

Une approche de programmation par contraintes pour l'ordonnancement du démantèlement d'avions

Charles Thomas Pierre Schaus

UCLouvain, Louvain-la-Neuve, 1348 Belgique
{charles.thomas,pierre.schaus}@uclouvain.be

Résumé

Ce document est un résumé de l'article *A Constraint Programming Approach for Aircraft Disassembly Scheduling* [5], présenté à la conférence CPAIOR 2024. Le démantèlement et recyclage d'avions est l'un des futurs challenges de l'industrie du transport aérien en termes de durabilité. L'ordonnancement des opérations de démantèlement est un problème difficile à résoudre et optimiser étant donné que ce processus est fort contraint. En effet, extraire chaque pièce requiert des technicien-ne-s avec des qualifications et de l'équipement nécessaires. Les pièces à extraire sont contraintes par des relations de précédence et le nombre de technicien-ne-s travaillant simultanément a des endroits spécifiques de l'appareil est limité. Il est également essentiel de garder l'appareil équilibré durant le processus de désassemblage. Le coût du démantèlement est un facteur essentiel qui est influencé par la durée de la mobilisation au sol ainsi que le choix des technicien-ne-s pour chaque opération. Cet article présente un premier modèle de programmation par contraintes pour ce problème qui utilise des variables intervalles optionnelles. Le modèle est utilisé pour résoudre des variations d'une instance de large taille impliquant jusqu'à 1500 tâches qui est basée sur des données réelles fournies par un partenaire industriel. Les résultats montrent que le modèle est capable de trouver des solutions faisables pour toutes les variations de l'instance et les solutions obtenues sont comparées à des bornes inférieures.

1 Introduction

Cette recherche se fait dans le cadre du projet Plannum qui consiste à étudier et développer des outils et technologies pour faciliter le démantèlement et recyclage d'avions en fin de vie. Le problème étudié dans cet article concerne l'ordonnancement des opérations prenant place durant la phase de désassemblage du processus de recyclage, depuis la réception de l'appareil jusqu'à la découpe sectionnelle et au broyage de la car-

casse. Des technicien-ne-s doivent être assigné-e-s aux tâches durant l'ordonnancement et certaines tâches demandent des niveaux de certification spécifiques. L'objectif principal est de minimiser le temps total pris par l'ensemble du processus de désassemblage. Il est modélisé par une valeur d'échéance (makespan) qui correspond au moment auquel la dernière opération se finit. Un objectif secondaire est de minimiser le coût de démantèlement en limitant l'utilisation des ressources les plus coûteuses. Ce problème est une variante du problème d'ordonnancement de projet multi-compétence (MCPSP) [1], qui est lui même une variation du problème bien connu d'ordonnancement de projet avec ressources contraintes (RCPSP) [2].

Des contraintes additionnelles sont ajoutées par le contexte spécifique du démantèlement d'avions. Premièrement, certaines parties de l'appareil peuvent avoir des restrictions d'espace qui limitent le nombre de technicien-ne-s pouvant travailler au même moment dans ces endroits. L'appareil est donc divisé en zones qui ont chacune une limite d'occupation correspondant au nombre maximal de technicien-ne-s pouvant y travailler simultanément. Deuxièmement, l'appareil doit être gardé équilibré durant tout le processus de désassemblage en s'assurant que la différence de masse entre ses extrémités ne dépasse pas un seuil donné.

2 Modèle

L'approche utilisée pour résoudre ce problème utilise de la programmation par contraintes (PC). Le modèle est implémenté dans CP Optimizer [3] et utilise des variables d'intervalle de temps conditionnelles [4] pour représenter les tâches à effectuer ainsi que l'assignation des technicien-ne-s. Les variables de tâches sont toujours présentes tandis que les variables d'assignation sont optionnelles. Certain-e-s technicien-ne-s peuvent

ne pas être disponibles à certains moments durant la période d'ordonnement. Ces indisponibilités sont aussi modélisées par des variables d'intervalle. Toutes les variables d'intervalle optionnelles d'assignation ainsi que les variables intervalles d'indisponibilité d'un-e même technicien-ne sont sujettes à une contrainte *noOverlap* qui s'assure que chaque technicien-ne n'est jamais assigné-e à plus d'une tâche simultanément et n'est pas assigné-e quand indisponible.

Les contraintes d'équilibre et d'occupation sont modélisées en utilisant des fonctions cumulatives. Il y a deux fonctions cumulatives utilisées pour les contraintes d'équilibre : l'une représente la différence de masse entre l'avant et l'arrière de l'appareil et l'autre fait de même pour l'aile gauche et l'aile droite. Lorsque de la masse est retirée de l'une des extrémités durant une tâche, elle est additionnée ou soustraite à la fonction cumulative correspondante. Ces fonctions cumulatives doivent à tout moment être comprises entre les valeurs seuil de différence de masse maximale autorisée. Les contraintes d'occupation utilisent également des fonctions cumulatives : pour chaque partie de l'appareil, une fonction cumulative modélise le nombre de technicien-ne-s travaillant à cet endroit. Cette fonction cumulative est liée aux opérations prenant place à cet endroit et ne doit jamais dépasser la capacité de la partie de l'appareil correspondante.

Une contrainte *Alternative* est utilisée pour lier les variables d'intervalle de tâches avec les variables d'intervalle conditionnelles d'assignation correspondantes. Finalement, des contraintes de précédence s'assurent que les tâches précédentes sont terminées quand une tâche commence.

Les deux objectifs du problème sont résolus en utilisant une recherche lexicographique : en premier lieu, l'objectif d'échéance est résolu jusqu'à l'optimum ou bien jusqu'à ce qu'une limite donnée soit atteinte. En deuxième lieu, l'objectif de coût est minimisé avec une contrainte additionnelle qui empêche l'objectif d'échéance de se dégrader.

Le modèle est évalué en utilisant un ensemble de scénarios comprenant jusqu'à 1500 tâches. Ceux-ci sont dérivés de données réelles fournies par un partenaire industriel. Nos expériences démontrent que le modèle peut identifier des solutions faisables pour toutes les instances. En revanche, prouver l'optimalité n'est possible que pour les instances les plus petites. Pour les instances plus larges, des solutions sont trouvées avec un écart de 15% de la borne inférieure. Le modèle, les instances et les résultats sont disponibles au répertoire suivant : <https://github.com/cftmthomas/AircraftDisassemblyScheduling>.

Remerciements Ce travail est financé par la région Wallonne (Belgique) dans le cadre du projet Planum. Nous remercions Sabena Engineering pour l'autorisation de diffuser une version anonymisée des données fournies.

Références

- [1] Odile BELLENGUEZ et Emmanuel NÉRON : Lower bounds for the multi-skill project scheduling problem with hierarchical levels of skills. *In International conference on the practice and theory of automated timetabling*, pages 229–243. Springer, 2004.
- [2] Sönke HARTMANN et Dirk BRISKORN : An updated survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 297(1):1–14, 2022.
- [3] Philippe LABORIE, Jérôme ROGERIE, Paul SHAW et Petr VILÍM : Ibm ilog cp optimizer for scheduling : 20+ years of scheduling with constraints at ibm/ilog. *Constraints*, 23:210–250, 2018.
- [4] Philippe LABORIE, Jérôme ROGERIE, Paul SHAW, Petr VILÍM et Ferenc KATAI : Interval-based language for modeling scheduling problems : An extension to constraint programming. *Algebraic Modeling Systems : Modeling and Solving Real World Optimization Problems*, pages 111–143, 2012.
- [5] Charles THOMAS et Pierre SCHAUS : A constraint programming approach for aircraft disassembly scheduling. *In Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, pages 211–220. Springer, 2024.