

DESRIPTIF DU SUJET ET ARGUMENTAIRE DU DIRECTEUR DE THESE

Nom et prénom du directeur de thèse : Olivier Sénéchal (UPHF - LAMIH) et Pierre Dehombreux (UMONS)

Adresse mail : olivier.senechal@uphf.fr et pierre.dehombreux@umons.ac.be

Numéro de téléphone : 06 46 31 49 92 – (+32 499 779900)

Intitulé du sujet de thèse (en français) : *Modèles de sûreté de fonctionnement des pièces de rechange d'occasion et reconditionnées*

Résumé du sujet de thèse (Décrire en français les objectifs visés en 1500 caractères maximum) : l'utilisation de pièces de rechange d'occasion et/ou reconditionnées pour la maintenance des systèmes réparables, contribue directement au principe d'économie circulaire. La thèse portera sur le développement de modèles permettant d'appréhender les spécificités et l'évolution des caractéristiques de sécurité, de maintenabilité et de fiabilité des systèmes réparés avec ce type de pièces. Plus particulièrement il s'agira de modéliser l'état dans lequel le système se trouve à l'issue de la réparation (autre que les classiques « as good as new », « as bad as old »), le processus de dégradation que la pièce de rechange suivra (lois de dégradation génériques (linéaire, exponentielle, ...), processus aléatoires (gamma, Wiener, Markov, ...), et d'en déduire les conséquences sur l'évolution de la sûreté de fonctionnement du système réparé. Les conclusions sur cette évolution permettront d'estimer le gain environnemental réalisé par la prolongation de la durée de vie utile de l'équipement.

DESRIPTIF DU SUJET

1) *Le sujet de recherche choisi et son contexte scientifique et économique :*

Le développement de modèles permettant d'appréhender les spécificités et l'évolution des caractéristiques de sécurité, de maintenabilité et de fiabilité des systèmes réparés avec ce type de pièces fait partie des travaux de recherche menés dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, ainsi que dans le domaine de la durabilité des systèmes obtenue par des mesures de maintenance (corrective, préventive, proactive) (SENECHAL 2017) et de reconditionnement. Il contribue par ailleurs à la maîtrise technique et économique des mécanismes de l'économie circulaire.

La maintenance, la réutilisation, le reconditionnement et le recyclage sont en effet les moyens identifiés pour la mise en œuvre opérationnelle de l'économie circulaire (<https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>). Il est donc indispensable, pour s'inscrire pleinement dans ce type d'économie, d'articuler ces différents moyens en procédant à des interventions de maintenance qui utilisent des composants ré-utilisés, reconditionnés ou recyclés.

Mais les actions de maintenance, qu'elles soient correctives, préventives ou proactives, doivent être menées avec l'objectif de maîtriser et d'optimiser la sûreté de fonctionnement des objets maintenus, c'est-à-dire :

- l'aptitude de l'objet à fonctionner quand et tel que requis, son « aptitude à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données » (selon Alain Villemeur)
- la propriété qui permet aux utilisateurs du système de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre (selon Jean-Claude Laprie)

Pour obtenir cette maîtrise et cette optimisation, il est nécessaire d'utiliser des méthodes et outils d'analyse développés dans le domaine des « sciences des défaillances », et plus particulièrement d'analyse de la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité des composants et des systèmes. Ces méthodes et outils sont généralement répartis dans deux familles :

- Méthodes et outils d'analyse qualitative : Analyses préliminaires de risques, AMDEC, ...
- Méthodes et outils d'analyse quantitative : analytiques statistiques, numériques (simulations à événements discrets, méthodes de Monte Carlo...)

Les méthodes et outils d'analyse quantitative nécessitent la quantification des attributs de fiabilité, maintenabilité et sécurité des composants faisant partie du système étudié, de l'évolution de la valeur de ces attributs, cette quantification pouvant être réalisée à partir de loi paramétriques (modèles statistiques de fiabilité ou de dégradation) ou non paramétriques (construits à partir d'historiques de données

collectées).

Les spécificités et l'évolution des caractéristiques de sécurité, de maintenabilité et de fiabilité des systèmes réparés avec des pièces elles-mêmes réparées ou reconditionnées posent deux questions jusqu'à présent non résolues :

- Dans quel état l'action de réparation ou de reconditionnement restitue le composant (LETOT et al., 2017), et quelles sont les conséquences de cette action sur l'évolution de sa dégradation ou de son vieillissement (REN et al., 2021) ?
- Quelles sont les conséquences sur la sûreté de fonctionnement d'un système, de la présence en son sein de composants réparés ou reconditionnés à différents instants (KAREEM 2017) ?

Ces interrogations rejoignent celle qui motive les travaux de recherche menés dans les domaines de la régénération de systèmes (MONNIN et al., 2012) et du pronostic et de la maintenance proactive (DELMAS 2019) : quelles sont la sécurité et la durée de vie résiduelle d'un système au moment où on le répare avec des pièces de rechange réparées ou reconditionnées ?

Sur le plan économique, le marché mondial de la maintenance, de la réparation et des opérations (MRO) a atteint une valeur de 685,5 milliards USD en 2020, et devrait continuer à croître à un taux de 2,3 % au cours de la période 2022-2027 pour atteindre 787,2 milliards de dollars US en 2026 (<https://www.expertmarketresearch.com/reports/maintenance-repair-operations-mro-market#:~:text=Global%20Maintenance%2C%20Repair%2C%20and%20Operations%20%28MRO%29%20Market%20Outlook,2022-2027%20to%20reach%20USD%20787.2%20billion%20by%202026..>). En France le secteur de la maintenance représentait en 2019 70000 salariés et un chiffre d'affaire de 18 milliards d'euros.

La thèse contribuera donc à l'adaptation d'un secteur économique important et croissant aux enjeux environnementaux de la société. Par sa contribution aux économies de matière et d'énergie, les sciences et technologies de la maintenance sont appelées à être soutenues pour contribuer aux objectifs du développement durable.

2) L'état du sujet dans le laboratoire d'accueil.

Côté UMONS :

Le laboratoire de génie mécanique développe depuis vingt ans une activité de recherche en maintenance, basée sur la fiabilité statistique, les modèles de dégradation et l'analyse de données récoltées sur les lignes de production (paramètres process, données liées aux défaillances et aux interventions de maintenance, données issues du contrôle qualité). Les derniers travaux ont porté sur l'estimation des durées de vie résiduelles à partir de modèles stochastiques (lois gamma, modèles de Markov cachés, modèles PHM-Cox, ...) en vue d'utiliser les équipements au maximum de leur longévité.

Le laboratoire de génie mécanique a contribué à l'optimisation des politiques de maintenance à partir de modèles statistiques, adaptatifs en fonction de la récolte d'indicateurs de dégradation (application dans l'industrie ferroviaire, le secteur de l'usinage, machines tournantes) ou de données issues des contrôles de conformité/qualité. De nouveaux projets viennent d'être initiés avec le concours du service d'informatique, logiciel et intelligence artificielle pour tirer profit de l'analyse intelligente des données issues de lignes de production (application industrielle pour la production d'équipements composites destinés à l'industrie aéronautique). Le laboratoire collabore à de nombreux projets industriels avec les acteurs wallons (Coexpair (fabrication en aéronautique), AW Europe (automobile et électronique), ALSTOM et SNCB (ferroviaire), Fairwind (éolien), ENGIE-EQUANS (énergie), CMI (sidérurgie) et des prestataires en maintenance (I-Care, Maintenance Partners, ...).

L'intégration de critères environnementaux (bilan énergétiques, CO₂, effluents, ...) sur le cycle de vie est un nouvel objectif du service de génie mécanique pour atteindre un développement de produits viables, optimisés conjointement vis-à-vis de critères économiques et environnementaux. La complémentarité des équipes (expertise en modélisation numérique à Mons et l'expertise en maintenance basée sur les critères environnementaux à Valenciennes) atteste de la valeur ajoutée de ce projet de recherche.

Côté UPHF-LAMIH :

Depuis une dizaine d'années, des chercheurs du LAMIH travaillent sur l'aide à la décision en maintenance basée sur des critères de performance durable, sur le pronostic et sur la maintenance proactive. Les travaux développés sur ces sujets ont fait l'objet de communication dans plusieurs conférences internationales (*IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, *IFAC AMEST Workshop on Maintenance Technologies for Performance Enhancement*, *International Conference on*

Production Research, International Workshop Advances in Cleaner Production) et de publications dans plusieurs revues internationales (*International Journal of Cleaner Production, Environmental Impact Assessment Review*). Ils ont également permis la rédaction d'un article à destination des ingénieurs dans la revue « Techniques de l'ingénieur ».

En novembre 2021, le LAMIH a par ailleurs bénéficié de l'accord de la région Hauts-de-France pour le cofinancement sur 3 ans du projet SADeMMaR (Sensibilisation- Accompagnement et aide à la Décision des Ménages dans le processus de Maintenance et Réparation) financé par le Conseil Régional Hauts-de-France dans le cadre du dispositif STIMuE (Soutien aux Travaux Interdisciplinaires, Multi-établissements et Exploratoires) Volet Partenarial STIP. Ce projet mené en partenariat avec d'autres universités et des entreprises de la région, a pour but de répondre à la problématique suivante :

- Comment lever les freins techniques, sociologiques, économiques et psychologiques à la réparation, et plus globalement à la maintenance (corrective, avec ouverture vers la maintenance) des produits de consommations et biens d'équipements ?
- Comment adapter les méthodes scientifiques requises pour chaque étape du processus de détection/diagnostic/réparation, aux caractéristiques des biens d'équipement et des profils des utilisateurs visés ?
- Quelle chaîne de valeur à mettre en place pour intégrer le processus de réparation des biens d'équipement dans un modèle économique résilient et durable ?

Des interactions entre la thèse proposée et ce projet sont fortement souhaitables car SADeMMaR permettra au doctorant de recueillir des données inhérentes à certains objets techniques et à leurs caractéristiques de sûreté de fonctionnement suite à réparation, et la thèse apportera des éléments de réponse aux deux premières questions :

- Les freins techniques, psychologiques et économiques étant liés à la sûreté de fonctionnement des objets réparés (fiabilité, sécurité après réparation...impact environnemental de la réparation...confiance accordée aux objets réparés...coût du cycle de vie de l'objet réparé)
- Les étapes de détection/diagnostic/réparation étant réalisées sur la base de modèles de comportement et de lois de fiabilités pouvant résulter de la thèse.

3) Les objectifs visés, les résultats escomptés.

Le principal objectif est de fournir aux acteurs des processus de maintenance et de reconditionnement, des modèles qui leur permettront d'orienter leurs actions vers une économie circulaire garantissant les mêmes résultats en termes de sûreté de fonctionnement, qu'une traditionnelle économie linéaire basée sur l'usage de composants et produits neufs.

Plus précisément, les modèles proposés permettront d'estimer la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité de fonctionnement des produits issus de cette économie circulaire. De ces estimations, les utilisateurs des modèles proposés pourront réaliser des bilans économiques et environnementaux du fonctionnement de ces produits.

Les professionnels de la maintenance, mais aussi les industriels orientant leurs modèles économiques vers le remanufacturing, ou encore les particuliers ayant le réflexe de réparer grâce aux résultats du projet SADeMMaR, pourront bénéficier des résultats opérationnels de la thèse.

4) Les collaborations prévues (préciser le cadre, la nature des collaborations, l'ancrage régional, national, international, la transdisciplinarité éventuellement).

Les deux partenaires ont déjà collaboré dans de nombreux cadres (missions à l'étranger, organisations de manifestations scientifiques (par exemple le colloque PENTOM, voir <https://www.babnet.net/rttdetail-2471.asp>), participation à des groupes de recherche (par exemple

<https://sites.google.com/site/qtmacsh2m/>) ou encore des participations réciproques à des jurys de thèses. Des communications et publications seront réalisées conjointement par les partenaires, ainsi que des participations aux différents groupes de recherche nationaux et internationaux travaillant sur le sujet traité. Chaque partenaire accueillera le doctorant sur la moitié de la durée de la thèse.

5) Une liste de 10 publications maximum portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire.

- REN X-Q., CHEN C., RAN X-K., LI Y-X., ZHANG X-G.,** [Microstructure evolution of AA5052 joint failure process and mechanical performance after reconditioning with tubular rivet](#), *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Volume 31, Issue 11, 2021, Pages 3380-3393, ISSN 1003-6326,
- COLANTONIO L., EQUETER L., DEHOMBREUX P., DUCOBU F.,** [A Systematic Literature Review of Cutting Tool Wear Monitoring in Turning by Using Artificial Intelligence Techniques](#)" in *Machines*, 9, 351, 1-54, 10.3390/machines9120351 (2021)
- EQUETER L., DUCOBU F., DEHOMBREUX P.,** [Cutting Tools Replacement: Toward a Holistic Framework](#), in *IFAC-PapersOnLine*, 53, 3, 227-232 (2020)
- DELMAS A.,** [Contribution à l'estimation de la durée de vie résiduelle des systèmes en présence d'incertitude](#), Thèse de l'Université de Technologie de Compiègne, Avril 2019.
- DUTOIT C., DEHOMBREUX P., RIVIERE E., EQUETER L.,** [Statistical Process Control and Maintenance Policies for Continuous Production Systems Subjected to Different Failure Impact Models: Literature Review](#)" in *Procedia CIRP* (2019)
- KAREEM B.,** [Mechanical failure analysis of automobile crankshafts under service reconditioned modelling approach](#), *Engineering Failure Analysis*, Volume 80, 2017, Pages 87-101, ISSN 1350-6307,
- LETOT C., EQUETER L., DUTOIT C., DEHOMBREUX P. (2017).** [Updated Operational Reliability from Degradation Indicators and Adaptive Maintenance Strategy](#). *10.5772/intechopen.69281.*
- LETOT C., DEHOMBREUX P., FLEURQUIN G. LESAGE A. (2017).** [An adaptive degradation-based maintenance model taking into account both imperfect adjustments and AGAN replacements](#). *Quality and Reliability Engineering*. 1-15. 10.1002/qre.2166.
- SENECHAL O. (2017).** [Research directions for integrating the triple bottom line in maintenance dashboards](#). *Journal of Cleaner Production*, 142 (part 1), pp. 331-342. [IF=5.715][DOI=10.1016/j.jclepro.2016.07.132]
- MONNIN M., IUNG B., SENECHAL O. (2012).** [Regeneration Engineering for improving Technical Asset Life Cycle: an application to weapon systems availability assessment](#). *International Journal of Strategic Engineering Asset Management*, 1(1), pp. 61-90.