

# Offre de thèse - Arts et Métiers & Mines Saint-Etienne

## Titre :

Amélioration de la fiabilité des systèmes de production reconfigurables - de la conception à la surveillance

**Contexte** – L'amélioration des performances de fiabilité des systèmes de production reconfigurables, qui sont proposées pour répondre à des enjeux de productivité, de flexibilité et d'adaptabilité, repose sur une approche intégrée qui englobe trois aspects clés : la modélisation afin de décrire les états de reconfiguration et de défaillances, la conception modulaire permettant de sélectionner les configurations et optimiser un plan de production et le diagnostic des systèmes, permettant de détecter les anomalies et prédire les défaillances en se basant sur des techniques adaptatives et les technologies avancées et intelligentes et l'émergence des concepts de l'industrie 4.0.

**Problématique** – Pour les industries manufacturières de forte cadence et les systèmes de production qui sont de plus en plus complexes (reconfigurations, diversité de produits et exigences de flexibilité et de fiabilité, enjeux de durabilité...) et qui atteignent un niveau élevé de maturité en matière d'automatisation, les outils classiques de choix de conception, sélection des configurations et de contrôle des process et de détection des leurs anomalies ne sont plus adaptées pour des actions en temps réel tout en garantissant un niveau de fiabilité élevée. Des nouveaux développements et outils intégrant les données process et les concepts de jumeaux numériques avec leurs apports de fiabilité et de frugalité, soutiennent la re(évolution) des modèles traditionnels vers le paradigme « Factory of the future ». Cette transformation conduit à l'élaboration d'outils dynamiques, intelligents et reconfigurables assurant l'évaluation et l'amélioration des performances des systèmes et l'augmentation de leurs productivités et en considérant toute la chaîne de valeur du cycle de vie d'un produit manufacturier. Ainsi, l'objectif de cette thèse de proposer une méthodologie générique pour l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité des systèmes de production reconfigurables (RMS). L'impact des choix de configurations du système sur les performances de fiabilité du système sera quantifié et analysée pour différents modes de défaillances et en considérant les objectifs en termes de coût. Avec l'émergence des techniques de surveillances basées sur les données et les outils intelligents, il est possible de diagnostiquer le système et identifier ses possibles anomalies en combinant les modèles enrichis par les données/caractéristiques des produits modulaires et les informations sur la conception et l'organisation du système. Ce diagnostic doit ensuite permettre d'utiliser les capacités de reconfiguration du RMS pour réduire leur impact.

## 1. Présentation détaillée du projet de thèse

Avec l'émergence de l'Industrie 4.0 et les défis liés à l'intensification de la concurrence mondiale, à une demande fluctuante et au besoin d'adapter les cycles de vie des produits et de les réduire, les systèmes de production (ou ligne de production) reconfigurables (RMS) ont été développés pour offrir une capacité de production et l'agilité, la flexibilité (Koren *et al.*, 2018). Ces systèmes disposent des caractéristiques requises pour répondre à la diversité des produits (ou des familles de produits), aux évolutions des processus et aux attentes en termes de qualité et de fiabilité, en tirant parti de caractéristiques clés comme la modularité et la diagnosticabilité (Zhang *et al.*, 2020). La modularité se traduit par la capacité du système à utiliser différentes combinaisons d'outils, machines et modules. La diagnosticabilité permet quant à elle de détecter les défaillances des machines et les dysfonctionnements des process. Pour autant, les questions liées à la fiabilité ou à la diagnosticabilité des RMS sont jusqu'à maintenant très peu traitées dans la littérature (Bortolini *et al.*, 2018).

La conception du RMS, qui spécifie les composants et les opérations nécessaires à la production, est généralement abordée comme un problème d'optimisation, avec des objectifs de coût, temps, scalabilité et durabilité. Elle reste un processus complexe qui nécessite des prises de décision importantes et adaptées afin de répondre aux exigences de performances globales. La fiabilité des RMS, comme un indicateur de performance essentiel, notamment son évaluation et son amélioration, lors de la génération des configurations

et de l'exploration de son espace de conception, demeure un défi à relever. La fiabilité d'un système se définit et s'évalue par l'analyse des modes de défaillance et de leurs impacts (Dahane et Benyoucef, 2016). Elle se mesure principalement par la capacité à anticiper la dégradation des systèmes ou de leurs composants au fil du temps. Les modes de défaillance désignent les mécanismes par lesquels les outils ou équipements subissent une dégradation, entraînant un arrêt de la production jusqu'à ce qu'une maintenance puisse être réalisée. Pour aborder les problématiques de fiabilité, plusieurs modèles, notamment les modèles probabilistes (tels que Weibull et Exponentiel), l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), ainsi que les modèles de chaînes de Markov peuvent être proposés.

L'objectif principal de cette proposition est de développer une méthodologie générique pour améliorer la fiabilité des RMS, depuis la phase de conception jusqu'à la phase de son monitoring ou contrôle. Les principaux verrous scientifiques se résument comme suit :

- Co-conception modulaire et génération de configurations pour les RMS : La proposition de critères permettant d'évaluer la fiabilité d'un système en cours de conception, et donc pour lequel il n'existe pas nécessairement un historique suffisant des défaillances des différents composants, est un préalable au développement d'approches d'optimisation intégrant cette dimension dès la conception. Ces approches devront en outre rechercher un compromis entre le coût du système, sa fiabilité mais aussi sa scalabilité de manière à pouvoir fournir de manière proactive des leviers d'action utilisables en cas de défaillance détectée ultérieurement par la surveillance.
- Surveillance des processus basée sur les données d'inspection en temps réel et les paramètres de conception : les données d'inspection en ligne seront utilisées pour détecter en temps réel les anomalies de la ligne de production. Un modèle adaptatif sera développé pour identifier les changements significatifs dans les données en cours de fonctionnement, garantissant ainsi une prise de décision efficace pour améliorer la productivité, la robustesse et la fiabilité des RMS. Ces données alimenteront également des jumeaux numériques.
- Reconfiguration du système pour pallier aux défaillances observées ou prévues grâce à la surveillance. Une approche d'optimisation dynamique devra permettre de déterminer comment adapter les processus (déplacement ou ajout de machine, changement d'outils, ...) en s'appuyant sur la scalabilité des RMS. À partir d'une configuration initiale, plusieurs schémas de reconfiguration candidats peuvent être générés (différents compromis entre le nombre d'étages de production, le nombre de machines par étage, les caractéristiques de fiabilité des équipements de traitement et de manutention). L'évaluation de ces alternatives à l'aide de techniques analytiques (analyse de réseau de files d'attente) et/ou de simulations dans un environnement de jumeau numérique par exemple, doit permettre une boucle de rétroaction fermée basée sur des données opérationnelles.

La proposition est décomposée en plusieurs tâches, chacune abordant un type de problème spécifique avec des méthodologies dédiées :

- T1 : Spécification des besoins nécessaires en matière de performances de fiabilité dans l'optimisation des RMS : Analyse et synthèse bibliographique complète des approches scientifiques et méthodologiques liées à la sélection de configuration des systèmes ou lignes de production, à la modélisation des systèmes et aux paramètres de conception et leurs impacts sur la fiabilité des systèmes
- T2 : Développement et mise en œuvre de la co-conception modulaire et de la génération de configurations afin d'assurer l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité. Plusieurs approches d'optimisation basées sur les chaînes de Markov ou les réseaux de Petri avec l'intégration de différentes distributions des modes de défaillances, peuvent être implémentées et comparées pour la modélisation du système.
- T3 : Développement et mise en œuvre de modèles dynamiques pour la prise de décision en temps réel. L'utilisation de méta-modèles basés sur les données et de jumeaux numériques peut être considérée pour la surveillance en temps réel, et l'optimisation dynamique peut permettre de déterminer quelles reconfigurations mettre en œuvre pour pallier aux défaillances.
- T4 : Dissémination scientifique

## 2. Présentation détaillée du projet de thèse en anglais

### Reliability Improvement for Reconfigurable Manufacturing System – from Design to Monitoring

With the advancement of Industry 4.0 and the challenges of increasing global competition, rising volatility of demand and shortening product life cycles, Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) have been developed to provide agility and adaptability in production, when addressing product variety, changing and improving in process and addressing the ever-increasing customer expectations, leveraging its critical aspects of modularity and diagnosability (Koren et al., 2018) (Zhang, 2020). The modularity characteristic refers to the adaptability of the system to perform variety of operations by combinations of different tools, machines and modules, ensuring complexity management and accommodating uncertainties. Process planning specifies components and operations needed in the production and it is generally investigated through optimization problems balancing cost, time and scalability. The diagnosability characteristic enables detecting machines failures and process faults. RMS reliability was emphasized as a critical performance indicator when dealing with optimal selection of configurations and design space exploration. However, issues related to the reliability or diagnosability of RMS have so far received very little attention in the literature (Bortolini et al., 2018).

Reliability of any system is defined and assessed through the analysis of failure modes and failure impacts. It is typically viewed as the ability to predict degradation in systems or components over time. Failure modes refer to degradation in tools which when it occurs, require a manufacturing system downtime until maintenance can be performed (Dahane, 2016). Various models have been proposed to deal with reliability issues, including probabilistic models such as Weibull, Exponential..., FMEA and Markov Chain models.

The main objective of the proposal is to develop a generic methodology to address reliability improvement of RMS from the design to monitoring phases. The main scientific issues to deal are summarized as the following:

- **Modular co-design and configuration selection of RMS** - In order to support a successful evolution of the RMS ecosystem over time, a focus on the modularity and re-use of simulation models, as well as on the question of data-driven design change will be made. While the traditional initial configuration process is based on future planning periods, the reconfiguration problem addresses the transition from the current period to the next. Starting with an initial configuration, several candidate reconfiguration schemes must be generated using configuration design techniques that involve trade-offs between the number of production stages, the number of machines in each stage, the speeds and reliability characteristics of processing and material handling equipment, production throughput..., must then be estimated for each alternative, using analytical techniques such as queueing network analysis, and/or simulation, in a "Digital Twin" setting. For this purpose, and based on multi-objective trade-off studies, a closed loop data feedback of operational data and related data-enhanced optimization solution will allow for a targeted re-design of the chosen configurations.
- **Process monitoring based on data-inspection gathered for modular products and design information** - In-line inspection data will be used to detect process or product anomalies in real-time. Consequently, an adaptive model to identify significant changes in data during system operation and ensure efficient decision making to enhance RMS productivity, robustness and reliability. The in-line data will also be used to feed model-based digital twins developed for RMS. The digital twins are bi-directional and feed-back possible process adjustments, such as optimized adjustments of locators or welding sequences to improve, etc.
- **System reconfiguration to mitigate observed or predicted failures through monitoring:** A dynamic optimization approach will enable determining how to adapt processes (relocating or adding machines, changing tools, etc.) by leveraging RMS scalability. Starting from an initial configuration, multiple candidate reconfiguration schemes can be generated (various trade-offs between the number of production stages, the number of machines per stage, and the reliability characteristics of processing and handling equipment). The evaluation of these alternatives using analytical techniques (such as queueing network analysis) and/or simulations in a digital twin environment should enable a closed-loop feedback based on operational data.

The proposal is divided into tasks. This division aims at considering separately three kinds of problems that involves each different type of methodologies:

- T1: Specification of f Reliability Performance Requirements in RMS Optimization (comprehensive literature review and analysis of the scientific approaches related to system or production line configuration selection and optimization, system modelling and design parameters and their impacts on system reliability, ...)
- T2: Development & implementation of modular co-design and configuration selection to ensure reliability evaluation and improvement; some approaches like Markov chain methods, Petri-net could be employed as relevant mathematical tools that describe a system' future behavior based on its current state.
- T3: Development & implementation of dynamic model for real time decision-making for reliability improvement, data driven models and digital concepts can be considered to mitigate failures
- T4: Dissemination

### 3. Références bibliographiques

- [1] Khan, A. S., Homri, L., Dantan, J. Y., & Siadat, A. (2021). Modularity-based quality assessment of a disruptive reconfigurable manufacturing system-A hybrid meta-heuristic approach. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115(5), 1421-1444.
- [2] Zhang, T., Homri, L., Dantan, J. Y., & Siadat, A. (2023). Models for reliability assessment of reconfigurable manufacturing system regarding configuration orders. Reliability Engineering & System Safety, 231, 109035.
- [3] Stief, P., Burgat, G., Pour-Massahian-Tafti, M., Dantan, J. Y., & Siadat, A. (2023). A pragmatic optimization-based approach for analysis and configuration of a reconfigurable multi-product assembly line in the automotive industry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 129(9), 3993-4010.
- [4] Ostovari, A., Benyoucef, L., Haddou Benderbal, H., & Delorme, X. (2024). Enhancing scalable reconfigurable manufacturing systems through robust optimisation: energy efficiency and cost minimisation under uncertainty. International Journal of Production Research, 1-26.
- [5] Cerqueus, A., & Delorme, X. (2023). Evaluating the scalability of reconfigurable manufacturing systems at the design phase. International Journal of Production Research, 61(23), 8080-8093.
- [6] Zhang, Y., Zhao, M., Zhang, Y., Pan, R., & Cai, J. (2020). Dynamic and steady-state performance analysis for multi-state repairable reconfigurable manufacturing systems with buffers. European Journal of Operational Research, 283(2), 491-510.
- [7] Dahane, M. & Benyoucef, L. (2016). An adapted NSGA-II algorithm for a Reconfigurable manufacturing system (RMS) design under machines reliability constraints. Metaheuristics for Production Systems; 60: 109-130.
- [8] Zhao, J., Si, S., & Cai, Z. (2019). A multi-objective reliability optimization for reconfigurable systems considering components degradation. Reliability Engineering & System Safety, 183, 104-115.
- [9] Koren, Y., Gu, X. & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. Frontiers of Mechanical Engineering, 13(2): 121-136.
- [10] Bortolini, M., Galizia, F. G. & Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. Journal of Manufacturing Systems 49 (2018) 93-106.

### Contact

Lazhar HOMRI [lazhar.homri@ensam.eu](mailto:lazhar.homri@ensam.eu)

**Candidature - Joindre : un CV détaillé, le relevé de notes du M2 ou ingénieur et une lettre de motivation**

**Date limite 30/5/2025**