



**HAL**  
open science

# Un modèle de programmation par contraintes pour la maintenance opérationnelle aéronautique

Jean-Baptiste Sciau, Agathe Goyon, Alexandre Sarazin, Jérémy Bascans,  
Charles Prud'Homme, Xavier Lorca

## ► To cite this version:

Jean-Baptiste Sciau, Agathe Goyon, Alexandre Sarazin, Jérémy Bascans, Charles Prud'Homme, et al..  
Un modèle de programmation par contraintes pour la maintenance opérationnelle aéronautique. JFPC  
2024 Journées Francophones de Programmation par Contraintes, Centre de Recherche en Informatique  
de Lens, Jun 2024, Lens, France. hal-04652791

**HAL Id: hal-04652791**

**<https://hal.science/hal-04652791v1>**

Submitted on 18 Jul 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.

# Un modèle de programmation par contraintes pour la maintenance opérationnelle aéronautique

J.-B. Sciau<sup>1,2\*</sup> A. Goyon<sup>1</sup> A. Sarazin<sup>1</sup> J. Bascans<sup>1</sup> C. Prud'homme<sup>3</sup> X. Lorca<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Airbus Protect, Blagnac, <sup>2</sup> CGI, IMT Albi-Carmaux, Albi, <sup>3</sup> TASC, IMT-Atlantique, Nantes  
<sup>1</sup>{prenom.nom}@airbus.com <sup>2</sup>{prenom.nom}@mines-albi.fr <sup>3</sup>{prenom.nom}@imt-atlantique.fr

Résumé de l'article paru dans le Journal of Air Transport Management, Vol.115 : 0969-6997 (2024), Elsevier.

## Résumé

Les compagnies aériennes cherchent à optimiser leur maintenance pour maximiser le potentiel opérationnel de leur flotte. Leur objectif est de réduire les coûts de maintenance et d'optimiser la gestion des ressources. Le problème de planification de la maintenance opérationnelle aéronautique est décrit comme un Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP). Un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC) est utilisé pour résoudre le problème. Une comparaison avec un solveur industriel est proposée sur des instances réelles.

## 1 Introduction

La maintenance joue un rôle majeur dans le transport aérien. Elle est obligatoire pour assurer la sécurité des passagers mais représente une part importante dans le budget d'une compagnie, entre 10 et 20 % des coûts opérationnels [4]. Aujourd'hui, la majorité de la maintenance aérienne est préventive [3]. Cet article s'intéresse plus particulièrement à la maintenance à court et moyen terme (de quelques jours à quelques mois), dites de "ligne". L'idée est de pouvoir profiter des courts créneaux de maintenance, lorsque l'avion est au sol entre deux vols, afin d'exécuter de "petites" tâches de maintenance (inspections, etc...) pour réduire le temps de maintenance sur les longs créneaux (le week-end ou la nuit). Par conséquent, cette approche permet d'augmenter la disponibilité opérationnelle d'un avion.

La section 2 détaille le problème de maintenance opérationnelle. La section 3 présente la formalisation du RCPSP et sa résolution en utilisant la PPC. Enfin, une comparaison avec un solveur heuristique industriel est proposée en section 4, utilisant des instances réelles.

\*Papier doctorant : J.-B. Sciau<sup>1,2</sup> est auteur principal.

## 2 Description du problème

L'optimisation de la planification fait partie d'un processus global de la maintenance opérationnelle. Tout d'abord, les tâches à effectuer sont identifiées en respectant un échéancier suivant des programmes de maintenance. Ces documents procurent tous les renseignements nécessaires à la planification d'une tâche (la description et l'ordre des différentes actions à réaliser, leurs durées et les ressources requises). Dans la maintenance préventive, les tâches se répètent en respectant une durée maximale entre deux occurrences appelée période. Ceci forme une contrainte de périodicité et fixe une date de butée dans l'exécution des tâches.

D'autre part, la planification de la maintenance doit s'inscrire dans un cadre opérationnel. Les *créneaux de maintenance* sont déduits des plannings de vols. Les ressources de maintenance sont organisées en trois types : les *ressources humaines* (techniciens) maîtrisant parfois plusieurs compétences et ayant leurs propres horaires de travail ; les *équipements sérialisés* (grues, vérins hydrauliques) devant être réservés en avance ; enfin les *ingrédients*, suivis de manière logistique, pouvant être consommables ou réutilisables.

Afin de fournir un planning directement exécutable, le planning doit être précis, à la minute près. Pour cela, trois niveaux de granularité sont distingués.

- La granularité de la *tâche* regroupant les informations générales (périodicité, date butoire).
- Plusieurs *opérations* sont décrites à l'intérieur d'une tâche pouvant être ordonnées.
- Des *activités* élémentaires composent la réalisation d'une opération. Une activité est spécifiée par une ressource requise, une durée et des zones d'intervention sur l'avion.

### 3 Modélisation

Le problème de maintenance aéronautique peut se modéliser sous la forme d'un RCPSP [1]. Il nécessite toutefois certaines extensions par rapport à la forme standard. Tout d'abord, le problème étudié est un Multi-Skill RCPSP (MSRCPSP) du fait de la multi-compétences des ressources humaines. D'autre part, certains ingrédients sont consommables et leurs stocks diminuent après l'exécution de l'activité. Ceci rajoute la particularité de prendre en compte des ressources non renouvelables dans le RCPSP étudié. Enfin, le problème d'optimisation est multi-objectifs. Les planificateurs veulent d'abord planifier le plus de tâches possible puis utiliser le moins possible de ressources additionnelles et enfin planifier le plus proche de la date butoire pour maximiser le potentiel de l'avion. Un ordre lexicographique permet de gérer les priorités imposées par le métier.

La Programmation Par Contraintes (PPC) permet de modéliser et de résoudre efficacement ce problème. En effet, elle permet de répondre aux exigences du métier. Il est relativement facile d'activer ou désactiver des contraintes pour s'adapter aux besoins de chaque compagnie [5]. De plus, les planificateurs demandent un temps de résolution assez rapide (moins de 5 minutes) et de pouvoir reproduire les solutions. Ceci leur permet de comparer différents scénarios de maintenance et de choisir le meilleur. La PPC, étant une méthode déterministe, garantit la reproductibilité des solutions. Enfin une stratégie de recherche constructive a été implémentée permettant de trouver rapidement une première solution satisfaisante d'un point de vue métier. Le processus de décision, suivant une expertise métier, est explicable et compréhensible par les experts.

Le modèle de PPC est décomposé en trois types de contraintes. Des contraintes sont spécifiques à la *maintenance*, par exemple la planification d'une tâche nécessite la planification de toutes ses activités. Les contraintes de *précédence* modélisent l'ordonnancement des opérations, les disjonctions entre les tâches et la contrainte de périodicité. Enfin, les contraintes *cumulatives* vérifient les capacités des ressources. La multi-compétences des ressources humaines et leurs emplois du temps individuel sont gérés grâce à une contrainte de type DIFFN définie par [2].

### 4 Expérimentation

Un cas pratique sur des instances réelles de maintenances est proposé afin de comparer les résultats obtenus avec *Choco-Solver* et un solveur heuristique actuellement utilisé par *Airbus Protect*. L'heuristique utilisée est similaire à celle utilisée dans [6]. La solu-

tion est construite en deux étapes. D'abord les tâches sont planifiées par ordre de priorité et ensuite les ressources sont affectées à chaque activité. La taille des instances utilisées varie d'un horizon d'une semaine à deux mois pour une flotte de quatre avions maximum. Ceci représente des RCPSP entre 319 et 8795 activités.

En comparant les objectifs suivant l'ordre lexicographique (Table 1), le solveur PPC est capable, sur trois instances, de planifier plus de tâches que le solveur heuristique. Dans la majorité des cas, il utilise moins de ressources additionnelles et présente une plus petite déviation par rapport à la date de butée. Même si le solveur PPC prend plus temps à retourner une première solution, il respecte quand même la limite du temps imposée de cinq minutes.

Inst.	Tâches planifiées	Res. add. (\$)	Déviation (min.)	Résolution (sec.)
1	0	-1330	0	+0.123
2	+1	-2660	-7	-0.463
3	0	-1862	+1	+9.442
4	+1	-5852	-113	+12.842
5	+13	14231	-48	+133.155

TABLE 1 – Comparaison des solveurs<sup>1</sup>

1. Comparaison du solveur PPC par rapport au solveur heuristique en valeurs absolues.

### Références

- [1] Christian ARTIGUES, Sophie DEMASSEY et Emmanuel NERON : *Resource-Constrained Project Scheduling : Models, Algorithms, Extensions and Applications*. ISTE/Wiley, 2008.
- [2] N BELDICEANU et E CONTEJEAN : Introducing global constraints in CHIP. *Mathematical and Computer Modelling*, 20(12):97–123, 1994.
- [3] FAA : Advisor circular 43-12a CHG 1-preventive maintenance, 2007.
- [4] U PERIYARSELVAM, T TAMILSELVAN, S THILAKAN et M SHANMUGARAJA : Analysis on costs for aircraft maintenance. *Advances in Aerospace Science and Applications*, pages 177–182, 2013.
- [5] Francesca ROSSI, Peter van BEEK et Toby WALSH : *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier, 2006. Google-Books-ID : Kjap9ZWcKOoC.
- [6] Syed SHAUKAT, Mathias KATSCHER, Cheng-Lung WU, Felipe DELGADO et Homero LARRAIN : Aircraft line maintenance scheduling and optimisation. *Journal of Air Transport Management*, 89:101914, 2020.