

**Titre de la thèse : Optimisation de l'ordonnancement des tâches de transport des robots intelligents collaboratifs dans le contexte de l'Industrie 5.0 / Optimization of transport task scheduling of collaborative intelligent robots in the context of Industry 5.0**

- **Domaines scientifiques** : optimisation et simulation des systèmes complexes; ordonnancement des ateliers de production flexibles; interaction homme robot  
*Scientific Domains: optimisation and simulation of complex systems; scheduling of flexible production workshops; interaction human robot*

- **Mots-clés** : Optimisation; Simulation; robotique mobile; interaction homme machine; ordonnancement dynamique; industrie 5.0

*Key words : Optimisation; Simulation; mobile robotics; human machine interaction; dynamic scheduling; industry 5.0.*

**Encadrement :**

- **Directeur de thèse** :  
*Dr. HDR M'hammed SAHNOUN, Enseignant-Chercheur*
- **Encadrant** : *Dr. Abdelkader MEKHALEF BENHAFSSA, Enseignant-Chercheur*

**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

La thèse proposée s'intéresse à l'utilisation des robots autonomes et intelligents pour assurer la tâche de transport dans les ateliers de production flexibles. Cette thématique touche à plusieurs domaines tels que l'ordonnancement de la production, la robotique, la maintenance des outils de production, et les différents types de prise de décision dans l'entreprise. La formation dispensée par le centre CESI d'Angoulême concorde avec plusieurs aspects de cette thèse comme la gestion de la production, la simulation des flux ou l'ordonnancement des opérations. De plus, le centre prévoit d'introduire l'option robotique qui peut contribuer grandement aux tests réels des algorithmes d'ordonnancement et de gestion de flotte de robots. Ces réalisations peuvent aussi, aider les élèves à travailler sur des cas pratiques d'application de la robotique dans l'industrie. D'autres aspects sont abordés dans la thèse et peuvent intéresser les formations au centre d'Angoulême tels que la communication entre les différents organes (CPS) dans l'atelier de production, l'intelligence artificielle embarquée dans les robots et les différents aspects de sécurité des opérateurs en interaction avec les robots mobiles. La thèse s'intéresse à un sujet d'actualité, qui est le nouveau rôle et comportement des opérateurs humains dans les ateliers de production contenant des entités intelligentes. Les travaux de cette thèse peuvent contribuer à l'évolution des parcours métiers liés à l'industrie de futur (OPI et Robotique) et introduire les aspects de l'industrie 4.0/5.0 dans des sujets qui rassemblent les élèves de la formation généraliste avec ceux de la formation informatique qui va être ouverte d'ici 2022.

#### Positionnement dans les axes de recherche du laboratoire

Le sujet de thèse s'inscrit dans les activités liées au thème de recherche "*Ingénierie et outils numériques*" dans le domaine applicatif "*Industrie du futur*". Les travaux qui seront menés dans cette thèse sont principalement dans l'axe 1 "*Système Cyber Physique de Production*" du thème 2 et il touche à quelques aspects de l'axe 2 "*Processus Collaboratif et Outils Numériques*", surtout sur les interactions Homme-Machine qui représentent l'un des piliers de l'industrie 5.0. En effet, l'ordonnancement des tâches de transport et de production dans les ateliers de production flexibles et intelligents s'intéresse à la situation précise de l'humain et propose d'adapter les solutions technologiques et organisationnelles pour lui permettre d'accomplir ses tâches en toute sécurité avec le plus grand taux d'efficacité. La thèse répondra à des questions fondamentales importantes telles que, quel robot détient la priorité lors d'une intersection, quel est le chemin à prendre sachant que des opérateurs peuvent être présents sur le chemin du robot, comment gérer le partage des ressources entre les robots, quel type d'architecture de pilotages est la plus adéquate avec ce genre de robot. Ce sujet rentre en synergie avec plusieurs projets et thèses en cours ou déjà effectués dans le laboratoire LINEACT tels que les projets CoRoT, Locadyn, Xterm, NumériLab, la thèse de José Eloundou et la thèse de Souleymane Moussa. Elle va participer à la relance des activités des démonstrateurs déjà développés dans le laboratoire et des activités liées à l'exploitation des projets.

Les thématiques de l'ordonnancement dynamique, la simulation et l'optimisation sont présentes dans plusieurs régions de CESI telles que la région sud-est, nord-ouest et ouest. La thèse va contribuer au développement de la collaboration entre les régions et les deux thématiques du laboratoire LINEACT CESI.

## Travaux de Recherche

- [Sujet de thèse résumé](#)

La dernière décennie a connu l'arrivée de l'industrie 4.0 avec ces technologies permettant la collecte, le traitement et l'analyse de l'information. La décision est devenue plus efficace et plus précise à tous les niveaux. Ce développement technologique permet d'aller plus loin et de capter avec précision l'état des opérateurs humains et proposer ainsi des algorithmes prenant en compte le comportement imprévisible et évolutif de l'humain.

L'évolution des lignes de production vers l'atelier flexible ou reconfigurable a induit l'apparition de plus de transports des produits entre les machines de production. La robotisation de cette tâche de transport est fortement recommandée à cause de sa répétitivité et de sa pénibilité. De plus, l'utilisation de robots mobiles les plus performants (AIV) offre la possibilité de se déplacer dans les zones de mouvement des opérateurs humains. Le temps de transport devient donc dépendant du nombre de personnes rencontrées sur le chemin. Cela rend les algorithmes d'ordonnements existants, imprécis et la planification de la production encore plus complexe et moins précise.

Cette thèse s'intéresse au développement d'algorithmes d'ordonnement prévisionnel et dynamique des tâches de transport et de production permettant d'anticiper les perturbations causées par les opérateurs humains. Des outils basés sur la modélisation stochastique, l'optimisation, la simulation et l'apprentissage profond seront utilisés pour assurer le développement de ces algorithmes. Le démonstrateur de l'usine du futur du laboratoire LINEACT sera utilisé pour tester et valider ces algorithmes.

- [Projet de thèse](#)
  - [Contexte scientifique](#)

Ces dernières années, les ateliers de production et d'assemblage ont subi des changements importants à tous les niveaux (disposition des machines, gestion de flux, outils de travail) afin de s'adapter aux exigences du marché et de la concurrence internationale. Les opérateurs humains ont la capacité de s'intégrer dans de nouveaux environnements, mais la technologie doit aussi prendre en compte le comportement évolutif et imprévisible de l'humain [1]. Un récent changement de paradigme, le concept d'industrie 5.0, se concentre sur la durabilité du facteur humain au sein des technologies introduites dans le cadre de l'industrie 4.0, notamment l'ordonnement des tâches de production, de transport et de maintenance dans les ateliers de production flexibles. En effet, l'utilisation de n'importe quelle nouvelle technologie dans le contexte industriel est sujette aux phénomènes de résistance au changement et à l'adaptation de besoins propres des opérateurs. L'introduction des technologies est donc un processus incrémental qui se base sur le retour d'expérience des utilisateurs, leurs nouveaux besoins et les problèmes dérivés de la précédente utilisation [2].

Cette thèse s'intéresse à l'introduction des robots mobiles intelligents dans les ateliers de production. Ces robots sont en interactions permanentes avec les opérateurs humains et doivent interagir aussi avec l'infrastructure de l'atelier de production. Cela va générer des temps de déplacement aléatoire et non maîtrisé à cause de leur dépendance au comportement des humains et à la configuration de l'atelier.

L'objectif de la thèse est d'étudier le comportement des opérateurs en interaction avec les robots mobiles et de développer une architecture de contrôle et des ordonnements prévisionnels et dynamiques pouvant intégrer le comportement imprévu et évolutif des opérateurs humains. Le projet de thèse s'inscrit dans les activités de recherche du laboratoire LINEACT CESI et sera une ouverture sur l'industrie 5.0 et la place de l'humain dans l'environnement de travail intelligent des usines du futur.

- **Sujet de thèse**

L'industrie 4.0 a provoqué une révolution dans le mode de fonctionnement de l'industrie manufacturière, depuis la création du concept du produit jusqu'aux usines automatisées de haute technologie qui fabriquent les produits. Le résultat de cet environnement hautement automatisé de l'industrie 4.0 est que les humains risquent de ne plus jouer un rôle efficace. Il est important que nous valorisons l'apport des humains pour permettre aux générations futures de faire partie de l'industrie 5.0 à tous les niveaux. Ramener l'ingéniosité des humains dans les usines du futur sera la clé pour améliorer la fabrication dans cette nouvelle ère. L'humain a la capacité de développer ses activités dans l'atelier de production en fonction de son environnement. Un environnement favorable à l'innovation tient en compte le bien-être de l'humain [3]. Lors de l'introduction des technologies liées à l'industrie 4.0, celles qui ont eu le plus de succès sont celles qui demandent moins de changement d'habitude aux humains et subissent par conséquent moins de résistance au changement. Les technologies doivent donc prendre en compte le comportement de l'humain dans l'atelier de production sans pour autant lui demander de le changer.

A la base, la robotisation des tâches dans les ateliers de production est légitime pour des tâches répétitives et pénibles où l'humain a une faible valeur ajoutée. Dans ce contexte, la tâche de transport des produits entre les différents postes de travail fait partie des tâches à robotiser. [4]

La robotisation de cette tâche est généralement assurée via des AGVs (Autonomous Guided Vehicules) qui se déplacent dans des couloirs dédiés et disposent d'un système de sécurité leur permettant de s'arrêter lorsqu'un humain ou un obstacle est mis sur leur chemin. La nouvelle génération des robots mobiles appelée "Autonomous Intelligent Vehicules" (AIV) [5-6] est capable de prendre des décisions plus nombreuses, plus complexes et d'éviter des obstacles statiques et dynamiques. Les AIV n'ont plus besoin de circuler dans des couloirs dédiés et peuvent interagir avec des humains et modifier sa trajectoire. La présence des opérateurs humains dans les zones de déplacement de ces robots est possible, mais dépend de l'activité de ces derniers. Par exemple, lors des temps de pauses, ou lors de l'entrée et de sorties de l'atelier, la probabilité de présence des opérateurs est plus grande que dans d'autres moments de la journée. La décision de lancement d'une tâche et/ou le choix d'un chemin doivent dépendre de cette probabilité de présence pour réduire le temps de déplacement.

Une deuxième difficulté qui s'oppose à l'utilisation de ces robots concerne la gestion de la flotte [7]. Il s'agit de la problématique de partage de sources entre plusieurs robots. Par exemple, une zone étroite telle qu'un couloir qui ne peut contenir qu'un robot ou une station de charge. Les priorités de passage doivent aussi être gérées pour assurer les contraintes de temps pour chaque tâche.

Le troisième aspect en lien avec cette problématique concerne la sécurité des opérateurs et la gestion des interactions avec les robots [8-9]. En effet, l'ordonnancement des tâches des robots et leur manière d'effectuer leur déplacement doivent prendre en compte le modèle du comportement des opérateurs pour éviter des situations dangereuses.

L'objectif de cette thèse sera de développer/améliorer une architecture du contrôle permettant de profiter de l'intelligence embarquée dans les robots et d'assurer un fonctionnement optimal de l'ensemble. Cette architecture sera capable d'exécuter des ordonnancements prévisionnels et dynamiques des tâches de transport dans les ateliers flexibles avec plusieurs objectifs d'optimisation qui répondent notamment aux trois problématiques identifiées précédemment.

- **Antériorité du sujet dans le laboratoire**

Le sujet s'intéresse à la problématique de l'ordonnancement de la tâche de transport et de son intégration avec la production. Plusieurs travaux dans le laboratoire se sont intéressés à ce sujet:

- La thèse de José Eloundou [10] qui a développé un algorithme d'ordonnancement dynamique des tâches de transport dans l'atelier de production.

- Les travaux dans le cadre du projet Xterm concernant la simulation multi-agents des ateliers de production flexibles. Des algorithmes d'ordonnancement dynamique et prévisionnel ont été développés, simulés et comparés. Les résultats ont été publiés dans plusieurs conférences et un journal international [11].
- Le projet CoRoT qui s'intéresse au développement et supervision d'un robot manipulateur mobile pour assurer la tâche de transport. Dans ce projet, plusieurs algorithmes d'ordonnancement ont été développés pour assurer l'allocation des tâches aux ressources intelligentes. Une architecture hybride de contrôle a été développée et un algorithme de formation de coalition a été développé pour l'allocation des tâches de transport.

L'apport de cette thèse par rapport aux développements déjà effectués dans les travaux antérieurs de la thèse est la considération de l'interaction avec les opérateurs humains.

○ **Programme de travail**

Le travail dans la thèse sera divisé en plusieurs étapes:

**Première année :**

- État de l'art sur l'industrie 5.0; les méthodes de simulation, optimisation, optimisation stochastiques et modèle de comportement humain, la robotique mobile intelligente.
- Prise en main et montée en compétence sur les outils de contrôle robotique (ROS, Rviz, Gazebo,...), outil de simulation de flux Netlogo/flexim.
- Proposition d'une première version d'une architecture de contrôle d'atelier de production flexible.
- Développement d'un simulateur d'atelier flexible pour pouvoir tester des algorithmes d'ordonnancement de transport avec des AIV et AGV.
- Soumission d'un papier conférence.

**Deuxième année :**

- Développement de modèle de comportement d'opérateurs humains basé sur la littérature et l'expérimentation (des expérimentations seront faites dans le cadre du projet Antihpert qui commencera au mois d'octobre 2021 et on se basera sur les données déjà collectées lors du projet Locadyn).
- Intégration du comportement des opérateurs dans le simulateur et simulation de l'interaction entre les AIV et les opérateurs.
- Soumission d'un papier conférence.
- Développement d'un algorithme d'ordonnancement prévisionnel avec prise en compte du facteur (proposition de plusieurs méthodes d'optimisation : méthode exacte, métaheuristiques et optimisation stochastique).
- Soumission d'un papier journal.

**Troisième année**

- Développement d'un algorithme d'ordonnancement dynamique (plusieurs pistes : théorie des jeux, deep learning, optimisation, heuristique).
- Tester des algorithmes sur un cas réel sur le démonstrateur de l'usine du futur sur Rouen.
- Rédaction de la thèse.
- Soumission d'un article dans un journal international.

- **Collaboration avec des partenaires extérieurs**

Des collaborations sont envisagées avec le laboratoire LAMIH (Dr. Abdelghani Bekrar et Pr. Damien Trentesaux ) et l'université de Greenwich (Pr. James Gao).

- Production scientifique/technique attendue

Plusieurs livrables sont attendus :

- Simulateur pour étudier le comportement des robots mobiles AIV dans un atelier de production flexible avec la prise en compte des opérateurs humains.
- Algorithmes d'optimisation de l'ordonnancement prévisionnel et/ou dynamique multi-objectifs.
- Simulateur optimiseur de la tâche de transport dans un atelier de production flexible.
- Démonstration sur la plateforme de l'industrie du futur : les approches proposées seront évaluées expérimentalement, et pourront être validées sur un cas d'étude.

Les travaux seront valorisés par la publication d'articles scientifiques dans un journal avant la rédaction de la thèse et un journal après la soumission de la thèse. Le doctorant sera amené aussi à publier et à présenter ses travaux dans deux conférences internationales au minimum.

### Organisation de la thèse

- Lieu de travail : *CESI Campus d'Angoulême*
- Date de démarrage : *01/11/2021*
- Ecole doctorale de rattachement : *HESAM Université, ED SMI 432*
- Durée : 36 mois

### Modalités de Recrutement : sur dossier et entretien.

Merci d'adresser votre candidature à [amekhalef@cesi.fr](mailto:amekhalef@cesi.fr) et [msahnoun@cesi.fr](mailto:msahnoun@cesi.fr) avec pour objet de mail :

**« [Candidature] Optimisation de l'ordonnancement des tâches de transport des robots intelligents collaboratifs dans le contexte de l'Industrie 5.0 »**

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 : simulation de flux, optimisation multi-objectif, robotique mobile, ordonnancement, développement informatique*
- *Compétences relationnelles :*
  - Être autonome, avoir un esprit d'initiative et de curiosité,
  - Savoir travailler en équipe et avoir un bon relationnel,
  - Être rigoureux.

## Références

- [1] Panagou, S., Fruggiero, F., Neumann, W. P., & Lambiase, A. (2021, June). *The Entropic Complexity of Human Factor in Collaborative Technologies*. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 503-510). Springer, Cham.
- [2] Skobelev, P. O., & Borovik, S. Y. (2017). *On the way from Industry 4.0 to Industry 5.0: From digital manufacturing to digital society*. *Industry 4.0*, 2(6), 307-311.
- [3] Doyle-Kent, M. (2021). *Collaborative Robotics in Industry 5.0* (Doctoral dissertation, Wien)
- [4] Souleymane, M. G., M'hammed, S., Fabrice, D., & Abdelaziz, B. (2020, April). *Bi-Objective Indirect Optimization of Robotic Transportation Task Assignment Based on Auction Mechanism*. In *2020 4th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM)* (pp. 1-4). IEEE.
- [5] Cronin, C., Conway, A., & Walsh, J. (2019, June). *State-of-the-art review of autonomous intelligent vehicles (AIV) technologies for the automotive and manufacturing industry*. In *2019 30th Irish Signals and Systems Conference (ISSC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Hellmann, W., Marino, D., Megahed, M., Suggs, M., Borowski, J., & Negahban, A. (2019). *Human, AGV or AIV? An integrated framework for material handling system selection with real-world application in an injection molding facility*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(1), 815-824.
- [7] Sahnoun, M. H., Xu, Y., Abdelaziz, F. B., & Baudry, D. (2019, April). *Optimization of transportation collaborative robots fleet size in flexible manufacturing systems*. In *2019 8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)* (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Garrido-Hidalgo, C., Hortelano, D., Roda-Sanchez, L., Olivares, T., Ruiz, M. C., & Lopez, V. (2018). *IoT heterogeneous mesh network deployment for human-in-the-loop challenges towards a social and sustainable Industry 4.0*. *IEEE Access*, 6, 28417-28437.
- [9] CANBAY, P., & DEMİRCİOĞLU, Z. (2021). *Toward Industry 5.0: Ethical and Moral Responsibilities in Intelligent Autonomous Systems*. *AJIT-e*, 12(45), 106.
- [10] Eloundou, J. (2016). *Modélisation multi-contraintes d'un système de production flexible* (Doctoral dissertation, Rouen, INSA).
- [11] Xu, Y., Sahnoun, M. H., Abdelaziz, F. B., & Baudry, D. (2020). *A simulated multi-objective model for flexible job shop transportation scheduling*. *Annals of Operations Research*, 1-22.