ÉTAT DE L'ART SUR LE DISRUPTION MANAGEMENT PROBLEM DANS L'AÉRIEN

1. Introduction

Le *Disruption Management* dans l'aérien correspond à la façon dont on peut modifier le planning des vols, des maintenances voire des équipages lorsque ces derniers deviennent infaisables en raison d'imprévus. Le *Disruption Management Problem* dans l'aérien désigne le problème consistant à trouver la façon la moins coûteuse pour la compagnie aérienne de réorganiser les différents plannings de façon à obtenir de nouveaux plannings réalisables. La littérature autour de ce sujet est relativement bien fournie. C'est pourquoi, nous proposons ici un état de l'art qui regroupe les articles les plus importants et les plus intéressants selon nous. Un état de l'art exhaustif peut être trouvé dans [4].

2. Revue de la littérature

2.1. **Premiers efforts sur l'*Aircraft recovery problem*.** Les premiers articles publiés sur le problème du *Disruption Management* se concentrent uniquement sur le problème de la réallocation des vols aux avions et de leur replanification (i.e. attribution de nouveaux horaires) lorsque un ou plusieurs avions sont indisponibles pour des raisons techniques. Ce problème est largement appelé *Aircraft recovery problem.*

Le premier article sur le sujet est l'article de Teodorović et Guberinić [8]. Ils supposent qu'un ou plusieurs avions est indisponible et cherchent à trouver une réallocation et une replanification des vols aux avions restants telles que tous les vols soient maintenus. L'objectif est de minimiser les retards occasionnés par rapport aux horaires initiaux. Les nouveaux horaires ne peuvent par ailleurs pas précéder les horaires initiaux. Ils proposent une modélisation sous la forme d'un graphe dont les nœuds sont les avions disponibles et les vols. Chaque «nœud-avion» est relié à tous les «nœuds-vols» et deux «nœuds-vols» sont reliés si le premier arrive dans l'aéroport dans lequel le second décolle. Les arcs entre deux «nœuds-vols» sont pondérés par le retard occasionné par l'enchaînement des deux vols. La détermination de la réallocation optimale des avions revient à trouver une chaîne hamiltonienne de poids minimum sur ce graphe. Pour trouver une chaîne hamiltonienne de poids minimum, les auteurs utilisent un Branch and Bound. La question de la complexité n'est pas abordée.

Ce travail a été étendu par Teodorović et Stojković dans [9]. Le problème sur lequel ils se penchent est le même sauf qu'ils s'autorisent ici à supprimer certains vols. L'objectif n'est alors plus seulement de minimiser le retard total occasionné mais également le nombre de vols supprimés. En outre, les nouveaux horaires doivent être compris dans des plages horaires donnés. Ils écrivent le problème sous la forme d'un problème d'optimisation lexicographique sous contraintes dans lequel la première fonction objectif est le nombre de vols maintenus (quantité à maximiser) et la seconde fonction objectif est le retard total sur les vols maintenus (quantité à minimiser). Pour résoudre le problème d'optimisation lexicographique, ils proposent une heuristique qui procède séquentiellement, c'est-à-dire qu'elle commence par affecter une chaîne de vols au premier avion disponible, puis au second, et ainsi de suite jusqu'au dernier avion. À nouveau, la question de la complexité n'est pas abordée.

Jarrah et al. [5] proposent deux modèles pour résoudre l'*Aircraft recovery problem*. Le premier, appelé *Delay model* s'autorise uniquement à retarder les vols tandis que le second, appelé *Cancellation model* s'autorise uniquement à supprimer des vols – il n'y a donc pas d'arbitrages entre retarder et supprimer les vols. Les deux modèles s'autorisent en revanche à recourir à des avions de réserve, à modifier l'affectation des avions aux vols et à réutiliser les avions momentanément indisponibles, une fois ceux-ci de nouveau disponibles. Toutefois, on ne peut affecter qu'un seul vol à chaque avion. Le premier modèle est formulé sous la forme d'un pur problème de flot de coût minimum tandis que le second est formulé sous la forme d'un problème de flot de coût minimum avec des contraintes supplémentaires de sorte que le premier peut être résolu en temps polynomial tandis que le second est NP-difficile. Les deux sont résolus avec l'algorithme de Busacker-Gowen.

Yan et Yang [13] sont les premiers à proposer un modèle qui s'autorise à la fois à retarder et à supprimer des vols. Ils s'autorisent en plus à faire du *ferrying*, c'est-à-dire à faire voler des avions à vide pour les repositionner sur des aéroports ayant une demande en avions. En revanche, ils ne considèrent qu'un seul avion est en panne et ne considèrent qu'une seule sous-flotte de sorte qu'on ne se préoccupe pas de savoir quels vols sont affectés à quel avion. Le modèle s'appuie sur une représentation du problème sous la forme d'un graphe en temps et en espace (le graphe est représenté dans un repère dont l'axe horizontal correspond à la localisation des aéroports et l'axe vertical au temps). Chaque nœud correspond à un aéroport à un instant donné et chaque arc à une activité pour un avion (vol, maintien au sol, *ferry*, ...). Chaque vol ne peut être retardé que de certaines durées données. Ainsi, les différents départs possibles pour un vol peuvent être représentés en ajoutant autant d'arcs que de départs possibles au graphe. Le modèle est formulé sous la forme d'un problème de flot de coût minimum avec des contraintes supplémentaires (connu comme étant NP-difficile) et est résolu par relaxation lagrangienne avec la méthode de sous-gradient.

Cao et Kanafani [2][3] se basent sur les modèles de Jarrah pour proposer un modèle qui prend en compte à la fois les retards et les suppressions. Tout comme Jarrah, ils s'autorisent à recourir à des avions de réserve, à modifier l'affectation des avions aux vols et à réutiliser les avions momentanément indisponibles, une fois ceux-ci de nouveau disponibles. Ils s'autorisent de plus à faire du *ferrying*. Le problème ne permet en revanche de traiter qu'au plus 3 aéroports. En outre, contrairement à Jarrah, un avion peut faire plusieurs vols. Le problème est formulé sous la forme d'un problème d'optimisation quadratique à variables binaires et il est résolu avec une heuristique. La question de la complexité n'est pas abordée.

Thengvall et al [10] reprennent la formulation du problème sous la forme d'un problème de flot et la représentation associée proposées par [13] sauf que les coûts sur les arcs ne représentent plus des coûts pour la compagnie aérienne mais des profits de sorte qu'ils cherchent un flot de coût maximum. Ils ne considèrent également qu'une seule sous-flotte. Leur contribution est d'ajouter des incitations dans le modèle de sorte que la solution ne dévie pas trop du planning initial. Ils ajoutent, en effet, des arcs de «protection» qui partent typiquement d'un nœud correspondant à l'aéroport de départ du 1^{er} vol d'un avion et arrivent sur un nœud correspondant à l'aéroport sur lequel arrive le dernier vol du même avion et ayant un profit supérieur au profit obtenu si les vols avaient été réalisés par des avions différents de sorte à privilégier les solutions qui ne modifient pas les rotations des avions. Le problème de flot est formulé comme un PLNE. Ils résolvent la relaxation linéaire du PLNE puis utilisent une heuristique si la solution est fractionnaire. Ce modèle est prolongé dans [11] pour pouvoir gérer plusieurs sous-flottes.

Rosenberg et al [6] proposent une approche différente de celle des flots. Ils proposent, en effet, une modélisation du problème sous la forme d'un *set-packing problem*. Au lieu de chercher à affecter directement des vols aux avions, ils considèrent un ensemble de rotations réalisables pour chaque avion et affecte à chaque avion l'une de ces rotations. Les vols qui ne sont pas couverts par les nouvelles rotations sont ceux qui sont supprimés. L'objectif est de minimiser le coût total des changements de routes (essentiellement dû aux retards induits) et des suppressions. Ils considèrent de plus deux contraintes sur le nombre d'arrivées dans les aéroports. Dans la mesure où le nombre de routes alternatives peut être considérable, ils proposent une heuristique pour construire un ensemble restreint (et donc de rotations alternatives) d'avions à considérer. Le modèle est écrit comme un PLNE et résolu avec CPLEX.

2.2. **Travaux sur le *Crew Recovery Problem*.** Dans les travaux abordés dans la section précédente, il n'est jamais question des contraintes sur les équipages. Nous présentons ici brièvement quelques articles qui traitent de la façon dont les *crew pairing* sont modifiés lorsqu'une compagnie aérienne est sujette à des événements imprévus qui rendent le planning initial infaisable.

Wei et al [12] supposent que le *Aircraft recovery problem* a déjà été résolu et cherchent à construire une nouvelle affectation des équipages aux vols qui couvre tous les vols du nouveau planning. En plus de couvrir tous les vols, la nouvelle affectation des équipages doit faire en sorte qu'à la fin de la période de perturbation, chaque équipage se trouve dans l'aéroport dans lequel il devrait être à cet instant selon le planning originel et ce afin que chaque équipage puisse revenir au planning originel à la fin de la période de perturbation. En outre, ils s'autorisent à recourir à des équipages de réserve. Ils formulent le problème sous la forme d'un problème de flot avec des contraintes de couverture sur les vols. Le problème peut également être vu comme un *set-covering problem*. Ils proposent un algorithme de *depth-first branch-and-bound search* pour le résoudre. Celui-ci vise à minimiser le nombre de modifications par rapport au planning initial et lorsqu'il y a des modifications à minimiser leur ampleur.

Stojković et Soumis [7] cherchent à construire une nouvelle affectation des pilotes aux vols lors d'une journée perturbée mais contrairement à [12], ils s'autorisent également à retarder certains vols dont l'horaire est considéré comme flexible. Pour les vols dont l'horaire est flexible, ils se donnent une fenêtre de temps dans laquelle le nouvel horaire peut se trouver. Tous les vols doivent être couverts par exactement un pilote mais un pilote ne doit pas nécessairement finir sa rotation dans l'aéroport prévu par le planning originel à la fin de la période de perturbation. Pour chaque pilote, ils proposent une modélisation du problème sous la forme d'un DAG dont les nœuds correspondent à un sous-ensemble de l'ensemble des vols plus une source et un puits et les arcs à la possibilité d'enchaîner deux vols compte tenu des fenêtres de temps sur les horaires des vols et des temps de connexions. Ils formulent ainsi naturellement le problème sous la forme d'un problème de flot avec des contraintes supplémentaires qui font en sorte que tous les vols soient couverts et que les horaires des vols qui s'enchaînent soient séparés par suffisamment de temps pour être réalisables. Le problème s'écrit sous la forme d'un MIP non linéaire dont l'objectif et de minimiser le retard et les coûts d'affectation des pilotes aux vols. Il est résolu par génération de colonnes avec un problème maître et un sous-problème par pilote.

2.3. **Travaux sur le *Passenger Recovery Problem*.** Les travaux présentés à ce stade ne tiennent pas bien compte de l'impact de la modification des plannings sur les passagers. Nous avons remarqué qu'assez peu de travaux ont été publiés sur le sujet bien que ce problème semble très important pour une compagnie aérienne. Nous présentons ici deux articles qui s'intéressent à ce problème.

Le premier article publié sur le sujet a été écrit par Bratu et Barnhart [1]. Ils y décrivent deux modèles dans lesquels ils s'autorisent à retarder (uniquement de certains temps donnés) et à supprimer des vols ainsi qu'à recourir à des équipages de réserve lorsqu'un vol est supprimé ou lorsqu'un équipage n'a pas assez de temps pour changer d'avion entre deux vols. Dans le premier modèle, en plus des coûts opérationnels pour la compagnie de retarder un vol ou de recourir à un équipage de réserve, figurent dans la fonction objectif deux autres termes qui mesurent l'insatisfaction globale des passagers en fonction du nombre de passagers qui subissent une perturbation (retard, correspondance ratée, suppression) dans leur itinéraire et en fonction de la gravité de cette perturbation. Ces coûts sont néanmoins des approximations. C'est pourquoi, ils proposent un second modèle qui étend le premier et permet de calculer plus précisément les coûts de perturbation des passagers. Dans ce modèle, lorsque des passagers ratent une correspondance ou lorsqu'un vol est supprimé, les passagers doivent être réaffectés sur un vol alternatif qui peut éventuellement appartenir à une autre compagnie. Le coût associé est alors d'autant plus élevé qu'il est difficile de réaffecter des passagers sur un ou plusieurs vols alternatifs et que le nombre de passagers à réaffecter est élevé. Les deux modèles sont écrits sous la forme de PLNE et sont résolus grâce à CPLEX.

Références

[1] S. Bratu and C. Barnhart. Flight operations recovery : new approaches considering passenger recovery. *Journal of Scheduling*, 9 :279–298, 2006.

[2] J-M. Cao and A. Kanafani. Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays, part i : mathematical formulation. *Transportation Planning and Technology*, 20 :183–199, 1997.

[3] J-M. Cao and A. Kanafani. Real-time decision support for integration of airline flight cancellations and delays, part ii : algorithm and computational experiments. *Transportation Planning and Technology*, 20 :201–217, 1997.

[4] J. Clausen, A. Larsen, J. Larsen, and N.J. Rezanova. Disruption management in the airline industry — concepts, models and methods. *Computers and Operations Research*, 37 :809–821, 2010.

[5] A. Jarrah, G. Yu, N. Krishnamurthy, and A. Rakshit. A decision support framework for airline flight cancellations and delays. *Transportation Science*, 27 :266–280, 1993.

[6] J. Rosenberger, E. Johnson, and G. Nemhauser. Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 37 :408–421, 2003.

[7] M. Stojković and F. Soumis. An optimization model for the simultaneous operational flight and pilot scheduling problem. *Management Science*, 47 :1290–1305, 2001.

[8] D. Teodorović and S. Guberinić. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, 15 :178–182, 1984.

[9] D. Teodorović and G. Stojković. Model for operational daily airline scheduling. *Transportation Planning and Technology*, 14 :273–285, 1990.

[10] B. Thengvall, J. Bard, and G. Yu. Balancing user preferences for aircraft schedule recovery during irregular operations. *IIE Transactions*, 32 :181–193, 2000.

[11] B. Thengvall, J. Bard, and G. Yu. Multiple fleet aircraft schedule recovery following hub closures. *Transportation Research Part A*, 35 :289–308, 2001.

[12] G. Wei, G. Yu, and M. Song. Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1 :305–321, 1997.

[13] S. Yan and D-H. Yang. A decision support framework for handling schedule. *Transportation Research. Part B : Methodology*, 30 :405–419, 1996.