



**HAL**  
open science

## Ordonnancement résilient d'un atelier de type job shop flexible

Candice Destouet, Houda Tlahig, Belgacem Bettayeb, Bélahcène Mazari

► **To cite this version:**

Candice Destouet, Houda Tlahig, Belgacem Bettayeb, Bélahcène Mazari. Ordonnancement résilient d'un atelier de type job shop flexible. SAGIP 2024, INSA Lyon, May 2024, Lyon, France. hal-04597419

**HAL Id: hal-04597419**

**<https://hal.science/hal-04597419>**

Submitted on 2 Jun 2024

**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.

# Ordonnancement résilient d'un atelier de type job shop flexible

Candice Destouet<sup>1</sup>, Houda Tlahig<sup>1</sup> Belgacem Bettayeb<sup>1</sup> Bélahcène Mazari<sup>1</sup>

CESI LINEACT, France

cdestouet@cesi.fr,htlahig@cesi.fr,bbettayeb@cesi.fr,bmazari@cesi.fr

**Mots-clés :** *Ordonnancement dynamique, Job shop flexible, Durabilité, Résilience.*

## 1 Introduction

Dans le contexte actuel de l'Industrie 5.0, l'accent est mis sur les considérations écologiques et humaines comme jamais auparavant. Alors que l'industrie 4.0 a introduit une transformation technologique et numérique significative, améliorant l'efficacité des systèmes de fabrication, l'industrie 5.0 en représente la continuation. Elle répond aux impératifs du bien-être humain, des préoccupations environnementales et de la résilience face à la multiplication des crises sans précédent, marquant ainsi un tournant décisif vers une approche plus durable. Pour arriver à ces objectifs au niveau opérationnel, il est crucial que les processus d'ordonnancement s'alignent sur ces facteurs clés. Malgré une littérature considérable et des progrès significatifs dans la résolution du problème d'ordonnancement de type job shop flexible (FJSSP) au cours de la dernière décennie, dans une analyse précédente de l'état de l'art [1], nous avons constaté un manque notable quant à l'intégration simultanée des facteurs humains et environnementaux dans l'optimisation du FJSSP. Cette analyse souligne que l'amélioration de la résilience du système peut être réalisée grâce à deux stratégies clés : 1) l'intégration des considérations humaines et environnementales, et 2) la création d'un modèle dynamique capable de réagir aux perturbations. La figure 1 illustre les différentes évolutions des problèmes d'ordonnancement, allant de l'approche classique au modèle dynamique et durable. Notre objectif à travers ce travail est de relever les défis posés par le FJSSP dynamique et durable (DSFJSSP), nous alignant ainsi sur les principes de l'industrie 5.0 en développant un système résilient.

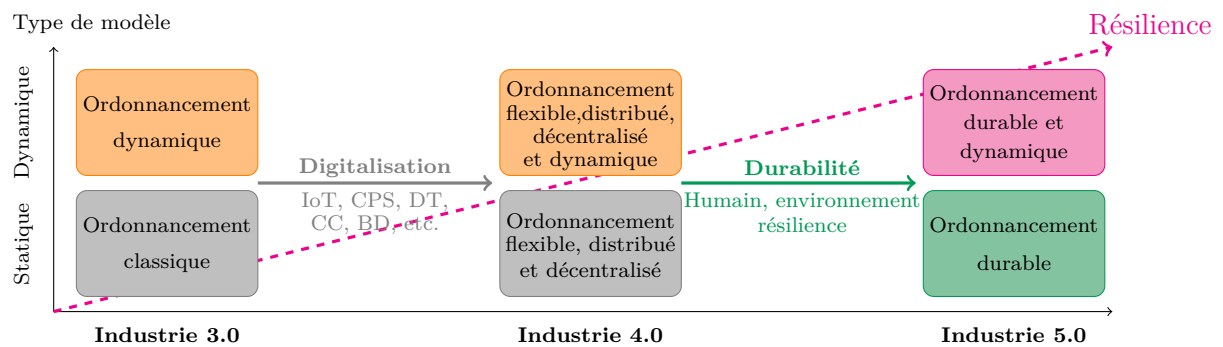


FIG. 1 – Évolution des problèmes d'ordonnancement

## 2 Modélisation et résolution

### 2.1 Description du problème

A travers ce travail, nous proposons un programme non linéaire en nombres entiers pour le problème de FJSSP durable. Pour l’aspect environnement, nous considérons trois types d’activités consommatrices d’énergie au cours du processus : l’exécution des opérations sur les machines, le transport interne des produits et les installations auxiliaires. Concernant le facteur humain, nous prenons en compte les compétences des opérateurs ainsi que leur sécurité à travers leurs indices OCRA. Ces derniers sont calculés pour chaque opérateur en fonction du manque de repos, de la durée globale du processus, du nombre d’actions techniques et de facteurs multiplicateurs liés à : la posture, la force, la répétitivité, et les risques supplémentaires (vibrations, température, etc.). La méthode OCRA est préconisée pour analyser, prédire et prévenir l’apparition des troubles musculo-squelettiques [2]. Nous traitons le problème avec une approche d’optimisation multi-objectifs pour minimiser simultanément le temps total d’exécution, la consommation totale d’énergie et le niveau maximum de l’indice OCRA.

### 2.2 Approches de résolution

Dans un premier temps, nous utilisons l’algorithme « Non-dominated Sorting Genetic Algorithm » NSGA-III pour résoudre le problème multi-objectifs précédemment introduit, et obtenir un ordonnancement initial (statique). Le modèle, l’algorithme utilisé, et le choix de la solution finale sont décrits en détails dans [3]. En optimisant les trois fonctions objectif, nous obtenons un compromis entre les aspects économiques, environnementaux et sociétaux. Un exemple de résultats d’ordonnancement utilisant l’instance  $kcm_4$  est proposé dans la Figure 2-(a). Cet exemple, composé de 15 produits, 56 opérations et 10 machines, est issue de [4] et complétée par des données générées aléatoirement pour les aspects consommations d’énergie et facteur humain.

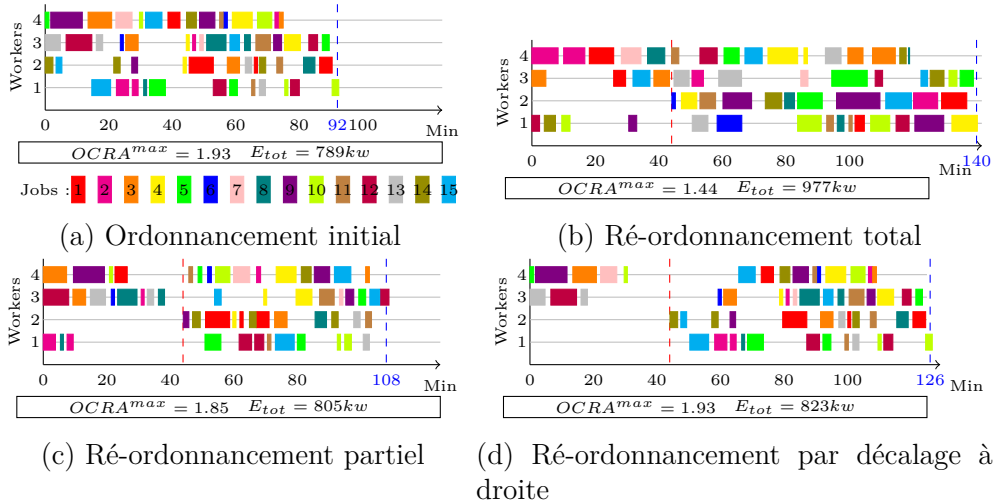


FIG. 2 – Différentes stratégies de ré-ordonnancement

Dans un deuxième temps et afin de rendre cet ordonnancement dynamique et capable de répondre aux aléas, nous proposons une approche basée sur la méthode du Q-learning. En particulier, nous étudions l’impact de l’absence d’un opérateur durant le processus. Suivant le moment de l’absence (début, milieu, ou fin de processus) et sa durée, la stratégie optimale de ré-ordonnancement peut différer. Nous nous penchons en détails sur trois stratégies : le ré-ordonnancement total et partiel via NSGA-III et le décalage à droite via une heuristique. Afin de déterminer quelle stratégie adopter, le modèle est entraîné : au cours de 1000 itérations ( $t_{max}$ ), un opérateur s’absente aléatoirement pendant le processus ; Le modèle choisit une

stratégie de ré-ordonnancement, l'applique, observe le résultat obtenu (la déviation par rapport aux trois objectifs initiaux), et donne une récompense plus ou moins élevée à la stratégie utilisée. Ainsi, si un opérateur s'absente lors de l'exécution de l'ordonnancement, le modèle choisira la meilleure stratégie de ré-ordonnancement à appliquer. Un exemple est donné en Figure 2, où l'opérateur 2 est absent pendant les 44 premières minutes du processus. Nous remarquons alors que dans cette situation, le ré-ordonnancement partiel est celui qui dévie le moins de l'ordonnancement initial. La Figure 3 résume l'approche utilisée.

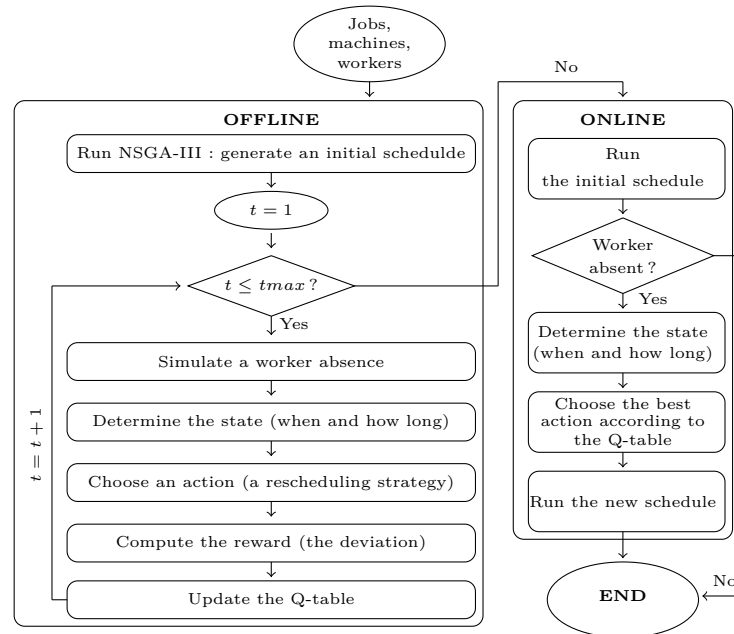


FIG. 3 – Approche utilisée

### 3 Conclusion et perspectives

Le modèle et l'approche adoptés nous permettent d'obtenir un compromis entre les trois aspects économiques, environnementaux et sociétaux, assurant ainsi un ordonnancement durable. Le modèle est également capable de réagir en cas d'absence imprévue d'un opérateur, renforçant ainsi la résilience du système. Par la suite, d'autres aléas pourront être intégrés, telles que les pannes de machines, l'insertion de nouvelles tâches ou l'annulation de certaines, afin d'améliorer la robustesse de notre modèle. Des expérimentations sur des instances plus grandes et proches de la réalité permettraient d'approfondir la validation de notre approche.

### Références

- [1] Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., Mazari, B. (2023). Flexible job shop scheduling problem under Industry 5.0 : A survey on human reintegration, environmental consideration and resilience improvement. *Journal of Manufacturing Systems*, 67, 155-173.
- [2] Occhipinti, E. (1998). OCRA : a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1290-1311.
- [3] Destouet, C., Tlahig, H., Bettayeb, B., Mazari, B., Multi-Objective Sustainable Flexible Job Shop Scheduling Problem Balancing Energy Consumption and Worker's Safety and Preferences. Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4669778>
- [4] Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P. (2002). Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems : hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic. *Mathematics and computers in simulation*, 60(3-5), 245-276.