

Modèle de programmation par contraintes pour l'équilibrage et l'ordonnancement des lignes d'assemblage avec travailleurs mobiles et stations parallèles

Xavier Pucel¹, Stéphanie Roussel¹

¹ DTIS, ONERA, Université de Toulouse, France

{xavier.pucel,stephanie.roussel}@onera.fr

Résumé

Dans le contexte des lignes d'assemblage en aéronautique, l'augmentation du taux de production et la réduction des coûts d'exploitation sont deux objectifs importants, mais parfois contradictoires. Dans les petites lignes d'assemblage, le partage des ressources de production entre les stations de travail constitue un moyen simple et efficace de réduire les coûts d'exploitation. Ainsi, les travailleurs ne sont pas affectés à une unique station, mais peuvent se déplacer entre elles. De plus, la parallélisation des stations de travail est une approche efficace pour augmenter le taux de production. Toutefois, la combinaison de ces deux stratégies complexifie la planification du travail sur la ligne. Cet article traite du problème de l'affectation des tâches aux stations de travail et de leur ordonnancement dans une ligne d'assemblage où les travailleurs peuvent se déplacer entre les stations, et où ces dernières peuvent être organisées en parallèle. Nous modélisons ce problème à l'aide de la programmation par contraintes. Nous l'évaluons sur des cas d'étude industriels réels provenant de fabricants d'aéronefs, ainsi que sur des jeux de données basés sur des instances la littérature.

Mots-clés

Programmation par contraintes, Ligne d'assemblage, Équilibrage et ordonnancement, Stations de travail parallèles, Travailleurs mobiles

Abstract

In the context of aircraft assembly lines, increasing the production rate and decreasing the operating costs are two important, and sometimes contradictory, objectives. In small assembly lines, sharing production resources across workstations is a simple and efficient way to reduce operating costs. Therefore, workers are not assigned to a unique workstation but can walk between them. On the other side, paralleling workstations is an efficient way to increase the production rate. However, the combination of both strategies create complex conditions for tasks to access the production resources. This paper addresses the problem of allocating tasks to workstations and scheduling them in an assembly line where workers can walk across workstations,

and where workstations can be organized in parallel. We model this problem with Constraint Programming. We evaluate it on real world industrial use cases coming from aircraft manufacturers, as well as synthetic use cases adapted from the literature.

Keywords

Constraint Programming, Assembly Line, Balancing and Scheduling, Parallel Workstations, Walking Workers

1 Description du problème

La production d'aéronefs est souvent réalisée sur des chaînes d'assemblage. Pour augmenter le taux de production, il est possible d'ajouter des stations de travail ou d'organiser des stations en parallèle. Cependant, ces approches présentent des inconvénients tels que l'occupation d'un espace supplémentaire en usine et des coûts élevés.

Cet article est un résumé du travail [2], qui peut être considéré comme une extension du *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) avec des stations de travail et des ressources cumulatives partagées entre stations. Nous nous intéressons au problème de l'optimisation du temps de cycle (i.e. le temps passé sur chaque station de travail) sur une chaîne d'assemblage pulsée, qui vient d'un cas d'étude réalisé avec un avionneur. Une ligne pulsée est découpée en plusieurs stations de travail. Ainsi, après chaque temps de cycle, l'avion passe de sa station courante à la suivante sur la chaîne. Le problème considéré présente les caractéristiques suivantes.

- On souhaite minimiser la durée d'assemblage totale.
- Le nombre et la disposition des postes de travail sont donnés en entrée. Aussi, le seul moyen de diminuer la durée d'assemblage est de réduire le temps de cycle.
- La station est découpée en zones dans lesquelles les tâches ne peuvent pas se chevaucher temporellement.
- Les techniciens peuvent se déplacer entre les stations de travail, sans durée de transition.
- Chaque technicien a une compétence spécifique et les tâches nécessitent un nombre précis de techniciens par compétence. Les techniciens réalisent au maximum une tâche à chaque instant.
- Les tâches ne peuvent pas être interrompues. Elles sont

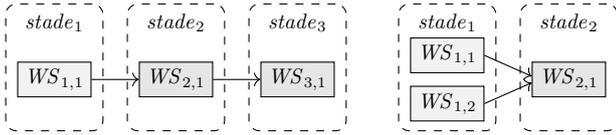


FIGURE 1 – Illustration de deux configurations d’usine

de plus assignées à une unique station de travail.

La ligne d’assemblage est divisée en *stades*, qui peuvent chacun contenir une ou plusieurs stations de travail en parallèle. La figure 1 illustre deux configurations de ligne. Dans la première configuration (à gauche sur la figure), chaque stade contient une unique station de travail et l’avion passe exactement la même durée dans chaque station de travail. Dans la deuxième configuration (à droite), le premier stade est composé de deux stations de travail en parallèle permettant à l’avion de passer deux temps de cycle sur chacune de ces stations. Dans cette configuration, la station de travail du deuxième stade, $WS_{2,1}$, est alimentée alternativement par des avions venant $WS_{1,1}$ et $WS_{1,2}$.

Plusieurs travaux de la littérature sont en lien avec ce problème. [1] décrit une approche d’*Assembly Line Balancing Problem* (ALBP) avec stations parallèles, affecte les tâches aux stations de travail, mais ne les ordonne pas. [3] présente une approche de *Multi-Manned ALBP* avec travailleurs mobiles, affecte les tâches aux stations et les ordonne, mais ne supporte pas les stations parallèles. L’originalité de notre approche est la considération conjointe de techniciens mobiles et de stations de travail parallèle. En effet, dans cette configuration, une tâche peut se retrouver en compétition avec elle-même pour l’accès aux ressources mobiles. La figure 2 illustre ce cas de figure : 8 tâches doivent être réalisées sur la ligne avec la configuration de droite de la figure 1, et une ressource R_1 représentant trois techniciens mobiles requis pour les tâches t_1, t_2 et t_6 . Dans cet exemple, la tâche t_2 est à cheval sur le temps de cycle et deux techniciens peuvent être mobilisés simultanément pour la réaliser (sur des avions qui se suivent sur la ligne).

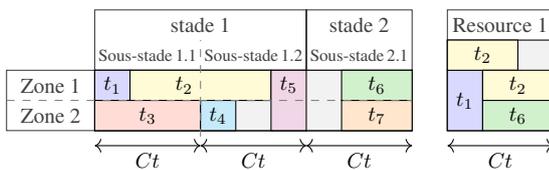


FIGURE 2 – Exemple de solution pour un problème à 8 tâches dans la configuration parallèle

2 Contributions et expérimentations

Définition formelle du problème. Nous avons tout d’abord défini formellement une extension du problème de ligne d’assemblage avec ordonnancement des tâches, mobilité des techniciens et stations parallèles.

Modèle PPC. Un modèle en Programmation par Contraintes a été proposé. Ce modèle s’appuie sur de multiples variables de décision de type intervalle organisées

hiérarchiquement, permettant de représenter les affectations de tâches (choix du stade, choix de la station) et leur consommation des ressources. Plus précisément, chaque tâche est associée à une variable intervalle obligatoire correspondant à sa réalisation et plusieurs variables intervalles optionnelles pour représenter les assignations dans chaque stade possible. Si un stade est composé de plusieurs sous-stade, chaque intervalle optionnel est lui-même décomposé en plusieurs intervalles pour représenter la réalisation de la tâche sur chaque sous-stade. Par exemple, la tâche t_2 de la figure 2 a une première partie sur le sous-stade 1.1 et une seconde partie sur le sous-stade 1.2. Finalement, ces intervalles optionnels peuvent être décalés temporellement et être utilisés pour exprimer la consommation des ressources partagées. Sur l’exemple, le sous-intervalle de t_2 sur le sous-stade 1.1 peut-être utilisé tel que pour la consommation de la ressource 1. Cependant, le sous-intervalle de t_2 sur le sous-stade 1.2 doit être décalé d’un temps de cycle. Les sous-intervalles résultant font ensuite l’objet de contraintes de type *Cumulative* pour chaque ressource. La description complète du modèle est disponible dans [2].

Expérimentations. Nous avons réalisé des expérimentations sur plusieurs jeux de données :

- des instances réelles venant d’un avionneur avec une ligne composée de stations parallèles ;
- des instances adaptées d’un jeu de données venant d’un avionneur mais pour un autre problème ;
- des instances de la littérature (PSPLib) adaptées pour correspondre au problème traité.

Le modèle PPC a été implémenté et testé avec l’outil ILOG CpOptimizer 20.1. Le solveur trouve la solution optimale sur des petits jeux de données. Sur les plus grosses instances, le solveur trouve une solution rapidement mais ne peut pas prouver son optimalité.

Analyse et perspectives. Globalement, la parallélisation des tâches permet de diminuer le temps de cycle. Néanmoins, un aspect non pris en compte ici est la surface au sol nécessaire pour la duplication des stations. Il faudrait donc étendre ce travail en considérant un (des) critère(s) supplémentaire(s) pour contrebalancer le gain à paralléliser.

Références

- [1] Eduardo Álvarez-Miranda, Sebastián Chace, and Jordi Pereira. Assembly line balancing with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 59(21) :6486–6506, 2021.
- [2] Xavier Pucel and Stéphanie Roussel. Constraint programming model for assembly line balancing and scheduling with walking workers and parallel stations. In *CP 2024*, volume 307, pages 23 :1–23 :21, 2024.
- [3] Murat Şahin and Talip Kellegöz. Balancing multi-manned assembly lines with walking workers : problem definition, mathematical formulation, and an electromagnetic field optimisation algorithm. *International Journal of Production Research*, 57(20) :6487–6505, 2019.