



HAL
open science

Approche exacte pour le problème bi-objectif d'équilibrage des lignes de désassemblage intégrant des robots collaboratifs

Oumayma Laouini, Ilhem Slama, Faicel Hnaien, Zied Jemai

► To cite this version:

Oumayma Laouini, Ilhem Slama, Faicel Hnaien, Zied Jemai. Approche exacte pour le problème bi-objectif d'équilibrage des lignes de désassemblage intégrant des robots collaboratifs. ROADEF 2025: 26ème congrès annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Feb 2025, Paris, France, France. <hal-05034944>

HAL Id: hal-05034944

<https://hal.science/hal-05034944v1>

Submitted on 15 Apr 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Approche exacte pour le problème bi-objectif d'équilibrage des lignes de désassemblage intégrant des robots collaboratifs

Oumayma Laouini¹, Ilhem Slama², Faicel Hnaïen¹, Zied Jemai²

¹ Université de Technologie de Troyes, LIST3N, 12 rue Marie Curie, 10000 Troyes, France

{oumayma.laouini; faicel.hnaïen}@utt.fr

² CentraleSupélec, Laboratoire Genie Industriel, Université Paris-Saclay, 3 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette, Île-de-France, France

{ilhem.slama; zied.jemai}@centralesupelec.fr

Mots-clés : Collaboration homme-robot, équilibrage des lignes de désassemblage, optimisation multi-objectif, ε -contraintes.

1 Introduction

L'automatisation joue un rôle crucial dans la production industrielle moderne, notamment avec l'émergence des technologies de l'industrie X.0. Cette automatisation s'étend également au processus de désassemblage, où les robots remplacent progressivement les lignes entièrement manuelles. Les lignes robotiques de désassemblage offrent une efficacité supérieure et une meilleure sécurité dans l'exécution des tâches dangereuses. Cependant, elles présentent une limite du manque de flexibilité pour traiter les sous-ensembles défectueux, en raison de l'incertitude quant à la qualité des produits en fin de vie. Cela nécessite l'intervention humaine, notamment pour les tâches complexes qui demandent une capacité d'adaptation et de prise de décision. Pour répondre à ce défi, le concept des robots collaboratifs s'impose comme une solution innovante où ils assistent les opérateurs humains tout au long du processus de désassemblage [1]. Dans ce travail, nous nous intéressons au problème bi-objectif de l'équilibrage des lignes de désassemblage intégrant la collaboration homme-robot. Les deux objectifs visés sont la minimisation du coût total de désassemblage et le lissage des charges de travail entre les stations. Le problème consiste à sélectionner la meilleure alternative de désassemblage, et à affecter les tâches aux ressources et aux stations. Pour le résoudre, nous développons un modèle mathématique linéaire en nombres entiers mixtes avec une méthode de linéarisation pour l'objectif quadratique lié au lissage des charges, afin d'améliorer l'efficacité des solveurs exacts. Enfin, nous employons la méthode exacte des ε -contraintes pour générer le front de Pareto, offrant ainsi une analyse des compromis entre les deux objectifs.

2 Description et formulation du problème

Nous considérons le problème d'équilibrage des lignes de désassemblage avec les robots collaboratifs. Ce problème se caractérise par trois types de collaboration entre l'homme et le robot, comme décrit dans [1]. La première est la collaboration séquentielle où l'humain et le robot travaillent de manière indépendante dans des stations distinctes. La deuxième est la collaboration en parallèle, où l'humain et le robot se trouvent dans la même station, mais exécutent des tâches de manière autonome. Enfin, la collaboration coopérative où ils partagent une même tâche. Dans notre cas d'étude, ces trois types de collaboration peuvent coexister sur une ligne de désassemblage. Une contrainte de ressource impose qu'au plus un humain et un robot peuvent travailler simultanément dans une même station.

Pour modéliser la précedence entre les tâches de désassemblages, nous utilisons le graphe ET/OU transformé. Ce graphe illustre les différentes relations entre les sous-ensembles du

produit en fin de vie et les tâches qui les génèrent. Il offre également une représentation des alternatives de désassemblage possibles, permettant ainsi de sélectionner une séquence de tâches qui répond aux objectifs d'optimisation.

Le processus de désassemblage que nous considérons comporte quatre types de tâches : les tâches dangereuses exécutées par les robots; les tâches complexes exécutées par les humains; les tâches collaboratives, nécessitant une exécution simultanée par les humains et les robots et les tâches normales pouvant être faites par l'un ou l'autre selon les disponibilités et les contraintes du temps. Les stations, quant à elles, sont disposées en série avec la contrainte qui impose qu'une station ne peut être ouverte que lorsque la précédente a atteint son temps de cycle. Le reste des hypothèses est comme suit : (i) Un seul type de produit est à désassembler, (ii) les stations sont identiques et le temps de cycle est constant, (iii) une tâche ne peut pas être partagée entre plusieurs stations, (iv) les temps d'exécution des tâches non collaboratives sont différents pour le robot et pour l'humain, (v) le temps de setup et de passage des composants sur le convoyeur sont inclus dans le temps d'exécution des tâches de désassemblage.

Ce problème d'optimisation est bi-objectif. Le premier objectif consiste à minimiser le coût total de désassemblage qui comprend le coût d'ouverture des stations, le coût énergétique des robots et le coût de main d'œuvre des opérateurs humains. Le deuxième objectif consiste à minimiser la somme des temps morts quadratiques des stations, ce qui permet d'améliorer l'équilibre global de la ligne. Pour contourner les limitations des solveurs exacts face à la complexité du problème, nous adaptons une approche de linéarisation basée sur une formulation logarithmique en base-2 pour le second objectif. Enfin, pour traiter le compromis entre ces deux objectifs, nous utilisons la méthode exacte des ε -contraintes pour générer le front de Pareto. Cette approche permet de fournir un ensemble de solutions optimales offrant différents compromis, permettant ainsi au décideur de choisir l'alternative de désassemblage et l'affectation qui répond le mieux à ses besoins spécifiques.

3 Conclusion et perspectives

Ce travail propose une approche exacte pour résoudre le problème bi-objectif d'équilibrage des lignes de désassemblage avec la collaboration homme-robot. Une formulation mathématique linéaire en nombres entiers mixtes est développée avec une linéarisation de l'objectif quadratique de lissage des charges entre les stations, afin d'améliorer l'efficacité des solveurs exacts. la méthode ε -contraintes est utilisée pour générer le front de Pareto. Les résultats numériques obtenus montrent que l'approche est efficace pour les petites et moyennes instances de produits en fin de vie.

En perspective, nous envisageons de développer une méthode approchée pour traiter des produits de plus grande taille. De plus, nous prenons en compte la sécurité des opérateurs humains dans l'exécution des tâches collaboratives.

References

- [1] Meng-Lun Lee, Xiao Liang, Boyi Hu, Gulcan Onel, Sara Behdad, and Minghui Zheng. A review of prospects and opportunities in disassembly with human–robot collaboration. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 146(2), 2024.