



Optimisation de la maintenance en ligne aéronautique par un modèle de programmation par contraintes

Optimization of aircraft line maintenance using a constraint programming model

SCIAU Jean-Baptiste
Airbus Protect
Blagnac
jean-baptiste.sciau@airbus.com

GOYON Agathe
Airbus Protect
Blagnac
agathe.goyon@airbus.com

SARAZIN Alexandre
Airbus Protect
Blagnac
alexandre.sarazin@airbus.com

BASCANS Jérémy
Airbus Protect
Blagnac
jeremy.bascans@airbus.com

PRUD'HOMME Charles
IMT Atlantique
Nantes
charles.prudhomme@imt-atlantique.fr

LORCA Xavier
IMT Albi-Carmaux
Albi
xavier.lorca@mines-albi.fr

RÉSUMÉ

Ce papier est un résumé d'un article paru dans le Journal of Air Transport Management, Vol.115 : 0969-6997 (2024), Elsevier (Sciau, et al., 2024a) et qui a fait l'objet d'une communication aux Journées Francophones de Programmation Par Contraintes (JFPC) 2024 (Sciau, et al., 2024b).

Les compagnies aériennes cherchent à optimiser leur maintenance pour maximiser le potentiel opérationnel de leur flotte. Leurs objectifs sont de réduire les coûts de maintenance et d'optimiser la gestion des ressources. La maintenance dite « en ligne » est une perspective qui permet de réaliser les tâches de maintenance au fur et à mesure sur les créneaux lorsque l'avion est au sol entre deux vols. Toutefois, cette gestion de la maintenance induit une plus grande complexité dans l'élaboration des plannings et des outils sont nécessaires pour assister les planificateurs. Le problème de planification opérationnelle de la maintenance en ligne aéronautique peut être décrit comme un problème à ressources restreintes (Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP)) et un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC) est utilisé pour résoudre ce problème. Une comparaison avec un solveur industriel est proposée sur des instances réelles de maintenance pour illustrer les améliorations et limites de cette approche.

ABSTRACT

This paper is a summary of an article published in the Journal of Air Transport Management, Vol.115: 0969-6997 (2024), Elsevier (Sciau, et al., 2024a) and which was the subject of a talk at the Journées Francophones de Programmation Par Contraintes (JFPC) 2024 (Sciau, et al., 2024b).

Airlines seek to optimize their maintenance to maximize the operational potential of their fleet. Their objectives are to reduce maintenance costs and optimize resource management. So-called "line maintenance" is a perspective that allows maintenance tasks to be carried out as and when required, while the aircraft is on the ground between flights. However, this type of maintenance management leads to greater complexity in scheduling, and tools are needed to assist planners. The operational planning problem for aircraft line maintenance can be described as a Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP), and a Constraint Programming (CP) model is used to solve the problem. A comparison with an industrial solver is proposed on real maintenance instances to illustrate the improvements and limitations of this approach.

MOTS-CLEFS

Maintenance en ligne aéronautique, Optimisation de planification, Programmation par contraintes, RCPSP

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 (PeriyarSelvam, et al. 2013). Actuellement, les compagnies aériennes gèrent principalement leur maintenance de manière préventive systématique (FAA, 2007). Les tâches de maintenance sont définies dans des programmes de maintenance établis par le constructeur de l'avion et complétés par les compagnies en fonction de leur utilisation. Ces travaux de recherche s'intéressent plus particulièrement à la maintenance à court et moyen terme (de quelques jours à quelques mois), dite 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 une gestion plus précise des échéances des tâches et d'augmenter la disponibilité opérationnelle d'un avion. Toutefois, le suivi individuel des tâches, la multiplication des opportunités de maintenance et la gestion des ressources rendent l'exercice de planification très complexe et chronophage pour un humain. Ainsi, les planificateurs ont besoin d'assistants digitaux pour tester et évaluer rapidement les différents scénarios de maintenance. De plus, la gestion des ressources doit être optimisée en prenant en compte une granularité très fine afin de garantir la réalisation du planning par les équipes de maintenance.

Les contributions de ces travaux de recherche se résument en deux points :

- La modélisation du problème de la planification opérationnelle de la maintenance en ligne aéronautique sous la forme d'un projet à ressources restreintes (RCPSP).
- La résolution du problème en utilisant un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC) dans un temps acceptable par utilisateur.

La méthodologie de l'étude est organisée selon le plan suivant. Tout d'abord le problème industriel est décrit pour comprendre le fonctionnement et les particularités de la planification de la maintenance en ligne aéronautique. Ensuite, le problème est formalisé sous la forme d'un RCPSP et un modèle en PPC est proposé, répondant aux contraintes et objectifs d'optimisation identifiés. Une comparaison avec une autre méthode de résolution est présentée dans la partie expérimentale pour justifier le choix de la programmation par contraintes. Enfin, les résultats du modèle PPC sont comparés avec un solveur industriel sur un cas pratique de maintenance.

REVUE DE LITERATURE

La figure 1 illustre les principaux problèmes de planification rencontrés dans la littérature scientifique. Cet état de l'art est structuré en trois niveaux de planification : la planification *stratégique* qui consiste à élaborer plusieurs années en avance les plans de vols et la stratégie financière de la compagnie sur le long terme, la planification *tactique* s'intéressant plusieurs mois en avance aux itinéraires des avions en prenant en compte la maintenance à moyen terme et enfin la planification *opérationnelle* dont le but est d'assurer la réalisation au jour le jour des tâches planifiées et de gérer les imprévus du moment. La planification de la maintenance est fortement liée aux activités d'une compagnie aérienne. Les plannings de vols doivent être en adéquation avec les plannings de maintenance pour assurer leurs réalisations. La maintenance lourde intervient dans un cadre stratégique ou tactique ; elle est prévue plusieurs mois en avance (voire quelques années) et elle peut avoir un impact sur les activités économiques d'une compagnie (immobilisation de l'avion pendant plusieurs jours ou semaines). Les compagnies préféreront donc planifier ces tâches de maintenance sur des périodes d'activités creuses (par exemple hors saison touristique). Cette étude s'inscrit dans un cadre opérationnel et se rapproche des travaux de (Shaukat, et al., 2020) sur la planification de la maintenance en ligne aéronautique. Ce problème de planification cherche à planifier des tâches d'inspections régulières (et obligatoires) dans un planning de vols établi, tout en considérant la disponibilité des ressources et l'aspect logistique des chaînes

69 d'approvisionnement. Ce travail se différencie des autres travaux en prenant en compte une granularité supplémentaire à la
 70 minute et les différentes relations de précedence entre les opérations composant une tâche.

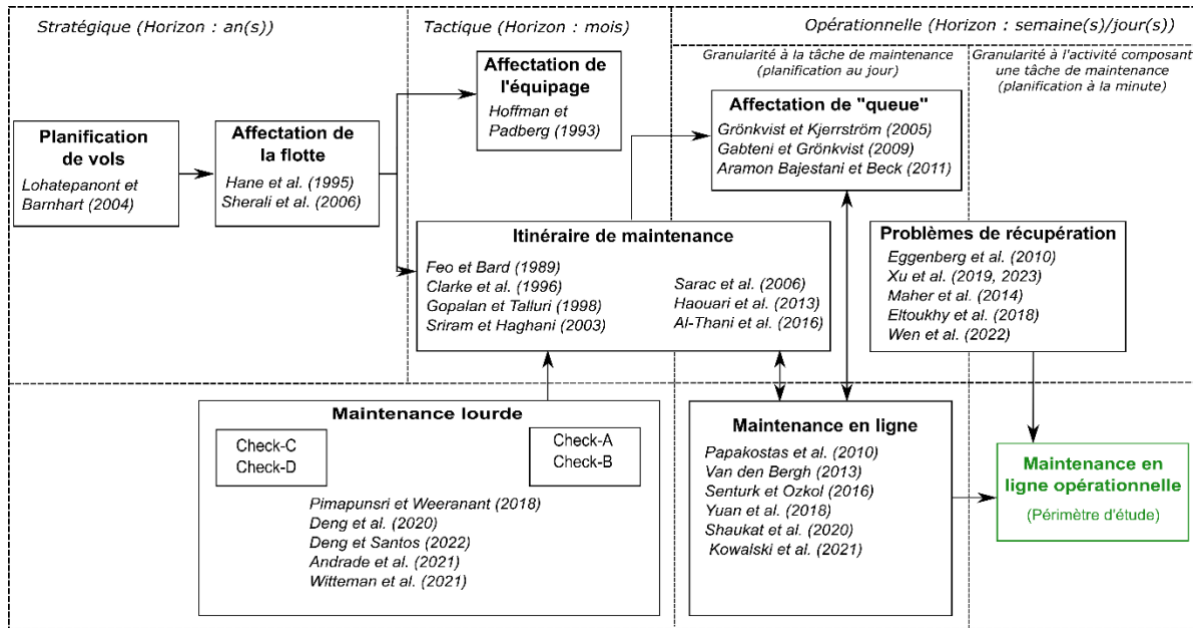


Fig. 1. État de l'art des problèmes de planification aéronautique

MÉTHODOLOGIE

1. Description du problème

L'optimisation de la planification fait partie d'un processus global de la maintenance opérationnelle décrit dans la figure 2. 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 systématique, 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 ;
- Les *ingrédients*, suivis de manière logistique, pouvant être consommables ou réutilisables.

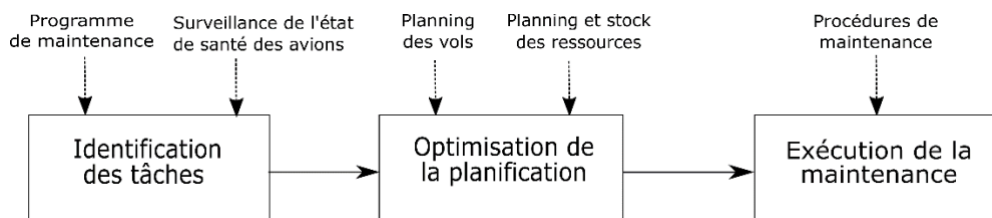


Fig. 2. Processus de la maintenance opérationnelle

Afin de fournir un planning directement exécutable, le planning doit être précis, à la minute près. Pour cela, trois niveaux de granularité sont distingués dans la composition d'une tâche de maintenance.

- La *granularité de la tâche* regroupant les informations générales telles que la périodicité, la date butoir ou les critères de disjonction avec d'autres tâches (par exemple la mise en tension du circuit électrique).
- Plusieurs *opérations* sont décrites à l'intérieur d'une tâche et ces opérations peuvent être ordonnées, définissant ainsi des relations de précedence dans l'exécution d'une tâche.

- 96 • Des *activités élémentaires* composent la réalisation d'une opération. Une activité est définie par une durée
97 d'exécution, des zones d'intervention sur l'avion et elle requière une ressource spécifique caractérisée par une
98 qualification précise.

99 2. *Modélisation*

100 Le problème de planification de la maintenance aéronautique peut se représenter sous la forme d'un RCPSP (Artigues, et al.,
101 2008). Le RCPSP dans sa forme standard est un problème NP-difficile à résoudre (Blazewicz, et al., 1983). Le problème
102 industriel de planification de la maintenance en ligne est un RCPSP particulier qui nécessite certaines extensions. Tout d'abord,
103 le problème étudié est un Multi-Skill RCPSP (MSRCPSP) du fait de la multi-compétences des ressources humaines. Ensuite, les
104 ingrédients peuvent être consommables et leurs stocks diminuent après l'exécution de l'activité. Ainsi le RCPSP doit prendre en
105 compte des ressources non renouvelables. Enfin, l'optimisation du problème doit considérer plusieurs objectifs qui sont organisés
106 selon l'ordre suivant. Le premier objectif consiste à maximiser le nombre de tâches planifiées. Ensuite, la solution de planning
107 doit utiliser le plus possible de ressources disponibles en stock afin de réduire le coût d'utilisation de ressources additionnelles.
108 Enfin, le dernier objectif est de planifier le plus proche de la date d'échéance des tâches pour maximiser le potentiel de l'avion.
109 Un ordre lexicographique permet de gérer l'ordre entre ces objectifs qui répondent à des priorités définies par le métier.

110 La Programmation Par Contraintes (PPC) permet de modéliser et de résoudre efficacement ce type de problème. En effet,
111 elle permet de répondre aux exigences du métier. Il est relativement facile d'activer ou désactiver des contraintes ou de modifier
112 les objectifs d'optimisation pour s'adapter aux besoins de chaque compagnie (Rossi, et al., 2006). De plus, les planificateurs
113 demandent un temps de résolution assez rapide (moins de 5 minutes) et de pouvoir reproduire les solutions. Ceci leur permet de
114 comparer différents scénarios de maintenance et de choisir le meilleur. La PPC est une méthode déterministe pouvant garantir la
115 reproductibilité des solutions. Le modèle en PPC proposé se compose de variables de tâches (une pour chaque tâche et chaque
116 activité de maintenance) définies par une date de début, une durée et une date de fin. Pour chaque tâche, une variable représente
117 son créneau de maintenance assigné. Enfin, une variable est définie pour chaque activité, désignant la ressource en charge de son
118 exécution. Les contraintes du modèle sont décomposées en trois types. Des contraintes sont spécifiques à la *maintenance*, comme
119 par exemple le fait de planifier une tâche sur un créneau de maintenance lorsque l'avion est au sol ou que la planification d'une
120 tâche nécessite la planification de toutes ses activités. Les contraintes de *précédence* modélisent le respect de la périodicité entre
121 les tâches d'une même série mais aussi l'ordonnement des opérations à l'intérieur d'une tâche. Des contraintes *disjonctives*
122 (Carlier, 1982) permettent de gérer des tâches qui ne peuvent pas être exécutées en même temps pour différents critères. Enfin,
123 les contraintes *cumulatives* (Aggoun & Beldiceanu, 1993) vérifient la capacité des ressources et la capacité dans les zones
124 d'intervention de l'avion. La multi-compétences des ressources humaines et leurs emplois du temps individuels sont gérés grâce
125 à une contrainte *DiffN* définie par (Beldiceanu & Contejan, 1994).

126 Enfin une stratégie de recherche constructive a été implémentée permettant de trouver rapidement une première solution
127 satisfaisante d'un point de vue métier. Le processus de décision, décrit par la figure 3, suit une logique métier, ce qui permet
128 d'expliquer à un expert la construction du planning retourné. La stratégie utilisée est principalement guidée par les tâches.
129 Plusieurs critères sont pris en compte pour déterminer l'ordre de priorité des tâches dans le processus de planification, comme le
130 niveau de maintenance, le nombre d'activités présentes dans une tâche, l'intervalle de répétition d'une tâche (périodicité), le
131 nombre de créneaux de maintenance potentiellement disponibles etc... Ainsi, pour chaque tâche, un créneau de maintenance est
132 attribué. Ensuite, après avoir trié les activités à faire à l'intérieur d'une tâche en fonction de leur durée et des qualifications
133 requises, le processus consiste à sélectionner une ressource adéquate (avec la qualification requise et disponible) pour chaque
134 activité. Une fois la ressource choisie, la date de début de chaque activité d'une tâche est choisie (le plus proche du début du
135 slot), ce qui permet en suivant de fixer la durée de la tâche et sa date de début. Les valeurs de ses variables sont choisies de sorte
136 à planifier les tâches en début de slot et à minimiser le temps d'exécution d'une tâche. Par conséquent, l'exécution des activités
137 en parallèle est privilégiée. À chaque décision, la propagation des contraintes (au travers d'algorithmes de filtrage) permet de
138 réduire les domaines de valeurs des autres variables qui doivent encore être instanciées. Lorsqu'une incohérence est détectée
139 (violation d'une contrainte), la dernière décision est remise en cause et une autre valeur est choisie. Le processus s'arrête lorsque
140 toutes les variables sont instanciées (retournant une solution) ou lorsque tous les domaines des variables sont vides aboutissant à
141 l'infaisabilité d'une solution. Cette stratégie de recherche constructive permet de trouver, sur une petite instance de test (simulant
142 la maintenance de 3 avions sur 15 jours), une première solution en 12 secondes à moins de 1% de la solution optimale.

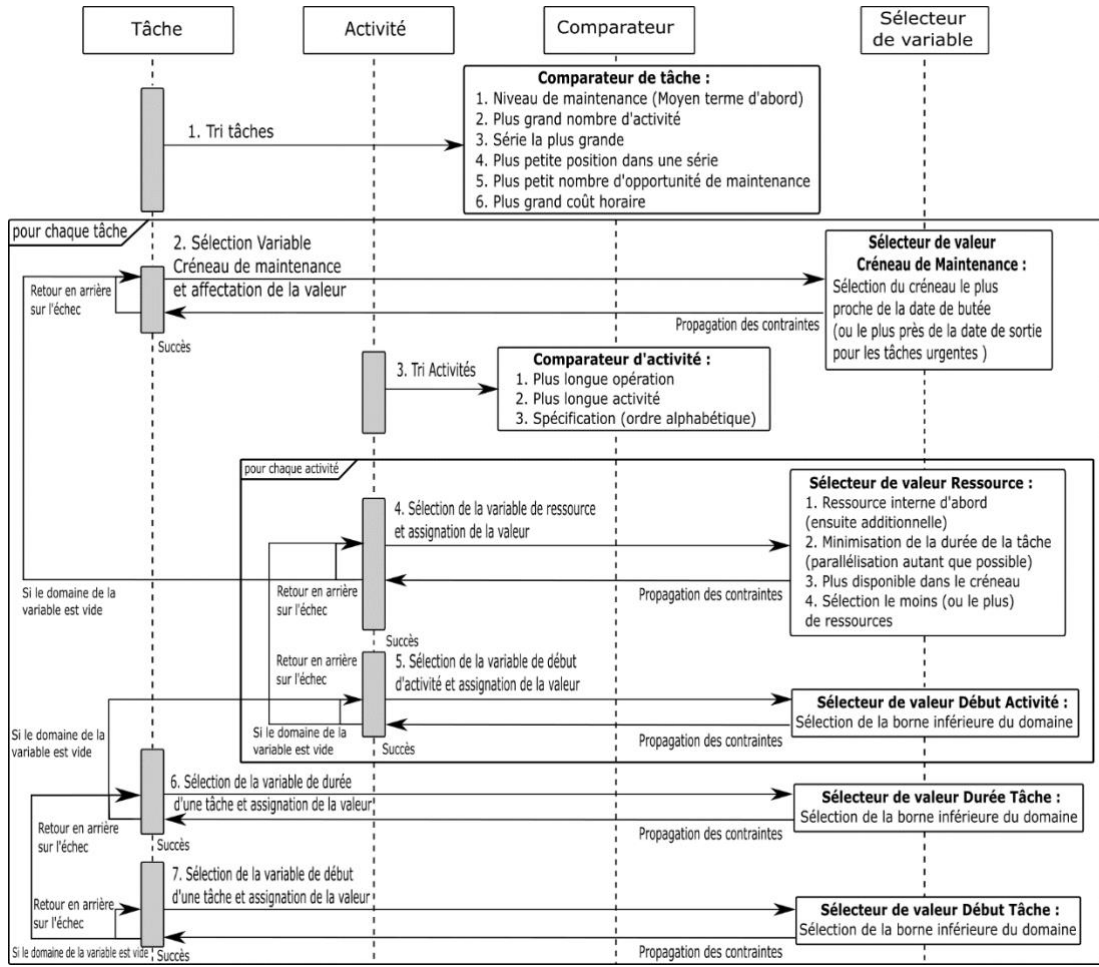


Fig. 3. Diagramme séquentiel du processus de décision de la stratégie de recherche constructive

144

145

146

147

RÉSULTATS

148

149

150

151

152

153

154

155

La partie expérimentale de cette étude est scindée en deux parties. Tout d’abord, une expérience consiste à comparer sur une petite instance représentative, la résolution de solveurs en PPC avec une autre méthode de résolution utilisée dans la résolution de RCPS, la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE). Les résultats montrent que les solveurs en PLNE utilisent beaucoup plus de variables et de contraintes que les solveurs en PPC. Par conséquent, la taille de leurs modèles est plus importante. Les solveurs en PPC trouvent la solution optimale dans l’ordre de la minute alors qu’il faut plusieurs heures pour les solveurs linéaires. Par ailleurs, à qualité équivalente, les solveurs PPC sont capables de retourner une première solution en moins de cinq minutes alors qu’il faut minimum 45min pour les solveurs en PLNE. Cette expérience a été réalisée en utilisant le logiciel *MiniZinc* et est disponible en libre accès sur : <https://anonymous.4open.science/r/OALMSPmz-237F/>

156

157

158

159

160

D’autre part, un cas pratique sur des instances réelles de maintenance est présenté afin de comparer les résultats obtenus par le modèle PPC et un solveur heuristique actuellement utilisé par l’entreprise Airbus Protect. L’heuristique utilisée est similaire à celle utilisée dans (Shaukat, et al., 2020). La solution de planning est construite en deux étapes. D’abord les tâches sont planifiées par ordre de priorité sur un créneau de maintenance et ensuite les ressources sont affectées à chaque activité. Le solveur choisit pour le modèle en PPC est *Choco-Solver*.

161

TABLE I. COMPARAISON DU SOLVEUR EN PPC PAR RAPPORT AU SOLVEUR HEURISTIQUE (EN VALEUR ABSOLUE)

Instance	Nb tâches planifiées	Coût ressources additionnelles (en \$)	Déviations par rapport à la date de butée (en min.)	Temps de résolution (en sec.)
1	0	-1330	0	+0.123
2	+1	-2260	-7	-0.463
3	0	-1862	+1	+9.442
4	+1	-5852	-113	+12.842
5	+13	+14231	-48	+133.155
6	-	-	-	-

162

163 La taille des instances utilisées varie d'un horizon d'une semaine à deux mois pour une flotte de quatre avions, représentant
164 un problème entre 28 et 731 tâches, soit un RCPSP entre 319 et 8795 activités. En comparant les objectifs suivant l'ordre
165 lexicographique définit (voir Table 1), le solveur en PPC est capable, sur trois instances, de planifier plus de tâches que le solveur
166 heuristique. Dans la majorité des cas, il utilise moins de ressources additionnelles et présente une plus petite déviation par rapport
167 à la date de butée. Même si le solveur PPC prend plus temps à retourner une première solution, il respecte quand même la limite
168 du temps imposée de cinq minutes, ce qui est acceptable d'un point de vue métier. Toutefois, le solveur PPC présente une limite
169 à résoudre la plus grande instance sur un horizon de deux mois avec 700 tâches et plus de 8000 activités.

170

171 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

172 La partie expérimentale montre des limites de résolution du solveur sur des instances avec un horizon de planification de
173 deux mois et une flotte de quatre avions. L'horizon visé pour une application industrielle est de l'ordre du trimestre en considérant
174 une flotte moyenne d'environ 10 avions. Ainsi, des efforts supplémentaires doivent être encore réalisés. D'autre part, cette étude
175 considère uniquement la maintenance préventive systématique alors que les compagnies réfléchissent à intégrer d'autres types
176 de maintenance comme la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle qui visent à étudier en continue l'état d'un système et
177 déclencher une tâche de maintenance en fonction d'une condition ou d'une estimation de sa durée restante. Par conséquent, ces
178 travaux ouvrent deux types de perspectives :

- 179 • Des perspectives dans l'amélioration de la résolution du problème. L'étude de méthodes de décomposition pour
180 résoudre un RCPSP est envisagée afin de casser la complexité du problème global en plusieurs sous-problèmes plus
181 facile à résoudre. La Génération de Colonnes est une piste à explorer. D'autre part, des décompositions heuristiques
182 peuvent être utilisées, renonçant à la preuve d'optimalité mais permettant de retourner une solution sur de grandes
183 instances. Enfin, l'amélioration des solutions retournées est une piste pour de prochains travaux, notamment par
184 l'étude de solutions voisines (Large Neighborhood Search) à celle retournée par la stratégie de recherche
185 constructive.
- 186 • Des perspectives pour une utilisation industrielle de l'outil de planification. Le modèle proposé peut être testé dans
187 différents cas pratiques. Comme évoqué précédemment, l'outil doit être capable d'intégrer différentes formes de
188 maintenance. Par exemple, une perspective est de le tester dans un contexte plus dynamique incluant des événements
189 imprévus. Des pannes peuvent apparaître et le solveur doit réagir rapidement pour mettre à jour le planning de
190 maintenance en conséquence. On parle de maintenance corrective. A l'opposé, afin de prévenir des pannes et des
191 perturbations dans le planning la maintenance préventive impose une gestion proactive de la planification. Une
192 gestion du risque en anticipant les perturbations peut être mise en place. Le solveur doit être aussi capable de prendre
193 en compte cette information dans sa planification afin de minimiser le risque encouru. Par exemple des marges
194 temporelles définissant des intervalles de risque peuvent être mise en place. Enfin, l'observation en continue permise
195 par la maintenance conditionnelle et prévisionnelle peut provoquer un flux important des informations et des
196 changements dans les prédictions envoyées. L'outil doit être capable d'ingérer ce flux d'information et de maintenir
197 en conséquence le planning de maintenance.

198

199 CONCLUSION

200 Ce papier résume un travail de recherche publié dans un article du Journal of Air Transport Management (Sciau, et al., 2024).
201 Le problème de la planification opérationnelle de maintenance en ligne aéronautique est décrit comme un RCPSP Multi-
202 compétences avec quelques extensions appliquées à la maintenance. Un modèle de Programmation Par Contraintes (PPC) est
203 présenté afin de modéliser et résoudre le problème. Ces recherches ont pour but d'assister les planificateurs dans l'optimisation
204 de la maintenance. Ces outils peuvent permettre de planifier un grand nombre de tâches de maintenance en maximisant le
205 potentiel opérationnel d'une flotte et en gérant la disponibilité des ressources. Le modèle proposé considère une granularité
206 opérationnelle très fine garantissant l'exécution de plannings par les équipes de maintenance. Par ailleurs, la méthode proposée
207 permet de retrouver rapidement une solution ce qui permet aux planificateurs de visualiser plusieurs scénarios de maintenance.
208 Ceci présente un bénéfice important pour les compagnies notamment dans le cadre de la maintenance en ligne où l'aspect
209 combinatoire peut très vite exploser rendant l'exploration des solutions impossible pour un humain.

210 Les résultats expérimentaux permettent de justifier le choix de la programmation par contraintes en comparaison avec une
211 autre méthode de résolution. En outre, l'approche en PPC est comparée avec un solveur industriel basé sur une heuristique. Les
212 résultats montrent des améliorations du solveur PPC sur les principaux objectifs d'optimisation, notamment en termes de tâches
213 planifiées, d'utilisation des ressources et d'optimisation du potentiel de l'avion. Cependant, le modèle présente certaines limites
214 à résoudre dans un temps raisonnable de grandes instances supérieures à deux mois. Par ailleurs, d'autres perspectives sont
215 envisagées en vue d'une utilisation pratique dans un contexte industriel.

216

217 BIBLIOGRAPHIE

- 218 (FAA), F. A. (2007). *Advisor Circular 43-12A {CHG} 1-Preventive Maintenance*.
219 Aggoun, A., & Beldiceanu, N. (1993). Extending chip in order to solve complex scheduling and placement problems.
220 *Mathematical and Computer Modelling*, 57-73.

- 221 Artigues, C., Demasse, S., & Neron, E. (2008). *Resource-Constrained Project Scheduling: Models, Algorithms, Extensions*
222 *and Applications*. ISTE/Wiley.
- 223 Beldiceanu, N., & Contejan, E. (1994). Introducing global constraints in CHIP. *Mathematical and Computer Modelling*, 97-
224 123.
- 225 Blazewicz, J., Lenstra, J., & Kan, A. (1983). Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity.
226 *Discrete Applied Mathematics*, 11-24.
- 227 Carlier, J. (1982). The one-machine sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, 42-47.
- 228 PeriyarSelvam, Tamilselvan, Thilakan, & Shanmugaraja. (2013). Analysis on Costs for Aircraft Maintenance. *Advances in*
229 *Aerospace Science and Applications*, 177-182.
- 230 Rossi, F., Beek, P. v., & Walsh, T. (2006). *Handbook of Constraint Programming*. Elsevier.
- 231 Sciau, J.-B., Goyon, A., Sarazin, A., Bascans, J., Prud'homme, C., & Lorca, X. (2024). Using constraint programming to
232 address the operational aircraft line maintenance scheduling problem. *Journal of Air Transport Management*,
233 102537.
- 234 Sciau, J.-B., Goyon, A., Sarazin, A., Bascans, J., Prud'homme, C., & Lorca, X. (2024). Un modèle de programmation par
235 contraintes pour la maintenance opérationnelle aéronautique. *JFPC 2024 Journées Francophones de*
236 *Programmation par Contraintes*. Lens.
- 237 Shaukat, S., Katscher, M., Wu, C.-L., Delgado, F., & Larrain, H. (2020). Aircraft line maintenance scheduling and
238 optimisation. *Journal of Air Transport Management*, 101914.
- 239