

# Proposition de sujet de thèse : Optimisation pour les Systèmes de Production Reconfigurables

## Résumé :

Les entreprises manufacturières doivent faire face à une concurrence toujours accrue et des clients de plus en plus exigeants, demandant des produits personnalisés au prix de la production de masse. Pour survivre dans ce contexte de grande variabilité de la demande, l'agilité et la flexibilité du système de production est une nécessité. S'inscrivant dans le paradigme d'usine du futur, les systèmes de production reconfigurables semblent être une des réponses à cette problématique. Ces systèmes sont capables de se déplacer dans l'atelier pour former rapidement une implantation optimale pour une production donnée, et de se reconfigurer ensuite pour la production suivante. Une des difficultés majeures est de savoir quelle implantation mettre en place et quand. Les recherches actuelles sont focalisées sur des systèmes totalement nouveaux et parfaits, ce qui ne facilite pas leur intégration dans des ateliers où il existe souvent un existant (des machines plus anciennes et donc fixes) et des contraintes (obstacles, espace limité...). L'objectif de cette thèse est de proposer une méthode d'ordonnancement prenant en compte la possibilité de réimplantation de ces systèmes en intégrant des contraintes des ateliers existants.

**Mots-clés:** Systèmes de Production Reconfigurables; Recherche Opérationnelle ; Industrie 4.0 ; Ordonnancement ; Implantation d'Atelier.

## Fiche de poste

**Candidat:** Bac+5 en génie industriel ou informatique,  
Esprit de synthèse,  
Bon niveau d'anglais (C1),  
Connaissances en gestion de production (planification, ordonnancement, implantation d'atelier...),  
Connaissances en recherche opérationnelle (programmation linéaire, programmation par contraintes...),  
Compétences en développement informatique (C++)

**Candidature:** envoyer CV + lettre de motivation à [julien.le-duigou@utc.fr](mailto:julien.le-duigou@utc.fr) et [antoine.jouglet@hds.utc.fr](mailto:antoine.jouglet@hds.utc.fr)  
**avant le 15 mai 2020.**

**Localisation:** Le candidat effectuera sa thèse à l'Université de Technologie de Compiègne aux laboratoires Roberval et Heudiasyc.

**Date de début de la thèse:** Septembre/octobre 2020

**Financement:** bourse ministérielle

## Contacts :

**Julien Le Duigou**  
Associate Professor  
Roberval Mechanical Lab  
Department of Mechanical Engineering,  
Sorbonne Universités, Université de  
Technologie de Compiègne  
e-mail : [julien.le-duigou@utc.fr](mailto:julien.le-duigou@utc.fr)

**Antoine Jouglet**  
Professor  
Heudiasyc Lab  
Department of Computer Sciences and  
Engineering,  
Sorbonne Universités, Université de  
Technologie de Compiègne  
e-mail : [antoine.jouglet@hds.utc.fr](mailto:antoine.jouglet@hds.utc.fr)

## Descriptif du sujet

### **Sujet de recherche et contexte scientifique :**

Ce projet de thèse s'inscrit dans la stratégie Industrie 4.0 développée originellement par l'ACATECH en 2011 et repris dans différentes initiatives au plan mondial : Usine du Futur (FR), High Value Manufacturing (UK), Factories of the Future (EU), Smart Manufacturing (USA), Made in China 2025 (CN). Depuis 2015, cette stratégie est portée au plan français par l'Alliance Industrie du Futur. Ce projet rentre dans l'axe prioritaire transition numérique, en travaillant à la transition numérique des entreprises industrielles en général, et des petites et moyennes entreprises (PME) en particulier. Il est en phase avec l'axe de la stratégie nationale de recherche « Stimuler le renouveau industriel » et positionné en cohérence avec les travaux du GIS S.mart (Systems, Manufacturing, Academics, Resources, Technologies), de SAGIP (Société d'Automatique, de Génie Industriel et de Productique, émanent du GDR CNRS MACS) et de l'AFM (Association Française de Mécanique), et avec les feuilles de route technologiques et industrielles telles que celle de l'Alliance Industrie du Futur ...

Les systèmes de production reconfigurables (Reconfigurable Manufacturing Systems RMS) sont "conçus dès le départ pour permettre une évolution rapide de la structure, ainsi que des composants matériels et logiciels, afin d'ajuster rapidement la capacité de production et les fonctionnalités au sein d'une famille de pièces en réponse à des changements soudains du marché ou des exigences réglementaires" (Koren, 1999). Du point de vue industriel, peu d'exemples d'introduction de ces nouveaux systèmes de production dans les entreprises sont pour l'instant disponibles. De plus, la littérature actuelle manque de pratiques exemplaires qui poussent les entreprises industrielles à faire la transition vers ce nouveau paradigme industriel. Le plus grand obstacle à l'application de la fabrication reconfigurable est la résistance au changement, surtout de la part des PME (Matt et al. 2015).

La demande croissante de produits très variés et personnalisés a contribué à renforcer l'importance des systèmes de fabrication reconfigurables. Le RMS est conçu pour être rapidement modifié afin d'ajuster sa capacité de production et sa fonctionnalité, pour répondre aux variations brusques des besoins du marché (Bi et al. 2008). Cette flexibilité du RMS est liée à sa reconfigurabilité (Mittal et al. 2017), qui dépend de six caractéristiques clés : la modularité, la convertibilité, la diagnostabilité, la personnalisation, l'extensibilité et l'intégrabilité.

Un RMS est reconfigurable, ce qui inclut la reconfiguration des machines, par le biais de changements de modules auxiliaires, ainsi que leur disposition, par le biais du repositionnement de la machine. Ces modifications peuvent affecter considérablement les coûts et doivent donc être intégrées lors de la planification de la production. De nombreux articles scientifiques traitant de RMS se sont concentrés sur cette planification (Fernandes et al., 2018). La grande majorité des ouvrages trouvés dans la littérature traitent des problèmes d'optimisation. Leurs fonctions objectif représentent principalement des minimisations de coûts, qui se répartissent en trois grands types :

1. Coûts en capital : la minimisation des coûts en capital est liée à l'investissement nécessaire pour répondre aux demandes du marché (Dou et al., 2016).
2. Coûts de reconfiguration : principalement liés à l'affectation des machines et à la configuration des machines pour réduire les coûts de changement de production d'un produit au sein d'une même famille (Xiaowen et al., 2013).
3. Coûts de production : principalement axé sur la minimisation du coût de multiplication des produits au sein d'une famille (Saxena et Jain, 2012).

D'autres fonctions objectif existent, elles sont principalement liées au temps et à la consommation d'énergie.

Les méthodes utilisées pour résoudre ces problèmes d'optimisation ont généralement utilisé des modèles combinatoires à variables multiples et multicritères en utilisant des variables discrètes (Campos et al. 2019). Plusieurs techniques d'optimisation ont été proposées pour résoudre ces problèmes, parmi lesquelles les méta-heuristiques qui sont les plus utilisées, les problèmes à résoudre étant NP-difficiles. Les algorithmes

génétiques NSGA-II étaient les méthodes les plus appliquées pour résoudre les problèmes de planification RMS multi-objectifs. Ils ont prouvé leur efficacité pour trouver des solutions presque optimales lors de la sélection de la configuration de la machine et de la séquence du processus en RMS.

Ces modélisations et ces algorithmes ont permis de grandes avancées, mettant en évidence la pertinence des RMS pour les productions sur des marchés avec une forte variabilité et les produits personnalisés. Cependant, les modèles sont très idéalisés. En effet, ils ne prennent que peu en compte l'existant, notamment au niveau de l'atelier qui est vu soit comme idéal, soit comme créé pour la mise en œuvre des RMS. Or, ces idéalizations simplifient trop fortement la prise en compte des coûts (notamment liés aux transports et aux déplacements des machines) et peuvent mener à des implantations non réalisables, ce qui diminue l'appropriation et la mise en œuvre de ces systèmes qui doit se faire progressivement.

### ***Les objectifs visés, les résultats escomptés***

L'objectif de travail est double : il comporte une partie modélisation et une partie résolution.

Le modèle mathématique doit permettre la modélisation du problème d'ordonnement par minimisation des coûts en prenant compte la possibilité de changement de l'implantation de l'atelier due aux RMS. Les coûts classiquement pris en compte sont les coûts de matière première, les coûts d'opération, les coûts de transport, les coûts de changement de séries et les coûts de changement de configuration et de changement d'implantation. Il sera possible d'aller vers une optimisation multi-objectif en différenciant les coûts et les délais. Le modèle prendra également en compte l'existant, notamment au niveau de l'atelier, c'est-à-dire l'espace disponible (généralement considéré comme illimité, sans obstacles ni chemins dans les travaux existants), et les machines existantes (qui ne sont pas forcément mobiles).

Concernant la résolution, une première phase visera à élaborer une méthode exacte, afin d'avoir un premier point de repère et de dégager les propriétés qui permettent de caractériser les solutions pertinentes. Il est envisagé d'utiliser des techniques de programmation mathématique et de programmation par contraintes. Sur la base de ces résultats, il s'agira dans un deuxième temps d'élaborer des méthodes approchées qui devront permettre d'obtenir des résultats dans un laps de temps suffisamment court pour être utilisées en conditions réelles. Différentes méthodes pourront être testées, comme les algorithmes génétiques ou encore les essais particuliers ou des méthodes hybrides.

Les résultats escomptés sont une meilleure prise en compte de l'existant dans les ateliers, avec des algorithmes spécifiques qui permettent de résoudre les situations d'ordonnements spécifiques aux RMS (prenant en compte la capacité de reconfiguration) avec des modèles non idéalisés. Les objectifs industriels sont une meilleure intégration des RMS dans les ateliers actuels et permettre un gain en flexibilité des entreprises pour une plus grande compétitivité.

### ***Programme de recherche et livrables associés***

Ce planning est ici à titre indicatif :

- Etude bibliographique : étude de l'existant concernant les systèmes de production reconfigurables, les applications actuelles et leurs limites. Elle comprendra à la fois une étude bibliographique et une étude de l'existant chez les industriels. Les domaines suivants devront être explorés dans ce sens : RMS, implantation d'atelier, ordonnancement...
- Développement des modèles mathématiques : élaboration des modèles mathématique (fonction objectif, contraintes...) avec différents niveaux de complexité (atelier de formes complexes, machines de formes complexes, obstacles, prise en compte des vitesses des convoyeurs, prise en compte des vitesses de déplacement des machines...)
- Développement des algorithmes d'optimisation : les algorithmes d'optimisation à mettre en place peuvent prendre 2 formes : résolution exacte (programmation par contrainte, programmation mathématique (simplexe)...) afin d'obtenir l'optimal ; résolution approchée (utilisant des heuristiques et méta-heuristiques) avec des algorithmes génétiques, des essais particuliers ou des méthodes hybrides permettant d'obtenir un résultat dans un temps réel (au sens de l'usine).

- Validation sur des cas d'études : utilisation de cas d'études avec l'ensemble des informations nécessaires au test à l'échelle 1 (nombres de pièces, gammes de fabrication, nombres de machines...).

Années	Livrables
1ère année	<ul style="list-style-type: none"> <li>• État de l'art scientifique</li> <li>• Définition des cas d'études académique et industriel</li> </ul>
2ème année	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modélisation mathématique du problème</li> <li>• Résolution du problème :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Résolution exacte</li> <li>2) Résolution approchée</li> </ol> </li> </ul>
3ème année	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en œuvre des études de cas</li> <li>• Manuscrit et soutenance de thèse</li> </ul>

Au cours de la première année, les travaux issus de l'état de l'art feront l'objet d'une publication dans le cadre d'une conférence à audience nationale (S.mart, ROADEF...). Les travaux développés durant la deuxième année ont vocation à être publiés au sein de conférences internationales s'intéressant aux systèmes de production reconfigurables comme CIRP Manufacturing Systems ou IFIP Advances in Production Management Systems. Enfin, pour la troisième année, les travaux feront l'objet d'une publication dans le cadre d'une revue internationale telle que Journal of Manufacturing Systems ou International Journal of Production Research.

### Références bibliographiques

- Z. M. Bi, S. Y. T. Lang, W. Shen, and L. Wang, 'Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art', *International Journal of Production Research*, vol. 46, no. 4, pp. 967–992, 2008.
- Campos Sabioni, R., Daaboul, J., Le Duigou, J. Integration of modular product design and Reconfigurable Manufacturing Systems configuration: a systematic literature review. *International Journal of Production Research* (soumis)
- Campos Sabioni R., Daaboul, J., Le Duigou, J. (2019). Ontology development to support integrated modular design for Mass Customization. *16<sup>ème</sup> Colloque national S.mart*, 3-5 April 2019, Les Karellis, France.
- J. Dou, J. Li, and C. Su, 'Bi-objective optimization of integrating configuration generation and scheduling for reconfigurable flow lines using NSGA-II', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 5–8, pp. 1945–1962, 2016.
- Fernandes Paes, I., Campos Sabioni, R., Daaboul, J., Le Duigou, J. (2018). Product and process modular design : a review. *8th International Confernece on Mass Customization and Personalization*, 19-21 September 2018, Novi Sad, Serbia.
- Koren Y, Heisel U, Jovane F, Moriwaki T, Pritschow G, Ulsoy G, et al. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP annals—manufacturing technology*, vol. 48, no. 2, pp. 527–40, 1999.
- Matt D, Rauch E, Dallasega P. Mini-factory—a learning factory concept for students and small and medium sized enterprises. *Procedia CIRP*, vol 17, pp. 178–83, 2015.
- K. K. Mittal, P. K. Jain, and D. Kumar, 'Configuration selection in reconfigurable manufacturing system based on reconfigurability', *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 27, no. 3, p. 363, 2017.
- L. K. Saxena and P. K. Jain, 'A model and optimisation approach for reconfigurable manufacturing system configuration design', *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 12, pp. 3359–3381, 2012.
- X. Xiaowen, Z. Beirong, and X. Wei, 'Configuration Optimization Method of Reconfigurable Manufacturing Systems', *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 6, no. 8, pp. 1389–1393, 2013.