

Titre de la thèse : Application des techniques d'intelligence artificielle à la résolution du problème d'ordonnancement dynamique pour un atelier type « job shop flexible » dans le contexte de l'industrie 5.0 / *Application of artificial intelligence techniques to the resolution of the dynamic scheduling problem for a "flexible job shop" in the context of industry 5.0*

Domaines scientifiques : *Génie Industriel, Intelligence artificielle, Industrie 5.0*

Mots-clefs : *Ordonnancement dynamique, Job-shop, intelligence artificielle,*

Scientific domains: *Industrial Engineering, Artificial Intelligence, Industry 5.0*

Keywords : *Dynamic scheduling, Job-shop, artificial intelligence*

Encadrement :

- **Directeur de thèse :**
Bélahcène MAZARI – Directeur Recherche & Innovation de CESI
- **Co-directeur ou co-encadrant (s) :**
Houda TLAHIG, Enseignant-chercheur LINEACT/CESI
Belgacem BETTAYEB, Enseignant-chercheur LINEACT/CESI

Contexte

Positionnement du laboratoire

LINEACT CESI (EA 7527), Laboratoire d'Innovation Numérique pour les Entreprises et les Apprentissages au service de la Compétitivité des Territoires, anticipe et accompagne les mutations technologiques des secteurs et des services liés à l'industrie et au BTP. La proximité historique de CESI avec les entreprises est un élément déterminant pour nos activités de recherche, et a conduit à concentrer les efforts sur une recherche appliquée proche de l'entreprise et en partenariat avec elles. Une approche centrée sur l'humain et couplée à l'utilisation des technologies, ainsi que le maillage territorial et les liens avec la formation, ont permis de construire une recherche transversale ; elle met l'humain, ses besoins et ses usages, au centre de ses problématiques et aborde l'angle technologique au travers de ces apports.

Sa recherche est organisée selon deux thèmes scientifiques interdisciplinaires et deux domaines applicatifs.

- Le thème 1 "Apprendre et Innover" relève principalement des Sciences cognitives, Sciences sociales et Sciences de gestion, Sciences et techniques de la formation et celles de l'innovation. Les principaux objectifs scientifiques visés par ce thème sont la compréhension des effets de l'environnement, et plus particulièrement des situations instrumentées par des objets techniques (plateformes, ateliers de prototypage, systèmes immersifs...) sur les processus d'apprentissage, de créativité et d'innovation.
- Le thème 2 "Ingénierie et Outils Numériques" relève principalement des Sciences du Numérique et de l'Ingénierie. Les principaux objectifs scientifiques de ce thème portent sur la modélisation, la simulation, l'optimisation et l'analyse de données de systèmes industriels ou urbains. Les travaux de recherche portent également sur les outils d'aide à la décision associés et sur l'étude des jumeaux numériques couplés à des environnements virtuels ou augmentés.

Ces deux thèmes développent et croisent leurs recherches dans les deux domaines applicatifs de l'Industrie du Futur et de la Ville du Futur, soutenues par des plateformes de recherche, principalement celle de Rouen dédiée à l'Usine du Futur et celles de Nanterre dédiée à l'Usine et au Bâtiment du Futur.

Positionnement du centre porteur du projet

Le travail de recherche proposé dans le cadre de cette thèse fait suite à un travail de collaboration entre les centres CESI de Lyon et CESI de Lille sur l'utilisation des approches type simulation à évènement discret pour l'évaluation des règles d'ordonnancement dynamique dans le cadre d'un atelier à cheminement multiple (job-shop) [1].

Le problème d'ordonnancement au sein d'un atelier manufacturier est un domaine de recherche actif depuis de nombreuses années qui fait appel à de multiples disciplines scientifiques telles que le génie des systèmes industriels, la recherche opérationnelle, et plus récemment l'intelligence artificielle. Le problème de l'ordonnancement de travaux au sein d'un atelier consiste à déterminer le séquençement des travaux dans le temps qui permet d'optimiser la performance de l'atelier (minimisation du temps de réalisation global des travaux, minimisation des temps de retard, etc.) tout en respectant des contraintes associées aux ressources de l'atelier et des contraintes temporelles. Il existe différents types d'organisation d'ateliers manufacturiers. Le modèle considéré dans le cadres des activités de recherche du campus de Lyon est celui des ateliers à cheminements multiples (Job Shop).

Dans le contexte actuel de l'industrie 5.0¹, il est possible, aujourd'hui, grâce aux technologies numériques de connaître l'état d'un système dans sa globalité et de collecter les données nécessaires à l'amélioration de la prise de décision en temps réel (utilisation des ressources, optimisation des objectifs de production, intégration des aléas, etc.).

Afin d'accompagner les industriels dans cette transition, et leur permettre de disposer de nouveaux outils d'aide à la décision pour améliorer la performance de leurs systèmes de production, il est nécessaire de développer des méthodes d'optimisation dédiées à ce contexte. Les problèmes d'ordonnancement intégrant ces nouvelles contraintes font partie des études qui sont abordées aujourd'hui par les chercheurs du LINEACT.

Positionnement dans les axes de recherche du laboratoire

Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans le thème de recherche 2 du LINEACT « Ingénierie et Outils numériques » dont les orientations portent sur le développement de la recherche dans les champs de la modélisation et de l'optimisation des systèmes, des données associées et de l'aide à la décision afin de répondre aux enjeux de la ville et de l'industrie du futur.

Les travaux de recherche de cette thèse s'inscrivent dans les domaines applicatifs ciblés par le laboratoire LINEACT que sont la ville du futur et l'industrie du futur.

Les travaux de recherche du thème 2 se déclinent en trois axes :

- Axe 1 - Cyber Physical Production System
- Axe 2 - Processus collaboratif et outils numériques
- Axe 3 - Systèmes urbains durables

¹ Selon un rapport de la commission européenne [2], l'industrie 5.0 complète l'approche existante de « Industrie 4.0 » en mettant spécifiquement la recherche et l'innovation au service de la transition vers une industrie durable, **centrée sur l'humain et résiliente**.

Les travaux de recherche de cette thèse s'intégreront dans l'axe 1 « Cyber Physical Production System » et particulièrement du verrou « Modélisation ordonnancement (organisation) et décision (pilote) dans les systèmes industriels ».

Travaux de Recherche

- **Sujet de thèse résumé**

Dans ce contexte actuel de l'industrie 5.0 et plus précisément celui de **l'usine connectée**, il est possible, aujourd'hui, grâce aux technologies numériques de communication machine à machine et homme-machine (IoT, M2M, IHM, ...), de connaître l'état d'un système manufacturier dans sa **globalité en temps-réel**. Cette transition numérique nécessite une évolution quant aux outils d'aide à la décision et d'évaluation de la performance des systèmes manufacturiers. Dans ce contexte, l'ordonnancement temps-réel représente une problématique d'actualité. L'ordonnancement dynamique (Dynamic Scheduling) est un domaine de recherche qui s'intéresse aux problèmes de la **re-planification temps-réel des tâches** et de la **re-allocation dynamique** des ressources en réponse à des **événements disruptifs**. La résolution de ces problèmes (classés NP difficiles) est complexe quand elle fait appel à des techniques de résolution classiques (Analytical approach). L'utilisation de nouvelles approches type « *Simulation-based approach* » ou « *Artificial intelligence-based approach* » pour la résolution de ces problèmes permet une prise de décision temps-réel ainsi qu'une capitalisation des connaissances sur le fonctionnement du système. Ces nouvelles approches doivent permettre une aide quant à la prise de décision et au pilotage des systèmes complexes et des interactions homme machine dans ces systèmes. Ces approches sont toutefois confrontées à une complexité dans la mise en place du processus d'apprentissage.

Le travail de recherche de cette thèse consiste à étudier l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle pour la résolution du problème d'ordonnancement dynamique dans le cadre d'un atelier type « job shop flexible » avec aléas.

- **Projet de thèse**

- **Contexte scientifique**

Les travaux de recherche réalisés ces dernières années sur le problème de l'ordonnancement des ateliers à cheminement multiple sont considérables. Ils concernent majoritairement le développement de méthodes de résolution exactes ou approchées selon la complexité du problème considéré (Approche par méthodes optimales : MILP, Branch and Bound, etc. / Approches par heuristiques et meta-heuristiques : algorithme génétique, optimisation par colonie de fourmis, etc.). Parmi les méthodes étudiées ces dernières années, on note de plus en plus de travaux portant sur l'application des techniques de l'intelligence artificielle, techniques largement utilisées dans le contexte actuel de l'industrie 4.0. En effet, il est possible, aujourd'hui, grâce aux technologies numériques de connaître l'état d'un système dans sa globalité et de collecter les données nécessaires à l'amélioration de la prise de décision en temps réel (utilisation des ressources, optimisation des objectifs de production, **intégration des aléas**, etc.).

La problématique d'ordonnancement dynamique temps-réel ne peut pas être appréhendée à partir des approches classiques. En effet, celles-ci conduisent à des temps de résolution rédhibitoires qui sont incompatibles avec des prises de décision en temps-réel. Elles sont intrinsèquement inappropriées au paradigme de l'ordonnancement dynamique.

Face à ce verrou, les nouvelles approches, identifiées à ce jour dans l'état de l'art, sont focalisées sur les techniques d'apprentissage développées dans le domaine de l'intelligence artificielle. Les résultats publiés, ces dernières années, sont prometteurs et confirment la pertinence de cette approche [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8].

- **Sujet de thèse**

La plupart des méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement sont issues des techniques de l'optimisation combinatoire. Comme déjà évoqué précédemment, ces problèmes sont souvent NP-difficiles. En effet, les méthodes de résolution permettent, en général, l'optimalité de la solution fournie, mais les problèmes de grande taille restent complexes et nécessitent la construction de méthodes de résolution approchée. Quatre types d'approches sont abordées dans la littérature pour la résolution des problèmes d'ordonnancement dynamique : les approches méthodes optimales, les approches par heuristiques et méta-heuristiques, les approches par simulation et les approches par intelligence artificielle.

Compte-tenu de la complexité et de la diversité des problématiques d'ordonnancement, le travail de recherche de cette thèse sera focalisé exclusivement sur les systèmes de type « **job-shop flexible** » intégrant différents types **d'aléas**.

L'objectif de cette thèse consiste à utiliser des techniques issues de l'intelligence artificielle pour la résolution du problème d'ordonnancement dynamique dans le cas d'un job-shop flexible. Ces techniques doivent permettre un accès temps-réel, une prise en compte des aléas et une amélioration de la performance des approches de résolution classiques.

En partant d'observations de systèmes manufacturiers réels ainsi que des données issues de la littérature scientifique sur le domaine de l'ordonnancement, il s'agira de proposer un modèle qui intègre les aléas et qui prend en compte les variables/données nécessaires à l'élaboration du modèle d'apprentissage.

Un outils d'aide à la décision sera ensuite développé en se basant sur l'étude des techniques d'apprentissage supervisé appliquées à la fonction d'ordonnancement dynamique d'un système/atelier type « Job-shop flexible ».

- **Programme de travail**

Le travail à réaliser se fera en quatre étapes clés :

1. Etape 1 : Etat de l'art
2. Etape 2 : Modélisation et simulation du système considéré (spécification nécessaire à l'élaboration de modèles capables de simuler de manière réaliste le fonctionnement du système considéré avec prise en compte des aléas)
3. Etape 3 : Génération des données d'apprentissage (génération d'instances de problèmes d'ordonnancement et caractérisation des états du système associé, exploitation des benchmarks issus de la littérature).
4. Etape 4 : Création du modèle de décision à partir d'un algorithme d'apprentissage (identification des techniques d'apprentissages les plus appropriées au problème de l'ordonnancement dynamique, création de modèles de décision).
5. Etape 5 : tests et validation (mise en évidence et caractérisation des verrous de l'ordonnancement dynamique dans le cas particulier des job-shop dynamiques à partir des cas d'étude)

- **Production scientifique/technique attendue**

La mise en œuvre de ce travail de recherche est planifiée selon les étapes précédentes et les livrables associés suivants :

Etape 1 :

- Livrable 1.1 : Article survey,
- Livrable 1.2 : Etudes de cas théoriques et/ou industriels.

Etape 2 :

- Livrable 2.1 : Modèle du système étudié
- Livrable 2.2 : Publication/communication scientifique

Etape 3 :

- Livrable 3.1 : Démonstrateur
- Livrable 3.2 : publication/communication scientifique

Etape 4 :

- Livrable 4.1 Modèle d'aide à la décision
- Livrable 4.2 : publication/communication scientifique

Organisation de la thèse

- **Lieu de travail** : CESI Campus de Lyon
- **Date de démarrage** : Octobre / Novembre 2021
- **Ecole doctorale de rattachement** : ED SMI 432
- **Durée** : 36 mois

Modalités de Recrutement : sur dossier et entretien.

Merci d'adresser votre candidature à htlahig@cesi.fr et bbettayeb@cesi.fr avec pour objet de mail :

« [Candidature] Thèse IA et ordonnancement dynamique »

Votre candidature devra comporter :

- **Un Curriculum-Vitae détaillé du candidat.** En cas de rupture dans le cursus universitaire, merci de donner une explication ;
- **Une lettre de motivation** explicitant ses motivations à réaliser une thèse de doctorat ;
- **Les résultats** des MASTER 1 et MASTER 2 et les bulletins de notes correspondant (au minimum les résultats du premier semestre pour le MASTER 2).
- **Lettres de soutien extérieur** au laboratoire d'accueil (2 maximum).

*Merci de transmettre l'ensemble des documents au sein d'un fichier zip intitulé **NOM prénom.zip**.*

Vos compétences :

- **Compétences scientifiques et techniques :**
 - Génie des systèmes industriel
 - Optimisation/ recherche opérationnelle
 - Science des données
 - Intelligence artificielle
- **Compétences relationnelles :**
 - Être autonome, avoir un esprit d'initiative et de curiosité,
 - Savoir travailler en équipe et avoir un bon relationnel,

Références

- [1] D. Garcia, H.Tlahig, B. Bettayeb et M. Sahnoun. Evaluation of Dispatching Rules Performance for a DJSSP: Towards Their Application in Industry 4.0. *International Conference On Cyber Management And Engineering -CyMaEn'21 (May 2021)*.
- [2] Atif Shahzad et Nasser Mebarki. Data mining based job dispatching using hybrid simulation optimization approach for shop scheduling problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25.6 (sept. 2012), p. 1173-1181. doi : 10.1016/j.engappai.2012.04.001.
- [3] Atif Shahzad et Nasser Mebarki. Learning Dispatching Rules for Scheduling: A Synergistic View Comprising Decision Trees, Tabu Search and Simulation. *Computers* 5.1 (fév. 2016), p. 3. doi :10.3390/computers5010003.
- [4] M. J. Shaw, S. Park et N. Raman. Intelligent Scheduling with Machine Learning Capabilities. *IIE Transactions* 24.2 (mai 1992), p. 156-168. doi: 10.1080/07408179208964213.
- [5] Liji Shen, Stéphane Dauzère-Pérès et Janis S. Neufeld. Solving the flexible job shop-scheduling problem with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research* 265.2 (mar.2018), p. 503-516. doi : 10.1016/j.ejor.2017.08.021.
- [6] Yuri N. Sotskov, Omid Gholami et Frank Werner. Solving a job shop-scheduling problem by an adaptive algorithm based on learning. *IFAC Proceedings Volumes* 46.9 (2013), p. 1352-1357. doi: 10.3182/20130619-3-ru-3018.00126.
- [7] V. Suresh et Dipak Chaudhuri. Dynamic scheduling: a survey of research. *International Journal of Production Economics* 32.1 (août 1993), p. 53-63. doi: 10.1016/0925-273(93)90007-8.
- [8] D. Terekhov et al. Integrating Queueing Theory and Scheduling for Dynamic Scheduling Problems. *Journal of Artificial Intelligence Research* 50 (juil. 2014), p. 535-572. doi: 10.1613/jair.4278.