrification, ambiance corrosive,...) sont les principaux facteurs d'usure. Le frottement, qui est la principale cause de l'usure, entraîne généralement une altération dimensionnelle des pièces en contact, une augmentation des jeux de fonctionnement couplé à une dégradation des caractéristiques superficielles. On distingue plusieurs types d'usure mécanique qui, à chaque fois, se traduisent par un enlèvement de matière. L'usure **adhésive** se caractérise par l'apparition de jonctions entre les aspérités des surfaces en contact. L'usure **abrasive** est obtenue lorsqu'un corps dur (particules ou protubérances de la surface d'un solide) déforme plastiquement un corps plus tendre. Cette usure est dite à deux corps lorsque l'abrasif appartient à la surface d'un des solides en contact, et à trois corps lorsque les particules abrasives sont libres de glisser ou de rouler entre les deux surfaces. Les sollicitations telles que le glissement, qui ont pour effet de déformer les aspérités et les couches de surface, sont à l'origine de la **fatigue de surface**. L'usure par **fretting** apparaît suite à une sollicitation cyclique en déplacement tangentiel de faible amplitude. L'usure par **impact** est un endommagement mécanique de la surface résultant d'une répétition de contacts entre solides massifs. L'environnement influence de manière importante l'usure par le biais de réactions complexes avec les matériaux du contact. Les pressions, températures et lubrifiants utilisés pour un contact peuvent par exemple mener à l'oxydation des débris formés lors du contact ou favoriser la création d'une couche d'oxyde à la surface des corps en contact, couche pouvant être protectrice ou au contraire aggravant l'usure si elle se fragmente et crée des débris dans le contact.

Pour comprendre ce phénomène et arriver à s'en prémunir lors de la durée de fonctionnement des composants, les approches actuelles reposent principalement sur une démarche expérimentale [1, 2] qui est longue et coûteuse. C'est pourquoi il est intéressant de développer des outils numériques visant à modéliser l'usure et à mieux comprendre ce phénomène. Cela permettrait de concevoir des composants aux durées de fonctionnement maîtrisées et d'optimiser la maintenance des composants du parc électronucléaire français tels que les guides de grappe, les tubes de générateur de vapeur. Bien que le contexte de cette thèse soit celui de l'industrie nucléaire, la problématique de l'usure se retrouve dans d'autres domaines comme par exemple le domaine ferroviaire avec l'usure entre la roue et le rail ou encore l'automobile et l'aéronautique avec l'usure de certains composants du moteur.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de la thèse d'Estelle Marc [3], à dominante expérimentale et qui constitue une partie de notre base de résultats expérimentaux, et lui est complémentaire puisque l'accent est ici mis sur la simulation numérique. La modélisation numérique d'un tel problème est complexe et présente de nombreuses difficultés associées non seulement aux multiples non-linéarités présentes (contact-frottement, usure, comportement des matériaux) mais surtout à la nécessité de calculer sur de grandes périodes de temps. En effet, les sollicitations sont susceptibles de se répéter un très grand nombre de fois, plusieurs millions, voire dizaines de millions de fois, sur des structures dont les configurations géométriques évoluent à cause de l'usure. Même avec les capacités de calcul actuelles, l'obtention efficace de réponses fiables pour de tels problèmes exige la mise en œuvre de techniques numériques spécifiques. Ainsi, dans le cas de chargements cycliques, des méthodes de recherche directe de l'état asymptotique [4, 5, 6] pourront être mises en œuvre. Ces méthodes, comme la Méthode Cyclique Directe [4, 5], ont déjà été appliquées à des problèmes de roulement et de fretting fatigue. Elles supposent l'existence d'un état asymptotique stabilisé (adaptation ou accommodation) et ne donnent pas accès aux états transitoires ou aux états asymptotiques de type rochet. L'utilisation de méthodes à grand incrément de temps [7] pourra aussi être explorée. La modélisation de l'usure se fait en modifiant, au cours du calcul, la géométrie des zones en contact. Une technique couramment employée est de déplacer les nœuds [8, 9, 10] mais il pourrait être envisagé d'utiliser des techniques de remaillage [10], des méthodes de maillage adaptatif ou un couplage avec la méthode XFEM.

[11]. L'objectif est, en parallèle des moyens expérimentaux et en synergie avec eux, de chercher et de développer les techniques numériques efficaces qui permettront de modéliser et de simuler le phénomène d'usure de manière prédictive.

Objectifs détaillés

Des méthodes numériques particulièrement adaptées à la problématique de l'usure douce (sans déformation inélastique macroscopique) ou sévère (avec plasticité macroscopique) seront recherchées, en mettant à profit les particularités du problème, ou mises au point. Il pourra s'agir, par exemple, d'adapter des méthodes cycliques directes, éventuellement en les associant à des méthodes à grand incrément de temps pour traiter les différentes échelles de temps apparaissant dans ces problèmes à configuration géométrique variable. Face aux grands nombres de "cycles" de sollicitations en jeu, deux catégories de période de temps pourront être considérées : les premières comprenant suffisamment de cycles pour que les grandeurs mécaniques se stabilisent à géométrie fixe (mais avec des non-linéarités matérielles et de contact), suivies des secondes où l'usure est prise en compte. Typiquement, la méthode cyclique directe pourrait être utilisée pour les premières, tandis que l'évolution due à l'usure serait, quant à elle, appréhendée par une méthode plus pertinente. Au final, parmi les méthodes numériques qui seront mises au point, celle identifiée comme la plus prometteuse et la mieux adaptée à la simulation de l'usure sera implémentée dans le code aux éléments finis CAST3M. Des comparaisons calcul-essai sur des configurations élémentaires nous permettront de valider les développements et de s'assurer de la représentativité des calculs.

Une fois ces techniques numériques éprouvées et validées, une autre configuration élémentaire sera calculée en aveugle (calcul prédictif) et elle sera testée expérimentalement. Ces essais seront réalisés, par les équipes du CEA, sur la machine d'usure « MUSE froid ». Ce moyen d'essais permet de réaliser des essais d'usure maîtrisés en air ou en eau et à température ambiante.

Outil numérique

- Code de calculs par éléments finis CAST3M

Environnement envisagé pour la thèse

L'encadrement de la thèse est envisagé via un groupe de suivi se réunissant régulièrement (a minima une fois par trimestre) afin de discuter des travaux réalisés et d'orienter la suite des actions. Les personnes du groupe couvrent plusieurs disciplines (mécanique, matériaux, numérique, chimie) et sont issues des deux partenaires EDF (MMC-Renardières) et CEA (SEMT).

Le groupe prévu est composé de :

- Habibou MAITOURNAM (Directeur de thèse, UME-ENSTA & IMSIA)
- Matthieu BREUZÉ (encadrant, CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/LM2S, membre de l'équipe CAST3M)
- Benoit PRABEL (co-encadrant, CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/DYN, membre de l'équipe CAST3M)
- Christian PHALIPPOU (CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/DYN)
- Bruna MARTIN CABANAS (EDF R&D MMC-Renardières)
- Rémy BONZOM (EDF R&D MMC-Renardières)

Les travaux s'effectueront dans les locaux du CEA Saclay pendant toute la durée de la thèse.

Echéancier indicatif pour la thèse

Le programme identifié à ce jour se décompose de la manière suivante :

Thèse, 1^{ère} année :

- Bibliographie (générale sur l'usure, particulière sur les méthodes numériques permettant de simuler l'usure)
- Prise en main du modèle d'usure implémenté dans Cast3M. Il s'agira de valider par une confrontation résultats numériques/essais, à partir de la base d'essais de référence, les développements numériques

existants (usure d'un seul protagoniste, usure des deux protagonistes). Ces premières études orienteront les choix sur la ou les méthodes numériques à retenir.

- Développement dans CAST3M d'une méthode numérique adaptée à la modélisation et à la simulation de l'usure.

Thèse, 2^{ème} année :

- Poursuite des développements dans Cast3M et validation par comparaison à des résultats d'essais.
- Réalisation d'essais sur la machine MUSE « froid » sur des configurations élémentaires d'usure (cylindre/plan). Simulation des expériences et comparaison avec les résultats obtenus.
- Calculs éléments finis tridimensionnels de situations « simples » (cas 2D extrudés et autres) et d'exemples calqués sur les problèmes industriels (cylindre croisés 316LN/304L). L'application finale consistera à simuler un essai (tube-alésage) réalisé sur MUSE « froid ».

Thèse, 3^{ème} année :

- Poursuite de la transposition du modèle au cas tridimensionnel.
- Finalisation du développement dans Cast3M d'une méthode numérique adaptée à la modélisation et à la simulation de l'usure
- Rédaction du manuscrit de thèse

Thèse, de la 1^{ère} à la 3^{ème} année :

- Participation à des conférences, présentations des travaux de recherche en conférence, publications dans des revues à comité de lecture.

Eléments de bibliographie

- [1] Ko PL (1997), Wear of power plant components due to impact and sliding, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 50, no 7, pp. 387-411.
- [2] Meng HC and Ludema KC (1995), Wear models and predictive equations: their form and content, *Wear* **181-183**, pp. 443-457.
- [3] Marc E (2018), Analyse de la réponse tribologique d'un contact-cylindre/plan soumis à des sollicitations de fretting sous chargement cyclique : influence d'une solution Lithium-Bore.
- [4] Maouche, N., Maitournam, M. H., & Van, K. D. (1997). On a new method of evaluation of the inelastic state due to moving contacts. *Wear*, **203**, 139-147.
- [5] Maitournam, M. H., Pommier, B., & Thomas, J. J. (2002). Détermination de la réponse asymptotique d'une structure anélastique sous chargement thermomécanique cyclique. *Comptes Rendus Mécanique*, **330**(10), 703-708.
- [6] Comte, F., Maitournam, H., Burry, P., & Nguyen, T. M. L. (2006). A direct method for the solution of evolution problems. *Comptes Rendus Mécanique*, **334**(5), 317-322.
- [7] Ladevèze P (1989). The large time increment method for the analysis of structures with non-linear behavior described by internal variables. *Comptes Rendus De L'Academie Des Sciences Serie II*, **309**(11) :1095–1099, 1989.
- [8] Fouvry S, Liskiewicz T, Paulin C (2007), A global-local wear approach to quantify the contact endurance under reciprocating-fretting sliding conditions, *Wear* **263**, pp. 518-531.
- [9] Paulin C., Fouvry S., Meunier C. (2007), Finite element modelling of fretting wear surface evolution Application to a Ti-6Al-4V contact, *Wear* **264**, pp.26-36.
- [10] S. Basseville, M. Niass, D. Missoum-Benziane, J. Leroux, G. Cailletaud (2019) Effect of fretting wear on crack initiation for cylinder-plate and punch-plane tests, *Wear* 420-421, pp. 133-148.
- [11] Akula B. R. (2019), Extended mortar method for contact and mesh-tying applications



Contacts : matthieu.breuze@cea.fr, benoit.prabel@cea.fr, christian.phalippou@cea.fr