

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SOLUTION ROBUSTE POUR LE PROBLÈME HEBDOMADAIRE
D'AFFECTATION DES TYPES D'AVIONS AUX VOLS

AIT-BENALI SAMIRA
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES)
AOÛT 2006

© Samira AIT-BENALI, 2006.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19277-1

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19277-1

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

SOLUTION ROBUSTE POUR LE PROBLÈME HEBDOMADAIRE
D'AFFECTATION DES TYPES D'AVIONS AUX VOLS

présenté par : AIT-BENALI Samira

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. DESAULNIERS Guy, Ph.D., président

M. SOUMIS François, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. ORBAN Dominique, Doct. Sc., membre

À ma très chère fille, INES AMELIA.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement mon directeur de recherche M. François Soumis pour vouloir diriger ce travail de recherche, ses contributions professionnelles et financières, son soutien moral et ses orientations dont j'ai bénéficié, tout au long de mes études.

Je remercie également M^{me} Alexa Chegrinec et M^{me} Andrée Boutin, employées d'Air Canada, pour m'avoir fourni les données de la compagnie afin de réaliser mon projet de recherche.

J'adresse un grand merci à M. Nicolas Bélanger pour son aide dans le cadre informatique et de sa disponibilité à répondre à mes questions.

Mes remerciements à M. Guy Desaulniers (président) et M. Dominique Orban (membre) pour l'intérêt qu'ils ont voulu porter à ce travail en acceptant de faire partie du jury.

Un grand merci à M^{me} Anita Beauchamp, agente d'administration HEC Montréal, pour son aide et son soutien moral durant les jours difficiles, ainsi qu'à toute l'équipe administrative, professeurs et collègues étudiants du centre de recherche GERAD.

J'en profite également pour remercier M. Antoine Karam pour ses conseils, son soutien moral, et ses orientations durant ces deux dernières années.

Finalement, je remercie ma mère, mes soeurs et mes frères ainsi que toute ma famille pour leurs encouragements, conseils, et soutiens moral et financier tout au long de ce périple qui tire maintenant à sa fin. Malgré la distance qui nous sépare, vous êtes toujours restés présents.

RÉSUMÉ

Ce mémoire porte sur le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avions aux vols dans un contexte de planification stratégique. Étant donné une flotte de différents types d'avions et un ensemble de vols à effectuer, on s'intéresse au problème d'affecter un type d'avion à chacun des vols sur un horizon d'une semaine de façon à maximiser le bénéfice qui est la différence entre les coûts des avions et les revenus provenant des passagers. Une solution réalisable doit permettre de construire des itinéraires réalisables pour les avions de la flotte en couvrant tous les vols sans excéder le nombre d'avions disponibles de chaque type, et assurer des horaires d'avions robustes en cas de mauvaises conditions météorologiques qui engendrent des retards et/ou annulations des vols pouvant, par la suite, perturber le réseau aérien.

Dans ce cas, on présente une méthodologie pour produire des horaires d'avions robustes qui sont moins vulnérables aux perturbations causées par le mauvais temps. Dans cette méthodologie, l'ensemble des vols est partitionné en plusieurs sous-horaires d'avions selon le nombre d'aéroports touchés par les problèmes météorologiques et qui sont distribués dans une nouvelle structure nommée : *structure de fleur*. Chaque partie de la fleur contient des vols qui sont placés en priorité en se basant sur les revenus provenant des passagers.

Un pétale de la fleur contient des vols locaux autour d'un aéroport. Lorsque la capacité des aéroports est réduite, quelques uns de ces vols peuvent être annulés sans propager les perturbations dans le reste du réseau aérien. Cela réduira le revenu perdu causé par les perturbations.

Pour ce faire, nous proposons un modèle linéaire en nombres entiers basé sur la formulation mathématique du problème de flot dans un réseau espace-temps de type

multicommodité. Cette formulation est une adaptation du problème de base d'affectation des types d'avions aux vols (FAP) proposé par Subramanian et al. (1994), Hane et al. (1995) et Bélanger (2004) sans introduire les contraintes d'homogénéité.

Des tests numériques ont été effectués sur un jeu de données fourni par la compagnie Air Canada correspondant à la saison été 2002 sur un horizon d'un jour, deux jours, ... jusqu'à une semaine type. Tous ces tests ont été effectués à l'aide de l'optimiseur CPLEX 9.0.3.

Afin d'évaluer les économies, nous comparons les résultats obtenus de la résolution du problème FAP et ceux de la résolution de notre problème noté F-FAP.

Finalement, les résultats numériques obtenus ont démontré qu'un gain intéressant peut être obtenu en introduisant le facteur de robustesse pour les horaires des avions. Aussi, les résultats indiquent qu'on peut, avec succès, affecter les segments de vols avec un grand revenu provenant des passagers dans le coeur de la fleur sans ajouter d'avions ou changer l'horaire de vols, et distinguer la qualité du service aux passagers dans différentes parties prioritaires. Cependant, nous constatons lors de la résolution du problème F-FAP que les temps de résolution sont plus élevés que les temps de résolution du problème FAP, ce qui s'explique par la taille du problème F-FAP qui a considérablement augmenté. Ces temps restent toutefois raisonnables.

ABSTRACT

This Master's thesis covers the weekly fleet assignment problem in a strategic planning context. For a given fleet of different aircrafts types and a set of flights to be carried out, we consider the weekly fleet assignment problem in a way to maximize the benefit which is the difference between the revenues coming from the passengers and the aircraft costs. A feasible solution should allow to build feasible aircraft itineraries by treating all the flights without exceeding the number of available planes of each type and to ensure more robust aircraft schedules under disruptions caused by bad weather environmental conditions. These disruptions could generate delays and/or cancellations of flights, which can, thereafter disrupt the network.

In this case, a methodology is presented to create a robust aircraft schedule which is less affected by disruptions caused by bad weather. This methodology consists of partitioning the set of flights in several aircraft sub-schedules according to the number of hubs affected by the bad weather. Therefore, these sub-schedules are distributed in a new structure called: *a flower* in which each part of the flower contains flights that are ranged by priorities according to passenger's revenue.

A *petal* of the flower contains local flights around an airport. When the airport reduced capacities are low, some of these itineraries can be cancelled without propagating the disruptions in the remainder overhead network. This will reduce the lost revenue caused by the disruptions.

In this context, we propose an integer linear model based on the mathematical formulation of a time-space multicommodity network. This formulation is adapted from the basic fleet assignment model (FAP) suggested by Subramanian et al. (1994), Hane et al. (1995) and Bélanger (2004) without including the homogeneity constraints.

Numerical tests were performed on a data set that was provided by Air Canada which corresponds to the summer season 2002 period, on a one-day horizon, two-day horizons ..., until a one-week standard horizon. All tests were carried out using the CPLEX 9.0.3 optimizer.

In order to evaluate economies, the results of the basic problem FAP were compared with those of the solution of our model denoted F-FAP.

Finally, the numerical results obtained in this study showed that an interesting profit can be obtained by introducing the robustness factor of the aircraft schedules. Furthermore, results indicate that it is possible to assign the flight legs with a high passenger's revenue in the heart of the flower without adding aircrafts or changing the flights schedules and differentiate the passenger's service quality in different priority parts. However the F-FAP solution times are very high compared to solution times obtained with the resolution of the basic problem FAP. This is due to the size of the model F-FAP which increases considerably. These times remain however reasonable.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 : Processus de planification en transport aérien	2
1.1.1 : Élaboration de l'horaire de vols	2
1.1.2 : Affectation des types d'avions aux vols	4
1.1.3 : Construction des itinéraires d'avion	4

1.1.4 : Construction des rotations d'équipage	4
1.1.5 : Confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage	5
1.2 : Problèmes météorologiques de l'Amérique du nord	5
1.3 : Problèmes de perturbations du réseau aérien durant l'opération . .	8
1.4 : Définition du problème	12
1.4.1 : Vocabulaire	13
1.4.2 : Problème d'affectation des types d'avions aux vols en fleur .	14
1.5 : Structure du mémoire	16
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE	17
2.1 : Modélisation du problème de planification	17
2.2 : Quelques références sur les étapes de la planification en transport aérien	20
2.2.1 : Construction de l'horaire de vols	20
2.2.2 : Affectation des types d'avions aux vols	21
2.2.3 : Construction des itinéraires d'avion	22
2.2.4 : Construction des rotations d'équipage	23
2.2.5 : Confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage	24
2.3 : Affectation des types d'avions aux vols avec horaire fixe	26

2.4 : Critique de la littérature	32
CHAPITRE 3 : SOLUTION ROBUSTE POUR LE PROBLÈME HEB-	
DOMADAIRE D’AFFECTATION DES TYPES D’AVIONS	
AUX VOLS	34
3.1 : Affectation des types d’avions aux vols, en fleur	35
3.1.1 : Problème de base d’affectation des types d’avions aux vols .	36
3.1.2 : Problème d’affectation des types d’avions aux vols avec robus-	
tesse	40
3.2 : Approche de résolution	48
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET COMPARAISONS	50
4.1 : Capacité réduite aux aéroports	52
4.2 : Résultats numériques et comparaison	53
CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Sujet des plaintes contre Air Canada enregistrés durant l'année 2003	10
Tableau 4.1 : Statistiques sur les données (saison été 2002).	51
Tableau 4.2 : Exemple de capacités réduites aux aéroports par tranche de temps d'une heure	53
Tableau 4.3 : Taille des problèmes FAP et F-FAP pour différentes périodes de planification	55
Tableau 4.4 : Résultats numériques sur la résolution du problème FAP. .	56
Tableau 4.5 : Résultats numériques sur la résolution du problème F-FAP-3.	60
Tableau 4.6 : Résultats numériques sur la résolution du problème F-FAP-7.	61
Tableau 4.7 : Taux de vols protégés dans le coeur de la fleur après la résolution de F-FAP-3	62
Tableau 4.8 : Taux de vols protégés dans le coeur de la fleur après la résolution de F-FAP-7	63
Tableau 4.9 : Gain (en \$) obtenu de F-FAP versus FAP.	64

TABLE DES FIGURES

Figure 1.1 : Processus de planification en transport aérien.	3
Figure 1.2 : Propagation des retards et des annulations des vols dans le réseau aérien	9
Figure 1.3 : Structure de fleur.	12
Figure 1.4 : Itinéraires de passagers avec structure de fleur.	15
Figure 3.1 : Exemple de réseau G^*	38
Figure 3.2 : Exemple des itinéraires de passagers dans un réseau aérien.	42
Figure 3.3 : Répartition de la capacité disponible à un aéroport. . . .	45
Figure 4.1 : Exemple de capacités maximales aux aéroports par tranche de temps d'une heure	52

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Les compagnies aériennes cherchent toujours à développer des processus de décision optimaux pour améliorer leurs marges de profit. Effectivement, ces processus ont un rôle crucial dans l'évolution de leurs marchés, puisque chaque 1% d'amélioration obtenu par l'optimisation de la planification permet d'économiser plusieurs dizaines de millions de dollars annuellement.

Dans la littérature, on appelle planification (ou planification stratégique) le travail à long terme consistant à déterminer pour une saison donnée le service à offrir (horaire de vols), la façon d'utiliser les avions et l'organisation du travail du personnel. Actuellement, la planification en transport aérien est un travail beaucoup trop complexe pour pouvoir être traité globalement. Ainsi, on partage ce travail en cinq étapes qui sont traitées séquentiellement : l'élaboration de l'horaire de vols, l'affectation des avions aux vols, la construction des itinéraires d'avion, la construction des rotations d'équipage et la confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage. On présente dans ce mémoire des travaux qui visent à optimiser l'étape de l'affectation des types d'avions aux vols avec horaire fixe du processus de la planification.

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons une courte description de chacune des étapes du processus de la planification en transport aérien. À la section 1.2, nous décrivons les problèmes dus aux perturbations durant un jour d'opération. De plus, nous parlons de l'impact des retards et des annulations des vols aux aéroports qui peut être très significatif en termes de revenu. Par la suite, nous présentons plus en détail la définition du problème d'affectation des types d'avions aux vols auquel on s'attaque particulièrement dans ce mémoire.

1.1 Processus de planification en transport aérien

Vue la complexité et la taille du problème de la planification en transport aérien, il est très difficile de le traiter globalement et d'un seul trait. Ce problème est généralement divisé en cinq sous-problèmes plus facile à traiter (voir la figure 1.1).

L'affectation des types d'avions aux vols qui fait l'objet de ce mémoire représente la deuxième étape dans le processus de la planification en transport aérien. La résolution de ce problème comprend aussi la résolution d'une partie du problème de construction des itinéraires d'avion. En effet, nous réalisons l'affectation des types d'avions aux vols en assurant qu'il existe des itinéraires réalisables pour chaque type d'avion, et également en assurant des horaires d'avions plus robustes basés sur les itinéraires de passagers les plus rentables en cas de mauvais temps. On présente brièvement ce processus et ses différentes étapes.

1.1.1 Élaboration de l'horaire de vols

Cette première étape de la planification est certainement la plus importante, l'horaire de vols étant le produit vendu par la compagnie. Un horaire de vols contient la liste des vols devant être effectués au cours d'un certain horizon (par exemple, un jour ou une semaine). Certains vols peuvent comporter une ou plusieurs escales ; on dit alors que ces vols sont constitués de plusieurs segments de vols. L'horaire est construit en tenant compte des ressources disponibles, des horaires offerts par les autres compagnies aériennes et en se basant sur une étude du marché qui permet d'estimer la demande en transport aérien.

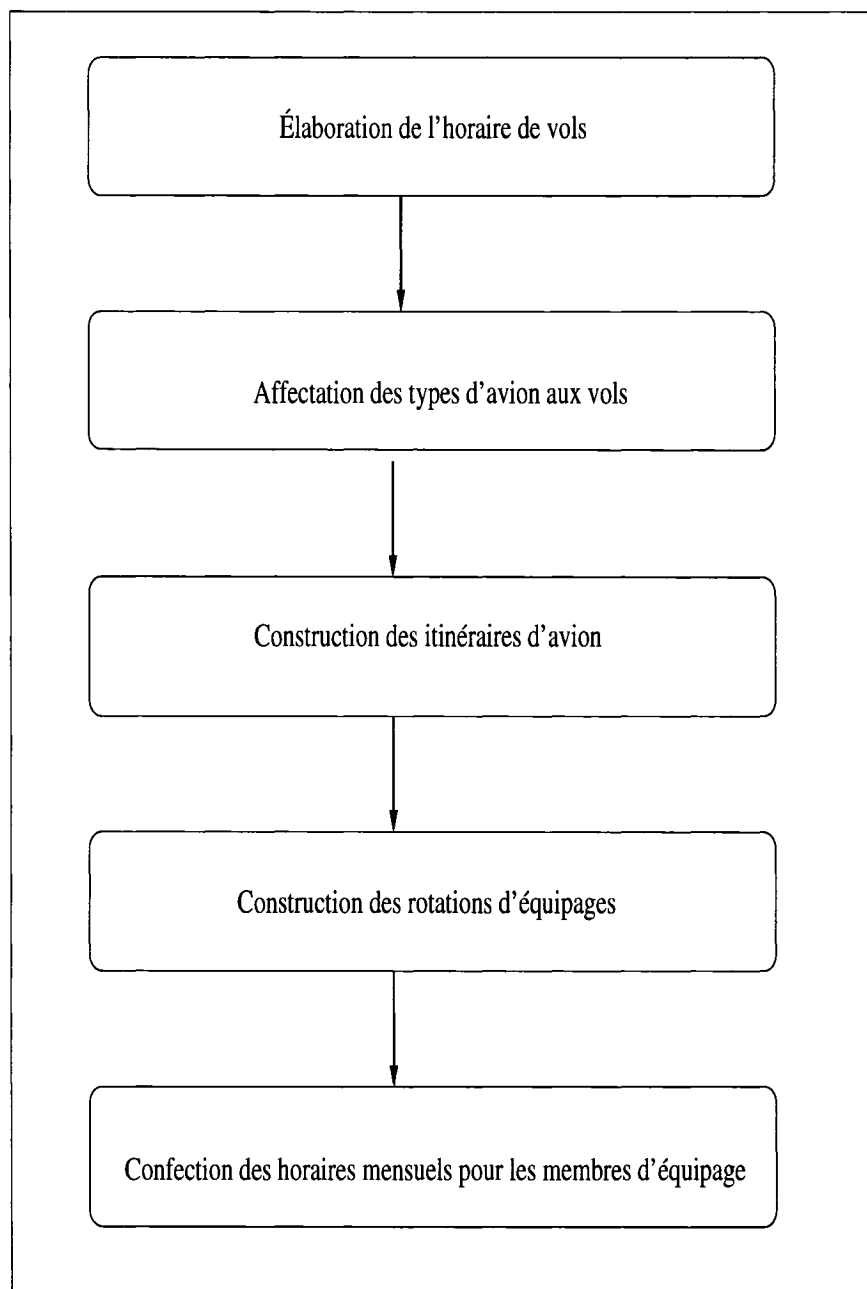


Figure 1.1 – Processus de planification en transport aérien.

1.1.2 Affectation des types d'avions aux vols

Le problème d'affectation des types d'avions aux vols consiste à déterminer par quel type d'avion sera effectué chacun des vols. Le profit associé à un vol étant déterminé par le type d'avion utilisé pour le couvrir, il importe de déterminer optimalement quel type d'avion est le plus approprié pour chacun des vols. Une contrainte importante de ce problème est que l'affectation choisie permette de construire des itinéraires pour les avions disponibles de la flotte de façon à ce que tous les vols soient couverts.

1.1.3 Construction des itinéraires d'avion

Il s'agit de construire un itinéraire pour chaque avion spécifique en prenant en considération l'affectation faite à l'étape précédente ainsi qu'un certain nombre de contraintes relatives à l'entretien périodique des avions. La valeur d'un itinéraire dépend, entre autres, de la pertinence des connexions directes qu'il offre, c'est-à-dire des occasions offertes aux passagers de voyager sans devoir changer d'avion entre les segments de vols.

1.1.4 Construction des rotations d'équipage

Une fois que l'on connaît le type d'avion effectuant chaque vol et les itinéraires des avions, il faut construire les rotations d'équipage de façon à s'assurer qu'un équipage soit disponible pour chacun des vols. Une rotation est une suite d'activités (couverture de segments de vols, déplacement, repos, etc.) accomplies par un équipage qui débute et se termine à une même station. On détermine donc les rotations d'équipage afin d'assurer la disponibilité d'un équipage pour chaque vol, ceci en respectant certaines règles provenant des conventions collectives et d'organismes gouvernementaux.

1.1.5 Confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage

Il s'agit de planifier, généralement sur un horizon d'un mois, les activités de chacun des membres du personnel de bord (pilotes, co-pilotes, chefs de cabine, agents de bord). Outre la couverture des rotations d'équipage, ces activités comprennent des stages et des périodes d'entraînement, des vacances et des examens médicaux. Ces horaires doivent être élaborés de façon à minimiser les coûts pour la compagnie tout en maximisant la satisfaction du personnel face à leurs conditions de travail. Évidemment, lors de la confection de ces horaires, on doit encore tenir compte d'une multitude de règles provenant des lois et des conventions collectives.

1.2 Problèmes météorologiques de l'Amérique du nord

En Amérique du nord, les problèmes de mauvaises conditions météorologiques sont très fréquents. Selon *environnement Canada*, les principaux événements météorologiques marquants sont le brouillard, les orages, le verglas, les chutes de neige, les ouragans, les pluies records et les vents débridés.

Certains événements peu fréquents provoquent la fermeture d'aéroports, comme : les grosses tempêtes de neige, les ouragans, verglas intense. D'autres beaucoup plus fréquents causent des réductions de capacité d'aéroports tels que : les orages, le brouillard, tempêtes de neige et verglas de faible intensité.

Par exemple, l'année 2002 a marqué plusieurs événements atmosphériques qui ont impliqué des pertes de revenus très significatives par les compagnies aériennes.

Le 31 janvier, une tempête mortelle a touché le sud-ouest de l'Ontario avec un mélange de neige, de grésil, de pluie verglaçante et de pluie. Des vents forts avec des rafales atteignant 110 km/h et un refroidissement rapide ont transformé la région en patinoire. La Police provinciale de l'Ontario a fermé l'Autoroute 401 en direction est près de London après qu'un camion chargé de plus de 35 tonnes de pommes se soit renversé. Les vents violents ont abattu des lignes électriques et des arbres. Dans la région de Sudbury, la chute de neige a atteint 20 cm et la température a plongé à -20°. De nombreux vols vers les régions du Nord ont été cloués au sol ou retardés. Cinq décès dans la province ont été attribués directement à cette tempête.

Le 9 mars, une forte tempête a sévi pendant la fin de semaine avec des rafales à 138 km/h qui ont frappé le sud de l'Ontario. Le vent a arraché des pancartes de signalisation, cassé des branches d'arbre et provoqué des pannes de courant et des accidents. La température a chuté de 21° à -7° C en quelques heures. Des rafales de neige ont aggravé la situation, créant des voiles blancs. À Toronto, les débris jonchant certaines rues de la ville ont rendu la circulation difficile. En dehors de la ville, 100 000 maisons ont été privées de courant après que huit pylônes de ligne électrique se soient brisés. Les employés des services publics de Kingston ont déclaré qu'il s'agissait de la pire tempête de vent en une douzaine d'années. Dans la région de Waterloo, des voiles blancs aveuglants et des torrents de pluie ont provoqué des pannes de courant, déraciné plusieurs arbres, abîmé des maisons et déclenché de fausses alarmes.

Au seuil du printemps, Montréal a enregistré sa plus forte chute de neige de l'année, avec 15 cm. La neige balayée par le vent a provoqué plusieurs accidents mineurs en ville, mais il n'y a pas eu de conséquences dramatiques. Plusieurs vols ont été retardés à l'aéroport de Dorval et, dans les Laurentides, la neige a provoqué deux accidents mortels avec des collisions frontales entre une ambulance et une mini-fourgonnette.

Quelques jours avant l'Halloween, de fortes pluies verglaçantes pendant une période

prolongée ont recouvert les routes et les trottoirs de Winnipeg d'une traître couche de glace. Les personnes âgées ont été invitées à rester à l'intérieur. Les hôpitaux ont fait état d'un grand nombre de cas d'entorses, de foulures et de fractures. La période de givrage, qui dure habituellement de 15 à 20 minutes, a été beaucoup plus longue cette fois-ci puisqu'elle a duré entre trois et quatre heures. Si la ville de Winnipeg a reçu 5 cm de verglas, la partie nord de la ville en a eu jusqu'entre 12 et 15 cm.

À Halifax, Les tempêtes se sont succédées à la fin de l'automne, faisant du mois de novembre le plus humide jamais enregistré. Des précipitations de près de 280 mm ont touché l'aéroport international, alors que le niveau normal est de 154 mm. En novembre, les dépressions ont été fréquentes, se sont déplacées lentement et ont été plus accentuées que d'habitude. Au milieu du mois, une grosse tempête a traversé les Maritimes et est restée immobile au sud de Halifax, donnant des chutes de pluie record dans la région. L'aéroport a enregistré 120,3 mm de pluie. La tempête a inondé les rues et les sous-sols dans toute la province. Le 18 novembre, 70 mm de pluie additionnelle sont tombés sur Halifax, et par endroit sous forme de neige et de pluie verglaçante.

À part de ces événements violents, l'Amérique du nord enregistre chaque été plusieurs cas de problèmes météorologiques fréquents, comme les orages de l'après midi. Cet événement peut apparaître une fois chaque deux à trois jours dans certaines villes. De plus, le Canada constate le problème du brouillard du matin au printemps, en automne et même en hiver. Ce qui engendre des retards de vols quotidiennement. Le modèle proposé dans ce mémoire a pour objectif de produire des horaires d'avions plus robustes face à ces problèmes fréquents qui réduisent la capacité des aéroports.

1.3 Problèmes de perturbations du réseau aérien durant l'opération

Les horaires d'avions même bien planifiés, peuvent donner lieu à une opération peu productive à cause des perturbations dues aux mauvaises conditions météorologiques. Ces perturbations provoquent des retards et des annulations de vols qui causent des pertes significatives de revenu.

Lorsque des segments de vols sont retardés, les compagnies aériennes subissent le coût du carburant supplémentaire qui est brûlé durant les retards des vols ou lorsqu'un avion est en attente au sol avec moteur en marche. Elles doivent payer les équipages pour le temps supplémentaire passé en attente dans l'avion, au sol ou dans les airs.

L'impact des retards et des annulations des vols aux aéroports peut être très significatif car les coûts du carburant et la main-d'oeuvre sont deux des coûts majeurs. Les perturbations peuvent aussi avoir un impact négatif sur les passagers. De la perspective des passagers, la considération la plus critique est la différence entre l'horaire de vol et l'heure d'arrivée à sa destination finale. Un retard de l'heure d'arrivée finale se produit quand le dernier segment de vol est retardé ou annulé, ou bien une connexion entre deux segments de vols est impossible due au retard ou à l'annulation d'un ou plusieurs segments de vols antérieurs.

Dans l'illustration de la figure 1.2, on voit bien l'idée de la propagation des retards et des annulations de vols dans tout le réseau : si un tel vol est retardé et qu'on doit affecter au vol suivant, soit le Vol 1, l'avion alors ce dernier sera lui aussi retardé ou annulé. De même si on veut affecter les pilotes, les agents de bord, ou les passagers provenant du vol retardé aux vols suivants, soient les Vol 2, Vol 3, Vol 4 ou Vol 5 respectivement, ces derniers seront aussi retardés ou annulés. Les perturbations de ces vols peuvent à leur tour se propager à plusieurs autres vols et perturber une grande partie du réseau.

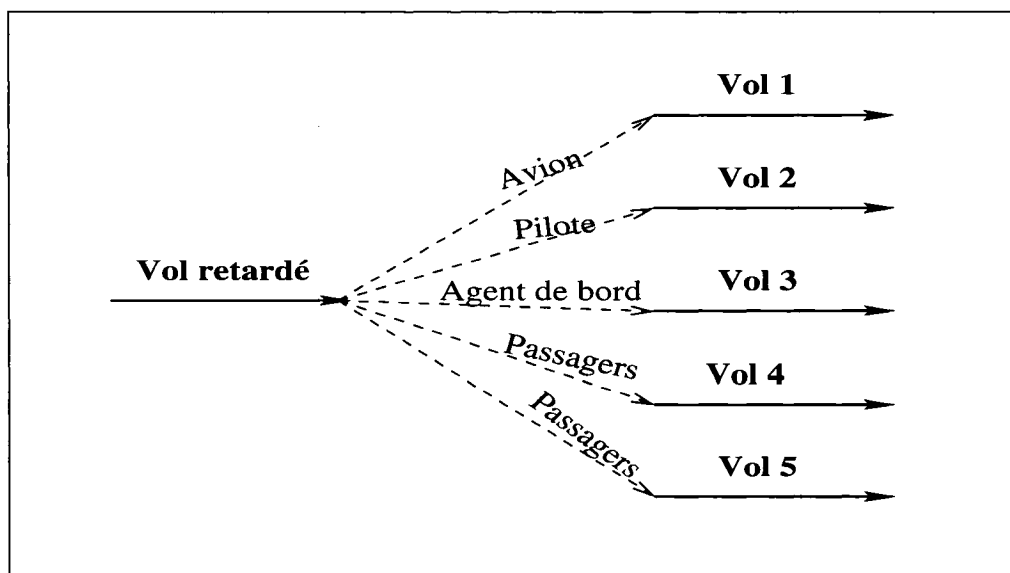


Figure 1.2 – Propagation des retards et des annulations des vols dans le réseau aérien.

Très peu de grands voyageurs peuvent se vanter d'être toujours arrivés à destination à temps, malgré le mauvais temps qui sévit ponctuellement. Fût-ce avec réticence, chacun admet que le transport aérien fait inévitablement l'objet d'annulations et de retards attribuables aux intempéries. Dans une certaine mesure, cela est tout aussi vrai pour les changements d'horaires de vol découlant de problèmes mécaniques ou techniques. Au Canada, les retards représentent la majeure partie des problèmes concernant les horaires de vol. Selon un rapport du commissaire de *Office des Transports du Canada* (OTC), enregistré pour l'année 2003, on constate que les changements liés à l'horaire des vols faisaient l'objet de 23.71% des plaintes soulevées déposées au bureau du commissaire (voir Tableau 1.1).

Si les horaires de vol ne sont pas respectés, un client risque de rater sa correspondance, de voir ses plans de vacance bouleversés ou de perdre l'occasion de conclure une affaire importante. Dans le monde d'aujourd'hui où il s'agit toujours d'arriver en

Tableau 1.1 – Sujet des plaintes contre Air Canada enregistrés durant l'année 2003.

Type des plaintes	Nombre de plaintes	Pourcentage
Vols perturbés	156	23.71%
Bagages	131	19.91%
Billetterie	142	21.58%
Programme pour grands voyageurs	59	8.97%
Réservations	55	8.36%
Refus de transport	39	5.93%
Refus d'embarquement	33	5.01%
Autres	43	6.53%
Total	658	100%

temps opportun, les voyageurs ne veulent pas avoir à se soucier du transport.

Par exemple, lors de l'été 2001, pour un couple de Toronto accompagné de ses deux enfants, le vol de retour depuis Lisbonne, au Portugal, à bord d'un vol nolisé de Canada 3000, une liaison, qui s'effectue habituellement sans histoire, s'est révélée être le vol le plus interminable, fatigant et frustrant que cette famille ait jamais connu. Prévu pour la matinée du 21 août, le vol a été reporté ou annulé à quatre reprises, y compris à 2 h 40 du matin, contraignant la famille à passer la nuit dans un hôtel. Le jour suivant, la famille a dû patienter plus de cinq heures dans une salle d'attente bondée, le vol ayant encore été retardé. C'est avec 24 heures de retard que l'avion a enfin quitté la piste. Une fois l'avion finalement posé à Toronto, les passagers ont été obligés d'attendre dans l'appareil pendant encore une heure, sans air climatisé. Les enfants pleuraient et des adultes ont commencé à paniquer et à souffrir de claustrophobie. Une personne qui se trouvait à l'arrière de l'avion s'est même évanouie. En raison de cette affaire, les membres de ce couple ont perdu chacun deux jours de travail.

Les passagers désirent voyager en fonction de l'origine-destination et du moment de

départ et/ou d'arrivée, et non en fonction des segments de vols offerts. Ainsi, il arrive souvent que leurs déplacements soient composés de deux segments de vols ou plus. Il est en général apprécié par les passagers que ces segments de vols soient connectés de façon directe pour former un vol avec escale, ce qui simplifie et accélère beaucoup leur connexion, car ils n'ont alors pas à changer d'avion. Les compagnies aériennes peuvent donc, pour des raisons commerciales, tenir à préserver certaines connexions directes entre certains segments de vols associés à des marchés spécifiques, ce qui implique évidemment que ces segments de vols soient couverts par le même avion. Cependant, les voyageurs désirent arriver à leurs destinations à temps, ce qui n'est pas toujours possible.

Notre objectif est de proposer un modèle permettant de résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols en considérant globalement la semaine entière, tout en cherchant à rendre la solution aussi robuste que possible en cas de mauvaises conditions météorologiques dans l'ordre de réduire les annulations et les retards des vols de la région perturbée sans propager ces perturbations dans le reste du réseau. Pour cela, on définit une nouvelle structure pour notre réseau aérien *la structure de fleur* comprenant un *coeur* et des *pétales* (voir figure 1.3). Un *pétale* est associé à un aéroport suffisamment occupé pour que certains vols doivent être annulés quand la capacité est réduite à cause de mauvais temps. Le choix du nombre de pétales sera discuté à la section 3.1.2. Précisons les termes :

Le coeur : contient les vols protégés ; les vols assurent les itinéraires des passagers les plus rentables. Cet ensemble de vols prioritaires sera opéré même si la capacité d'un aéroport est réduite par les perturbations qui peuvent se présenter durant les opérations aériennes quotidiennes.

Un pétale : contient des vols appartenant aux cycles d'un certains nombre d'avions passant par l'aéroport associé. Certains de ces vols pouvant être annulés quand

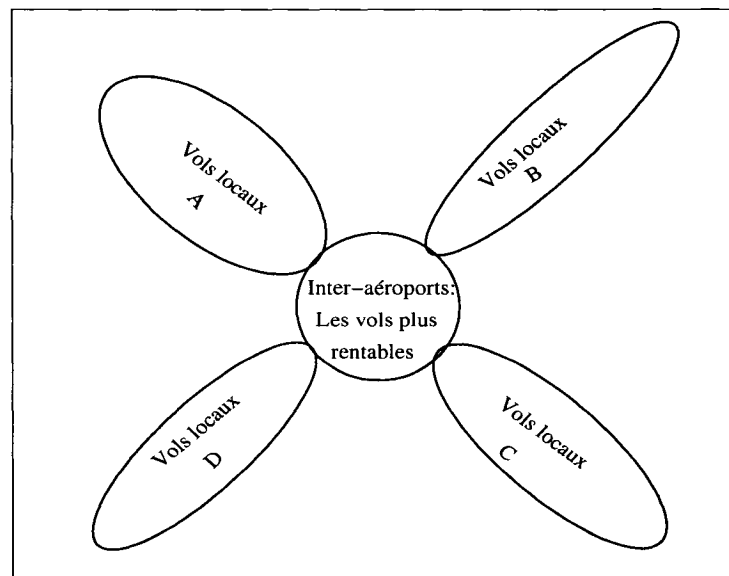


Figure 1.3 – Structure de fleur.

la capacité de l'aéroport est réduite. Ces vols ne doivent pas représenter trop de revenu et ne pas transporter beaucoup de passagers en correspondance avec des vols très payants.

En cas de capacité réduite à un aéroport, on annule seulement des vols du pétale associé. Il faut donc que le trafic à cet aéroport provenant du coeur et des autres pétales n'excède pas la capacité réduite. La répartition des vols entre le coeur et les pétales de la fleur n'est pas un input du modèle mais du résultat de l'optimisation.

1.4 Définition du problème

Dans cette section, on définit le problème d'affectation des types d'avions aux vols en structure de *fleur* avec horaire fixe, afin d'augmenter la robustesse des horaires

d'avions.

Avant d'énoncer le problème, déterminons tout d'abord le vocabulaire utilisé dans le domaine.

1.4.1 Vocabulaire

- **Type d'avions** : Un avion est caractérisé par sa capacité en passagers, sa vitesse, son autonomie de vol, la qualification requise de l'équipage pour le piloter et ses coût d'achat, d'entretien et d'opération. Deux avions qui diffèrent par au moins une de ces caractéristiques sont dits de différent type.
- **Flotte** : Un ensemble d'avions de différents types.
- **Station** : Endroit où les avions peuvent décoller ou atterrir, où les passagers peuvent monter à bord ou descendre, et où la marchandise peut être chargée et déchargée. En autres termes, une station correspond à un aéroport.
- **Segment de vol** : Déplacement sans escale d'un avion entre deux stations, commençant à une heure donnée.
- **Vol** : Suite d'un ou plusieurs segments de vols joints par des escales et identifiés par un même numéro. Tous ces segments de vols doivent nécessairement être effectués successivement par un même avion. On utilise souvent le terme connexion directe pour parler d'une connexion entre deux segments de vols joints par une escale.
- **Vol protégé** : Un vol non perturbé, qui s'effectue en respectant l'horaire déjà planifié et qui ne peut être ni retardé ni annulé.
- **Horaire d'avions robuste** : Un horaire d'avions sera robuste s'il fournit assez de flexibilité pour pouvoir continuer à être opéré en grande partie en cas d'irrégularités.

- **Bénéfice d'un segment de vol** : Différence entre les revenus et les coûts d'opérations d'un segment de vol lorsqu'on utilise un type d'avion donné. Les revenus proviennent du transport des passagers et du cargo, et les coûts incluent entre autre l'essence, les coûts fixes de chaque type d'avion utilisé et le salaire du personnel de bord. Dans notre cas, le calcul du bénéfice d'un segment de vol ne dépend que du type qui lui est affecté.
- **Durée d'un segment de vol** : Période de temps s'écoulant entre le décollage de l'avion et son atterrissage. La durée d'un segment de vol dépend essentiellement des stations de départ et d'arrivée et du type d'avion utilisé.
- **Route d'avion** : Une suite de vols consécutifs effectués par un avion.
- **Itinéraire de passager** : Suite de segments de vols effectués par un passager. Les segments de vols n'appartiennent pas nécessairement tous au même vol. Notons qu'un itinéraire réalisable ne doit utiliser que des connexions réalisables entre les segments de vols.
- **Capacité maximale à l'aéroport** : Le nombre de vols entrant et sortant d'un aéroport durant une tranche de temps donnée.

1.4.2 Problème d'affectation des types d'avions aux vols en fleur

On peut poser notre problème d'affectation des types d'avions aux vols en structure de fleur comme suit :

Étant donnée une flotte de différents types d'avions et un ensemble de vols à effectuer, on s'intéresse au problème d'affecter un type d'avion à chacun des vols sur un horizon d'une semaine de façon à maximiser le bénéfice total. Une solution réalisable doit permettre de construire des itinéraires réalisables pour les avions de la flotte en

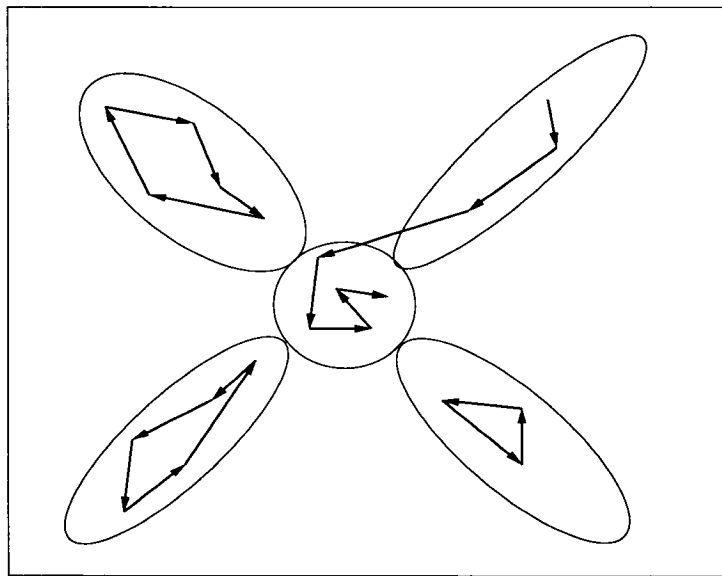


Figure 1.4 – Itinéraires de passagers avec structure de fleur.

couvrant tous les vols sans excéder le nombre d'avions disponibles de chaque type, et assurer des horaires d'avions robustes en cas de mauvais temps aux aéroports qui peut engendrer des retards et des annulations de vols. Ceci est obtenu à l'aide d'une structure de fleur dont un pétale contient des vols locaux autour d'un aéroport touché par le mauvais temps. Lorsque la capacité aux aéroports est réduite, les routes de certains avions passant par l'aéroport perturbé peuvent être annulées sans propager des perturbations dans le reste du réseau. Ces routes d'avions transportent peu de passagers ayant des correspondances avec les autres vols du réseau. Cela réduira le revenu perdu causé par les perturbations (voir figure 1.4).

1.5 Structure du mémoire

L'objet de ce mémoire est d'étudier le problème d'affectation des types d'avions aux vols dans un contexte de planification stratégique. Le premier chapitre de ce mémoire décrit de façon plus détaillée le problème d'affectation des types d'avions aux vols, ainsi que les différents problèmes météorologiques qui peuvent se présenter durant les opérations quotidiennes. Le chapitre 2 présente une revue de littérature, dans laquelle nous avons relevé quelques travaux relativement récents portant sur ce sujet. Toutefois, nous avons également soulevé certaines faiblesses des modèles existants, lesquelles peuvent grandement compromettre la faisabilité pratique des solutions obtenues, ou du moins en diminuer grandement la profitabilité. Le chapitre 3 propose une approche permettant de résoudre le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avions aux vols (F-FAP) avec horaire fixe en commençant par une journée, deux jours, ... jusqu'à couvrir toute la semaine, tout en cherchant à préserver l'aspect de robustesse pour les horaires d'avions en présence de problèmes météorologiques qui peuvent se présenter durant les opérations quotidiennes. Il s'agit d'une extension du problème de base d'affectation des types d'avions aux vols (FAP), auquel on ajoute des variables et des contraintes pour tenir compte des itinéraires de passagers. Ce modèle permet de démontrer la possibilité d'obtenir efficacement de bonnes solutions au problème d'affectation des types d'avions aux vols avec robustesse. Aussi, dans le même chapitre, on présente la description de la méthode de résolution du problème F-FAP. Au chapitre 4, on présente les résultats obtenus sur un jeu de données fourni par la compagnie Air Canada pour la saison d'été 2002. Ainsi, nous fournissons des tableaux détaillés des résultats numériques qui sont commentés dans ce chapitre. Finalement, nous terminons par une conclusion qui aborde des voies de recherche futures.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le processus séquentiel de la planification des opérations aériennes d'un transporteur aérien, le problème d'affectation des types d'avions aux vols survient entre le problème de déterminer un horaire de vols et le problème des routes d'avion pour couvrir tous les segments de vols. La planification de l'utilisation des avions avec la gestion des équipages est une question clé pour la rentabilité du transporteur aérien.

On trouve dans la littérature, beaucoup de travaux dans ce domaine d'optimisation en transport aérien qui remontent au début des années 1960. Des articles font la synthèse de ces travaux notamment ceux de Simpson (1968) et de Etschmaier et Mathaisel (1984, 1985). Pour la littérature plus récente nous rappelons les principaux résultats de recherche obtenus pour traiter chacune des étapes du processus de planification notamment l'étape de l'affectation des types d'avions aux vols, laquelle fait l'objet de cette thèse.

2.1 Modélisation du problème de planification

Trouver une solution au problème de planification revient à fixer un ensemble de variables de décision soumis à un ensemble de contraintes, la valeur d'une solution étant déterminée par une fonction objectif qui prend en considération un certain nombre de facteurs. Les variables de décisions à fixer correspondent à :

- le type d'avion affecté à chacun des vols ;
- l'itinéraire de chaque avion spécifique.

Parmi les principales contraintes à respecter, on trouve :

- les contraintes de couverture des vols ;
- la disponibilité de chaque type d'avion ;
- la capacité de l'avion ;
- les contraintes opérationnelles pour les avions ;
- la conservation de flot des avions ;
- les contraintes qui assurent que les itinéraires d'avion respectent la structure de fleur.

La fonction objectif déterminant la valeur d'une solution doit prendre en compte plusieurs facteurs économiques tels que :

- les coûts d'opération des différents types d'avions (essence, entretien, frais du service aux aéroports, etc.) ;
- les coûts fixes d'amortissement hebdomadaire des avions ;
- les revenus de la vente des billets aux passagers ;
- les revenus provenant du transport de marchandise ;
- les revenus provenant des passagers sur chaque itinéraire.

Dans la littérature, on trouve plusieurs articles de recherche où l'on tend à résoudre certains problèmes extraient du problème de la planification tels que le problème de l'horaire de vols, le problème de l'affectation des types d'avions aux vols, et le problème de construction des itinéraires d'avion.

Pour un sous-problème donné, l'ensemble des contraintes considérées et la définition de la fonction objectif peut varier d'un auteur à l'autre. Par exemple, le problème d'affectation des types d'avions aux vols a déjà été considéré en fixant à priori les connexions entre les vols, le problème consistant ainsi à affecter les types d'avions aux itinéraires plutôt qu'aux vols (Agard et al., 1973). Également, certains auteurs

forment ce problème en considérant des temps minimaux de connexion entre les segments de vols qui ne dépendent que du type d'avion et d'un seul des deux segments de vols connectés (Subramanian et al., 1994 et Hane et al., 1995), alors que d'autres considèrent des temps minimaux de connexion pouvant varier en fonction des deux segments de vols de connexion (Abara, 1989, Rushmeier et Kontogiorgis, 1997)

On remarque également dans la littérature, et ce particulièrement dans les articles les plus récents, que l'on tend à développer des modèles et des approches de résolution permettant d'augmenter le nombre de variables de décision considérées simultanément. Cette intégration totale ou partielle de plusieurs sous-problèmes permet normalement d'obtenir de meilleures solutions au problème global. Par exemple, on tentera de résoudre ensemble les problèmes d'affectation et de construction des itinéraires pour les avions (Barnhart et al., 1998A), ou encore de résoudre le problème de construction des itinéraires pour les avions en même temps que la construction des rotations d'équipage (Cordeau et al., 2001, et Mercier et al., 2004).

Également, dans plusieurs articles de la littérature, on décrit des expériences dans lesquelles on ajoute des contraintes à une étape donnée afin d'empêcher que les problèmes des étapes ultérieures deviennent non réalisables étant donné les décisions prises à cette étape antérieure. En effet, lorsqu'on traite les étapes de la planification de façon séquentielle, on prend le risque que des décisions prises à une certaine étape intermédiaire puissent compromettre la faisabilité du problème global. De plus, la qualité de la solution globale peut grandement être détériorée si on néglige trop fortement les interrelations entre les différentes étapes du processus de planification. C'est pourquoi on retrouve aussi des travaux dans lesquels on montre la pertinence d'enrichir la fonction objectif à une étape afin de mieux refléter l'impact sur les prochaines étapes des décisions qui y sont prises. Comme exemple d'ajout de contraintes, nous pouvons mentionner les problèmes d'affectation des types d'avions auxquels on intègre des contraintes concernant l'entretien périodique des avions. En effet, sans

ces contraintes, il pourrait être difficile à partir de l'affectation obtenue de construire des itinéraires permettant de respecter les contraintes d'entretien. Également, il peut être très profitable d'ajouter des éléments à la fonction objectif pour tenir compte de certains coûts d'équipage lors de l'affectation des types d'avions. En effet, certaines affectations de bonne qualité du point de vue des coûts d'opérations des avions peuvent être très médiocres lorsqu'on considère les inconvénients qu'elles posent du point de vue des équipages (nuits à l'hôtel supplémentaires, dépenses de temps supplémentaire, déplacements inutiles, etc.). On retrouve en particulier dans Clarke et al. (1996) un modèle pour le problème d'affectation des types d'avions aux vols comportant ce type de contraintes d'entretien et de fonction objectif enrichie pour tenir compte des coûts d'équipage.

2.2 Quelques références sur les étapes de la planification en transport aérien

2.2.1 Construction de l'horaire de vols

On trouve dans la littérature que les anciennes recherches ont été basées sur comment construire un modèle d'optimisation qui minimise les changements dans l'horaire de vols, et/ou minimise les coûts des vols retardés et annulés. On retrouve une revue de littérature importante sur le sujet d'horaire de vols dans Etschmaier et Mathaisel (1985). Par après, Phillips et Boyd (1989) ont proposé une approche heuristique intégrée permettant de déterminer l'horaire de vols, la composition de la flotte et l'utilisation des avions. Srihari et Muthukrishnan (1991) développent un système expert pour diriger le processus d'affectation des types d'avions aux vols. Nikulainen (1992) présente une méthode permettant de déterminer un bon horaire de vols à partir des courbes de la demande en passagers en fonction de l'heure de départ pour

chaque paire d'origine - destination. Yan et Tu (1997) utilisent un modèle de flot de multi-commodité qui modifie l'horaire des routes d'avion en minimisant les coûts des retards et des annulations de vols. Dobson et Lederer (1993) proposent une approche heuristique permettant de trouver un bon horaire de vols. Lettovsky et al. (2000) extrait un sous-problème d'horaire pour modifier l'horaire courant et construire un nouvel horaire d'équipage. Une autre approche est de créer des horaires de vols qui isolent l'impact des perturbations, c'est-à-dire, créer des horaires qui sont plus faciles à réparer suite aux perturbations d'horaire causées par le mauvais temps ou par le manque d'équipement. Ageeva (2000) introduit l'idée que la flexibilité et la robustesse d'un horaire de vols peuvent être améliorées en augmentant le nombre de rencontres au sol d'avion du même type de sorte que les avions puissent être facilement permutés lorsque les perturbations se produisent. Ceci permet de modifier les itinéraires d'avion et d'équipage pour concentrer l'équipement et le personnel qui restent disponibles sur les vols prioritaires. Thengvall et al. (2000, 2001) construisent un modèle de multi-commodité pour réparer l'horaire de vols suite à une fermeture d'aéroport. Ce modèle a permis de réduire non seulement les annulations et les retards apportés aux vols mais aussi les substitutions du transport de marchandise entre les avions. Klabjan et Chebalov (2001, 2002) suggèrent une approche semblable au problème de gestion d'équipage où la robustesse d'un horaire sera améliorée si les opportunités pour la permutation des équipages sont augmentées.

2.2.2 Affectation des types d'avions aux vols

Les problèmes d'affectation des types d'avions aux vols sont souvent déterminés pour une journée type et appliqués ensuite à tous les jours de la semaine. On fait alors l'hypothèse que la structure de la demande en passagers varie peu d'un jour à l'autre. Or, on observe en pratique que la demande varie de façon non négligeable entre les

différents jours de la semaine. Ceci est particulièrement vrai en ce qui concerne les demandes pendant les week-ends par rapport à celles pour les autres jours de la semaine. Barnhart et al. (1998B) décrivent une approche de génération de colonnes pour résoudre le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avions. Clarke et al. (1996) et Subramanian et al. (1994) fournirent des extensions au problème journalier d'affectation pour incorporer des contraintes opérationnelles additionnelles reliées à la maintenance et aux horaires d'équipage. Klinecicz et Rosenwein (1995) proposent une approche permettant de remanier l'affectation des types d'avions afin de mieux prendre en compte les particularités de chaque jour. De façon plus générale, afin de permettre d'apporter rapidement des changements de plusieurs natures à une solution initiale, Talluri (1996) propose une méthode heuristique d'échanges. Leur approche était convenable pour des problèmes de petites tailles tels que le problème d'horaires de vols internationaux. Alors que Jarrah et al. (2000) proposent pour le problème hebdomadaire un modèle de flot dans un réseau de type multicommodité accompagné de contraintes supplémentaires.

Nous verrons cette étape de planification qui fait l'objet de ce mémoire plus en détail à la section suivante.

2.2.3 Construction des itinéraires d'avion

Nous retrouvons dans Clarke et al. (1997) une procédure heuristique basée sur une approche de relaxation lagrangienne permettant la construction d'itinéraires respectant les contraintes d'entretien tout en optimisant le choix des connexions directes. Gopalan et Talluri (1998) et Talluri (1998) proposent quant à eux des procédures heuristiques pour la construction des itinéraires de façon à assurer un entretien périodique des appareils à tous les trois ou quatre jours, respectivement. On suppose ici que les avions passent la nuit au sol et que les activités d'entretien ne peuvent avoir lieu qu'à ce moment.

Jarrah et Strehler (2002) considèrent le problème d’optimiser le choix des connexions directes. Ils proposent une approche consistant à résoudre des problèmes de réseaux comportant certaines contraintes linéaires supplémentaires permettant, entre autres, de pénaliser le manque de balancement dans le choix des marchés desservis par des connexions directes. En effet, la compagnie peut désirer que des paires de marchés complémentaires (e.g. New York - Los Angeles et Los Angeles - New York) soient équitablement desservies par des vols en connexions directes. Certaines autres contraintes supplémentaires permettent de s’assurer que les suites de vols reliés par des connexions directes ne sont pas en compétition avec d’autres vols sans escale offerts par la compagnie. Bard et al. (2001) analysent le problème de flot à coût minimum pour trouver les routes d’avions qui minimisent les coûts des retards et des annulations de vols.

2.2.4 Construction des rotations d’équipage

Le problème de construction des rotations d’équipage est un problème difficile principalement à cause du très grand nombre de rotations possibles, de même qu’à la complexité des règles déterminant la validité des rotations. On a souvent recours à des approches consistant à décomposer le problème en un générateur de rotations et en un problème de partitionnement d’ensemble. Le premier génère des rotations valides prometteuses, alors que le second fait une sélection parmi ces rotations de façon à assurer que tous les segments de vols de l’horaire soient couverts par les rotations choisies et que soit minimisé le total des dépenses associées à ces rotations.

On peut également résoudre le problème de partitionnement en considérant implicitement toutes les rotations possibles à l’aide d’une approche de génération de colonnes, le tout étant imbriqué dans une procédure de séparation et d’évaluation progressive (branch-and-bound). En effet, les sous-problèmes de chacun des noeuds de branchement sont résolus en effectuant plusieurs itérations entre la génération des rotations

(colonnes) et la résolution de la relaxation linéaire du problème de partitionnement. Cette approche de génération de colonnes a été utilisée dans les travaux de Desautniers et al. (1997)

Lavoie et al. (1988) proposent l'approche de génération de colonnes pour résoudre la relaxation linéaire du problème de partitionnement. Barnhart et al. (1995) proposent une approche semblable pour résoudre le problème en permettant aux membres d'équipages de voyager à titre de passagers sur des segments de vols offerts par la compagnie ou même par d'autres transporteurs.

Certains autres articles de la littérature font état de résultats obtenus à l'aide de techniques heuristiques de décomposition de problème accompagnées de procédures d'amélioration locale (Ball et Roberts, 1985 et Anbil et al., 1991), ou encore à l'aide d'approches méta-heuristiques, comme la technique de recuit simulé (simulated annealing), tel que proposé par Emden-Weinert et Proksch (1999).

2.2.5 Confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage

Nous présentons brièvement trois approches pour arriver à construire ces horaires mensuels. Une première approche appelée *bidline*, en anglais, consiste à construire, indépendamment des employés, un ensemble d'horaires de travail permettant de couvrir toutes les rotations. Les employés doivent ensuite indiquer leurs préférences et les horaires leur sont ainsi attribués selon un système de priorités quelconque. Cette méthode a l'inconvénient de ne pas tenir compte des activités préassignées particulières à chacun des employés, telles les vacances et les entraînements, et on doit donc souvent remanier les horaires *a posteriori*. Certaines rotations peuvent même alors ne plus être couvertes. On retrouve des résultats de recherche sur cette approche dans Glanert (1984) et Jones (1989).

Une seconde approche, nommée *rostering*, permet de construire un horaire personnalisé pour chaque employé. On peut alors tenir compte des activités préassignées, évitant ainsi de devoir revoir les horaires après l'optimisation. Pour résoudre ce problème, Ryan (1992) génère a priori un ensemble d'horaires pour chaque employé à l'aide d'une méthode heuristique et résout ensuite un problème de partitionnement pour assurer la couverture des rotations. Des approches exactes sont par ailleurs formulées dans Gamache et Soumis (1998A) et Gamache et al. (1998B), où l'on fait appel à une procédure de génération de colonnes. Les horaires, plutôt que d'être générés heuristiquement et a priori, sont générés dynamiquement en résolvant des problèmes de plus court chemin avec ressources. Le problème maître, un problème de partitionnement, assure la couverture de toutes les rotations.

La troisième approche, nommée *preferential bidding*, offre la possibilité de prendre en compte les intérêts particuliers de chaque employé (destinations préférées, congés les week-ends ou d'autres jours de la semaine, heures de travail, etc.) lors de la confection des horaires. Souvent, les intérêts des employés avec le plus d'ancienneté sont mieux pris en compte, aux dépens des employés juniors. La résolution de ce problème est plus complexe que celle du problème de *rostering*. Moore et al. (1978) et Byrne (1988) ont proposé des algorithmes heuristiques gloutons, tandis que Gamache et al. (1999) proposent une approche quasi-optimale, encore une fois à l'aide d'une décomposition par génération de colonnes comportant la résolution de problèmes de plus court chemin avec ressources. Plus récemment, Achour et al. (2004) proposent une nouvelle méthode de résolution optimale du problème de *preferential bidding*. La non fixation des horaires des pilotes lors de la résolution des problèmes est un élément déterminant pour assurer l'optimalité de cette méthode. Ils ont proposé un nouveau schéma de branchement pour permettre le choix d'un horaire parmi plusieurs pointage équivalent pour un employé senior dans la mesure où cet horaire permet de trouver un meilleur horaire à l'employé possédant le moins d'ancienneté. Fahle et al. (2002) ont proposé une approche de génération de colonnes dans laquelle les sous-problèmes sont résolus à l'aide d'une technique de programmation par contraintes.

2.3 Affectation des types d'avions aux vols avec horaire fixe

Mentionnons tout d'abord que Gu et al. (1994) ont démontré que le problème consistant à trouver une affectation réalisable des types d'avions aux vols était NP-complet dès qu'il y avait plus de deux types d'avions différents à considérer. De plus, ils montrent que le saut d'intégrité (écart entre la valeur optimale de la relaxation linéaire et de la solution entière) peut théoriquement être très grand. Néanmoins, la littérature fait état de plusieurs modèles et approches de résolution qui ont permis en pratique de résoudre efficacement ce genre de problème. Nous passons ici en revue les principales approches que l'on y retrouve.

Plusieurs formulations assez semblables de modèles linéaires en nombres entiers sont proposées dans la littérature. La plupart de ceux-ci se situent à l'intérieur de l'une ou l'autre des deux classes suivantes, soient les modèles dans lesquels les connexions entre les segments de vols sont implicitement modélisées, et ceux où elles le sont explicitement.

Dans Subramanian et al. (1994) et Hane et al. (1995), on présente un modèle pour résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols permettant de considérer implicitement les connexions. Ce modèle utilise une technique d'arcs d'attente au sol permettant de déterminer à chaque instant, pour chacune des stations, le nombre d'avions de chaque type prêts à entreprendre un segment de vol. Ainsi, le nombre de contraintes et de variables du réseau varie linéairement en fonction du nombre de segments de vols, plutôt que quadratiquement comme pour les approches où toutes les connexions possibles sont explicitement représentées. Cependant, une telle modélisation ne permet plus d'associer directement un coût et un temps minimal de connexion particulier à chacune des connexions. Ainsi, le temps minimal de connexion ne peut

s'exprimer seulement qu'en fonction du type d'avion et de la station où a lieu la connexion, et non plus en fonction des deux segments de vols connectés.

Abara (1989) et Rushmeier et Kontogiorgis (1997) proposent des modèles où les connexions entre les segments de vols sont explicitement représentées. Le fait de représenter explicitement les connexions permet d'une part de pouvoir associer un coût au fait d'effectuer une connexion précise, et d'autre part de pouvoir considérer de façon exacte le temps minimal au sol nécessaire pour effectuer chacune des connexions.

Cependant, ce genre de modélisation possède l'inconvénient majeur de générer des problèmes de très grande taille qui ne peuvent être résolus en pratique. En effet, le nombre de contraintes et de variables de réseau varie alors quadratiquement en fonction du nombre de segments de vols. Pour arriver à utiliser ce genre de modèles, on doit en général limiter a priori l'ensemble des connexions possibles, ce qui rend alors heuristique l'approche de résolution. Dans Abara (1989), on émet simplement l'hypothèse que le nombre de connexions possibles suivant chaque segment de vol demeure relativement petit, alors que dans Rushmeier et Kontogiorgis (1997), on a recours à une procédure heuristique pour restreindre ce nombre de possibilités de connexion. En effet, pour chacune des stations, on partitionne l'ensemble des arrivées et des départs en des sous-ensembles équilibrés (c'est-à-dire comportant le même nombre d'arrivées et de départs). Ce type de partitionnement généralise le concept d'agrégation en îlots introduit par Hane et al. (1995). Un segment de vol dont l'arrivée appartient à un certain sous-ensemble ne peut être connecté qu'à un segment de vol dont le départ appartient à ce même sous-ensemble. Aussi, on s'assure autant que possible que la plupart des arrivées d'un sous-ensemble ont lieu avant la plupart des départs de ce même sous-ensemble.

Comme il a été mentionné précédemment, dans Clarke et al. (1996), on enrichit le modèle d'affectation des types d'avions aux vols proposé par Hane et al. (1995) en lui

ajoutant des coupes de faisabilité, à savoir des contraintes supplémentaires relatives aux activités d'entretien, de façon à accroître la probabilité que la solution produite pour ce problème permette d'obtenir une solution réalisable pour le problème des itinéraires d'avion. On ajoute également des coupes d'optimalité, c'est-à-dire qu'on enrichit la fonction de coût pour pénaliser certaines affectations qui engendrent des coûts élevés par rapport aux équipages. Cette particularité permet d'éviter d'obtenir de trop mauvaises solutions lors de la planification des équipages.

Dans Barnhart et al. (1998A), on présente une modélisation permettant de résoudre simultanément le problème d'affectation des types d'avions et de construction des itinéraires. Le processus de résolution utilisé suit le schéma proposé dans Barnhart et al. (1998B) pour la résolution en nombres entiers de problèmes de grande taille. On y fait appel à une technique de génération de colonnes pour construire des itinéraires valides devant entre autres satisfaire les contraintes d'entretien et permettre de recouvrir l'ensemble des segments de vols. Certaines stratégies heuristiques sont utilisées pour réduire la taille des problèmes à résoudre, dont la méthode d'agrégation en îlots de Hane et al. (1995). Les auteurs affirment avoir obtenu des solutions comportant un saut d'intégrité d'environ 1,5% en des temps de calcul d'environ cinq heures et demi, dont quatre heures et demi pour résoudre la relaxation linéaire.

Dans les modèles proposés ci-haut, on suppose que le revenu passager pour chacun des segments de vols est uniquement fonction du type d'avion affecté à ce segment de vol. Or, on sait qu'en réalité, les passagers ne voyagent pas seulement à l'aide de vols directs, mais peuvent voyager sur plus d'un segment de vol (appartenant à des vols différents) pour réaliser leur déplacement d'un point à un autre. Ainsi, il est en principe faux de prétendre que le flot de passagers voyageant sur un segment de vol est indépendant du choix de type d'avion (et donc de capacité) pour les autres segments de vols du réseau. Cependant, il est très complexe de résoudre exactement le problème en considérant cet aspect particulier de la fonction objectif. C'est pourquoi la plupart

des modèles font l'hypothèse d'indépendance du choix des types d'avions entre les différents segments de vols. Dans le but d'éviter d'avoir à poser une telle hypothèse que l'on sait inexacte, Barnhart et al. (2002) résolvent le problème d'affectation des types d'avions aux vols en intégrant explicitement une composante de répartition des passagers à leur modèle. Ils utilisent le modèle de Hane et al. (1995) comme modèle de base, et y ajoutent une très grande quantité de variables et de contraintes. Le modèle demeure un modèle linéaire en nombres entiers, mais le nombre élevé de variables et de contraintes conduit les auteurs à utiliser une stratégie permettant de générer dynamiquement certains types de variables et de contraintes pour résoudre ce problème. Une telle formulation du problème s'avère toutefois discutable, puisqu'alors on considère un modèle permettant à la compagnie de choisir de faire voyager les passagers dans son réseau de façon à minimiser ses dépenses, sans tenir compte de leurs préférences. Ainsi, on suppose implicitement que les passagers s'entendent pour utiliser les services de la compagnie de façon optimale du point de vue de la rentabilité de cette dernière. Ceci est évidemment sans fondement pratique, puisqu'on sait que chaque passager cherche à maximiser son propre bénéfice et ne choisira pas de diminuer sa satisfaction, même légèrement, pour permettre à la compagnie d'augmenter sa rentabilité. En somme, un tel genre de modèle risque fort de considérer une fonction objectif erronée, voire même plus erronée que celle obtenue en posant l'hypothèse d'indépendance utilisée dans les modèles présentés précédemment.

Auparavant, Soumis et al. (1980) avaient présenté un modèle intégrant à la fois l'aspect de construction de l'horaire de vols et de l'affectation des types d'avions aux vols. Pour permettre la construction des horaires, un ensemble de segments de vols était défini et l'optimiseur pouvait sélectionner un ensemble de ceux-ci.

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, la fonction objectif ne peut être exprimée de façon simple, et ceci est d'autant plus vrai que dans ce cas, la structure même du réseau n'est pas fixée à priori. Ainsi, la fonction objectif était définie comme

la différence entre les coûts et les revenus, ces derniers étant obtenus en résolvant un modèle de répartition du flot de passagers dans le réseau. Pour la résolution, les auteurs ont proposé un algorithme de descente inspiré de l'algorithme de Frank-Wolfe pour les problèmes continus non linéaires et convexes. En effet, puisque des solutions entières étaient requises, les pas de descente correspondaient à ajouter ou à retirer des segments de vols, ou encore à en changer le type d'avion affecté.

Dans un ordre d'idées semblables, Mashford et Marksjö (2001) proposent un système d'optimisation heuristique permettant d'intégrer le problème de construction de l'horaire de vols, l'affectation des types d'avions aux vols et la construction des itinéraires. L'approche de résolution est basée cette fois sur une stratégie de recherche de type recuit simulé. Encore une fois, la composante du revenu passager de la fonction objectif revêt un aspect complexe. Ainsi, pour s'assurer d'une fonction objectif de bonne qualité, une réévaluation en est faite périodiquement en appliquant un modèle de répartition des passagers à la solution courante. La méthode paraît intéressante, mais les auteurs rapportent seulement des résultats numériques concernant le traitement de problèmes de petite taille nécessitant des temps de calcul de plus de 24 heures. Les auteurs mentionnent cependant des stratégies d'accélération pouvant être développées pour améliorer la performance du système, spécialement au niveau du calcul périodique de la répartition des passagers.

On trouve dans Sumi Kang (2004) une nouvelle approche pour résoudre le problème d'affectation des types d'avions et le problème des routes d'avion. Elle a développé un horaire de vol robuste avec différents niveaux d'importance pour chaque vol dont les passagers peuvent connaître les priorités des vols avant d'acheter leurs billets. Elle a introduit la notion de dégradabilité à l'horaire de vols de sorte que chaque horaire est partitionné en différents sous-horaires indépendants, ou bien en couches, avec chaque couche à un niveau d'importance. Dans la première étape, elle a résolu le problème de partitionnement d'horaire dégradable. Après, elle a résolu le problème d'affectation

des types d'avions. A la fin, elle a utilisé les résultats de ces deux premiers problèmes comme des données pour un troisième problème : problème de routes de passagers.

Bélangier (2004A, 2004B) aborde le problème d'affectation des types d'avions aux vols sur un horizon d'une semaine en intégrant à l'objectif un facteur d'homogénéité dans le choix des types d'avions pour les vols d'un même numéro présent à plusieurs jours dans la semaine. L'homogénéité pour un numéro de vol donné, se calcule à partir de la distribution des types d'avions aux vols. Le type d'avion choisi le plus fréquent est dit *type dominant* pour ce numéro de vol. Il présente un modèle linéaire en nombres entiers basé sur une formulation de flot dans un réseau espace-temps de type multicommodité. Ce modèle comporte, en outre, des variables de décision concernant le type d'avion affecté pour chaque vol et un type d'avion dominant pour chaque numéro de vol. Une pénalité est associée au fait de ne pas affecter à un vol son type dominant. Il propose deux approches de résolution. La première approche consiste à résoudre directement le modèle linéaire en nombres entiers par une méthode de séparation et d'évaluation progressive. La seconde approche consiste à séparer la résolution du problème en deux phases. Lors de la première phase, il sélectionne un sous-ensemble de journées consécutives de la semaine, et il résout le problème avec homogénéité sur cet horaire restreint. À partir de cette solution, il détermine un type d'avion dominant pour chacun des numéros de vol présents dans cet horaire. Lors de la seconde phase, il résout le problème sur la semaine entière, mais en imposant à chacun des vols une priorité si le type d'avion diffère du type dominant qui y a été déterminé en première phase. Il a intégré différentes fonctionnalités au modèle de base afin de prendre en compte les contraintes opérationnelles et commerciales nécessaires à l'obtention de solutions utilisables en pratique. L'une des fonctionnalités ayant nécessité le plus grand effort de recherche et de développement a été les temps de connexion minimum variables, à savoir que le temps minimal qu'un avion doit passer au sol après avoir effectué un certain segment de vol ne dépend pas seulement du type d'avion et de la station où la connexion a lieu, mais des deux segments de vols connectés.

2.4 Critique de la littérature

Nous portons maintenant un regard critique sur les travaux visant à résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols que l'on retrouve dans la littérature. Nous relevons certaines faiblesses des modèles existants, lesquelles ont motivé les efforts de recherche qui ont permis d'obtenir les résultats présentés dans ce mémoire.

Tout d'abord, les modèles proposés dans la littérature ont généralement été conçus pour résoudre des problèmes sur une base quotidienne. Or, on sait que les horaires de vols des compagnies aériennes peuvent varier significativement d'un jour à l'autre, entre autres parce que la demande en passagers n'est pas répartie uniformément entre les jours de la semaine, ou encore parce que la demande pour certaines paires d'origine et de destination ne justifie pas une fréquence de vol quotidienne. Ainsi, il en découle que les planificateurs doivent souvent, pour chaque jour de la semaine, adapter manuellement une solution quotidienne obtenue à partir de l'optimisation d'une journée type de la semaine de façon à prendre en compte les particularités de l'horaire de chacune des journées. Ce travail, en plus d'être très fastidieux, peut entraîner des pertes importantes en terme de profitabilité par rapport à une solution qui serait obtenue à partir d'une optimisation menée directement sur un horizon hebdomadaire. De plus, comme nous le verrons plus loin, les modèles proposés pour le problème quotidien ne peuvent en général pas être utilisés directement pour résoudre le problème hebdomadaire. En effet, on doit considérer l'aspect de dégradation de l'horaire. Cette dégradation s'obtient implicitement lors du choix des types d'avions pour les vols. Nous proposons donc au chapitre 3 un modèle et des méthodes de résolution du problème hebdomadaire, tout en préservant la robustesse de l'horaire.

Dans un autre ordre d'idée, un problème majeur se pose lorsqu'on observe les modèles d'affectation des types d'avions : on ne tient pas compte de la robustesse sur les

itinéraires de passagers, ce qui rend les solutions loin de l'optimalité. Pour cette raison, on a modifié le modèle d'affectation des types d'avions en rajoutant l'aspect de robustesse des itinéraires de passagers. Ceci permet d'obtenir des solutions plus rentables car la fonction objectif est alors plus précise et permet, par le fait même, de réduire le nombre d'ajustements que les planificateurs doivent apporter à la solution produite par l'optimiseur.

CHAPITRE 3 : SOLUTION ROBUSTE POUR LE PROBLÈME HEBDOMADAIRE D'AFFECTATION DES TYPES D'AVIONS AUX VOLS

Ce chapitre aborde le problème d'affectation des types d'avions aux vols avec robustesse sur un horizon hebdomadaire. On présente une formulation mathématique pour ce problème et l'approche de résolution.

Comme présenté au chapitre 1, une façon d'obtenir des solutions robustes pour le problème d'affectation des types d'avions aux vols en cas de mauvaises conditions météorologiques est de résoudre en premier le problème de base d'affectation des types d'avions aux vols (FAP), puis d'utiliser la valeur optimale obtenue de ce dernier pour résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols en fleur (F-FAP) sur le même horizon de temps considéré pour résoudre FAP afin de pouvoir obtenir des solutions robustes en tenant compte des passagers.

L'objectif de notre projet de recherche est de proposer un modèle permettant de résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols en considérant globalement la semaine entière, tout en cherchant à préserver autant que possible la propriété de robustesse en cas d'une réduction de la capacité d'un aéroport due à un problème météorologique. On veut une affectation des avions aux vols qui limite la propagation d'un problème météorologique dans le reste du réseau. Nous présentons donc ici un modèle, permettant d'évaluer de façon plus fine et robuste la qualité des affectations. Ce modèle demeure un programme linéaire en nombres entiers.

3.1 Affectation des types d'avions aux vols, en fleur

Le problème d'affectation des types d'avions aux vols, en fleur (F-FAP) est résolu pour une période standard d'une durée prédéfinie de T minutes, dans notre cas $1440 \leq T \leq 10080$ minutes.

La différence avec FAP et le problème majeur de F-FAP est qu'on combine deux optimisations : minimisations des coûts d'affectation des types d'avions aux vols, et maximisation de la valeur attendue de l'horaire de vols en fleur. Bien que les deux optimisations se basent sur la mesure "*dollars*", elles ne peuvent pas être combinées car la valeur de l'affectation des types d'avions aux vols est un coût réel planifié tandis que la valeur de l'horaire de vols en fleur est une estimation probabiliste du bénéfice au moment de l'opération.

Quand il y a deux fonctions objectifs, $f_1(x)$ et $f_2(x)$, une méthode pour les traiter est de les combiner en une seule fonction objectif. Cette approche fonctionne seulement si $f_1(x)$ et $f_2(x)$ peuvent être exprimées sur une même échelle. La somme donnera $f_1(x) + \alpha f_2(x)$. Cependant, la question qui se pose est la façon de choisir la bonne valeur de α .

Une autre technique, qui est particulièrement utile, quand les deux fonctions sont difficiles à exprimer sur une même échelle, est de mettre l'une des deux fonctions comme contrainte additionnelle pour optimiser l'autre fonction. D'abord, on optimise $f_1(x)$ seulement sans tenir compte de $f_2(x)$; on note $f_1^*(x)$ la valeur optimale obtenue lors de l'optimisation de $f_1(x)$. Après, si par exemple $f_1^*(x) \leq 0$, on optimise $f_2(x)$ en ajoutant la contrainte additionnelle, $f_1(x) \leq (1 - \epsilon)f_1^*(x)$, avec $\epsilon > 0$.

Pour F-FAP, on utilise cette dernière approche. F-FAP est résolu en deux étapes. La première étape consiste à résoudre le problème de base d'affectation des types

d'avions aux vols FAP. La valeur optimale obtenue, notée Z^* , représente le coût minimum des affectations sans considérer le facteur de robustesse. Ensuite, dans la deuxième étape, on a une fonction objectif qui maximise le revenu des itinéraires de passagers en utilisant Z^* (le coût minimum de FAP) comme une borne supérieure sur le coût des affectations de F-FAP. Les détails de chacune de ces deux étapes seront décrits dans les prochaines sous-sections.

3.1.1 Problème de base d'affectation des types d'avions aux vols

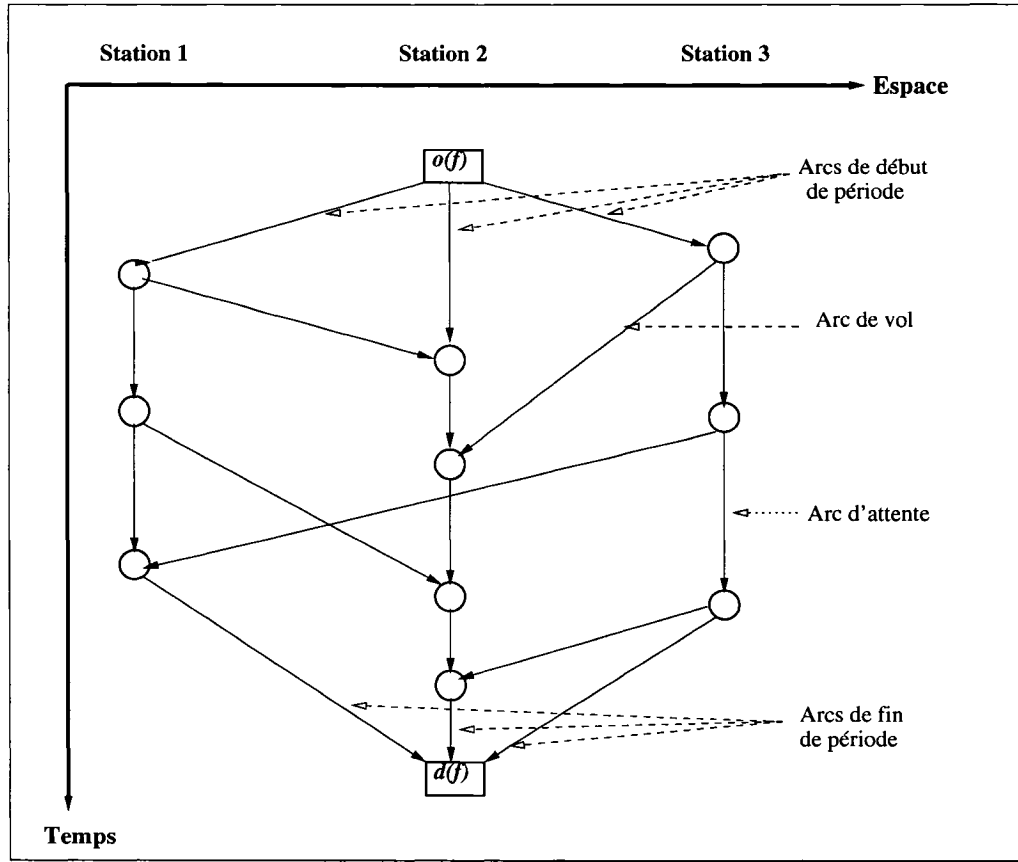
Le problème de base d'affectation des types d'avions aux vols FAP consiste à minimiser les coûts des affectations. Cette section présente une formulation mathématique du problème de base FAP. Cette formulation est une adaptation du modèle proposé par Subramanian et al. (1994), Hane et al. (1995) et Bélanger (2004) sans introduire les contraintes d'homogénéité pour résoudre le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avions aux vols.

Ce problème est formulé comme un problème de flot dans lequel les types d'avions sont les commodités. Soit F l'ensemble de différents types d'avions indexé par f . Ainsi, un réseau *espace-temps* $G^{*f} = (N_f, A_f)$ est construit pour chaque type $f \in F$, où N_f et A_f décrivent ses ensembles de noeuds et d'arcs respectivement. Les noeuds de temps du réseau sont les arrivées et les départs de l'avion dans chaque station (aéroport) à chaque moment donné, dénotés par (s, t) tel que s est la station et t est le moment de l'événement (soit début ou fin d'un vol). Un noeud source et un noeud puits existent dans chaque réseau G^{*f} construit pour chaque type d'avion f , dénotés respectivement $o(f)$ et $d(f)$. Une liaison directe de vol entre deux aéroports avec son temps de départ est un *segment de vol*. Les arcs du réseau sont les arcs du début de période reliant le noeud source $o(f)$ aux premiers noeuds dans l'ordre chronologique

à chaque station s , les arcs de vol, les arcs d'attente, et les arcs de fin de période reliant au puits $d(f)$ les derniers noeuds dans l'ordre chronologique à chaque station s . Ces arcs sont dénotés par (f, a) où a est le vol, l'attente, l'arc du début de période ou l'arc de fin de période effectué par le type d'avion f . On associe aux arcs du début de période o_s à la station s la variable x_{fo_s} , et aux arcs de fin de période d_s à la station s la variable x_{fd_s} . Ces derniers arcs servent à équilibrer le nombre d'avions à chaque station s et dans chaque réseau G^{*f} el que : $x_{fo_s} = x_{fd_s}$.

Étant donné un horaire de vols, il existe à chacune des stations s et pour chaque type d'avion f , une liste d'événements (début et fin de vols) qui peut être triée en ordre chronologique. Soit $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m)$ la liste des moments où les événements ont lieu de sorte que les temps d'arrivée soient placés avant les temps de départ en cas d'égalité. Soient $t_m^+ = t_1$ et $t_1^- = t_m$ s'il existe m événements à cette station, où on a noté t^+ le temps de l'événement suivant t (par exemple $t_1^+ = t_2$) et t^- est le temps de l'événement précédant t . Un arc d'attente est défini d'un noeud dans la liste à son successeur. Un arc d'attente supplémentaire est ajouté entre le dernier noeud et le premier noeud de la liste. Ces arcs créent un réseau cyclique et servent à équilibrer le nombre d'avions du type f à chaque station $s(f)$ au début et à la fin du réseau. Tout itinéraire réalisable pour un avion de type f correspond à un chemin dans le réseau G^{*f} entre les noeuds origine $o(f)$ et destination $d(f)$ (voir Figure 3.1).

Dans chaque station, le nombre d'avions de chaque type au début de la semaine est une variable à déterminer. Cependant, on impose que ces nombres d'avions soient identiques au début et à la fin de la semaine pour s'assurer que la solution peut être répétée semaine après semaine pendant toute la saison.

Figure 3.1 – Exemple de réseau G^* .

On définit les ensembles suivants :

N = ensemble des noeuds indexé par n , $N = \bigcup_{f \in F} N_f$;

L_f = ensemble des arcs de vols pour le type d'avion $f \in F$, indexé par a ;

L = ensemble des arcs de vols, indexé par a , $L = \bigcup_{f \in F} L_f$;

G_f = ensemble des arcs d'attentes pour le type d'avion $f \in F$, indexé par a ;

G = ensemble des arcs d'attentes, indexé par a , $G = \bigcup_{f \in F} G_f$;

O_f = ensemble des arcs de nuit (arcs de vol et arcs d'attente) pour le type d'avion $f \in F$, indexé par a ;

A_f = ensemble de tous les arcs pour le type d'avion $f \in F$, indexé par a , $A_f = L_f \cup G_f$;

A = ensemble de tous les arcs, indexé par a , $A = \bigcup_{f \in F} A_f$;

$\Gamma^+(n)$ = ensemble des arcs de A_f entrants au noeud n , $n \in N_f$;

$\Gamma^-(n)$ = ensemble des arcs de A_f sortants du noeud n , $n \in N_f$.

Les coefficients de la fonction objectif sont notés c_{fa} et représentent le coût d'affecter le type d'avion $f \in F$ au vol $a \in L$, et prennent la valeur 0 si $a \in G_f$. De plus, un autre type de paramètre doit être défini pour chaque type d'avion $f \in F$, soit W_f , qui indique le nombre d'avions disponibles.

La fonction objectif déterminant la valeur de la solution doit prendre en compte plusieurs facteurs économiques tels que :

- les coûts fixes d'amortissement ;
- les coûts d'opérations des différents types d'avions (essence, entretien, aéroport, ...);
- revenus de la vente des billets aux passagers ;
- revenus provenant du transport de marchandise ;
- les revenus provenant des passagers sur chaque itinéraire de passagers.

Notons que le coût des affectations des avions c_{fa} est le négatif du bénéfice, qui est la différence entre les coûts et les revenus mentionnés ci-haut.

La formulation mathématique exige un type de variable de décision. Des variables x_{fa} prennent la valeur 1 si le vol $a \in A$ utilise le type d'avion $f \in F$, ou la valeur 0 sinon. Les variables x_{fa} , $a \in G$ indiquent le nombre d'avions de type $f \in F$ sur les arcs d'attente.

En utilisant les notations ci-dessus, le problème de base d'affectation des types d'avions aux vols FAP s'écrit comme suit :

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{f \in F} \sum_{a \in L} c_{fa} x_{fa} \quad (3.1)$$

sujet à :

$$\sum_{f \in F} x_{fa} = 1, \quad \forall a \in L \quad (3.2)$$

$$\sum_{a \in \Gamma^+(n)} x_{fa} - \sum_{a \in \Gamma^-(n)} x_{fa} = 0, \quad \forall f \in F, \forall n \in N_f \quad (3.3)$$

$$\sum_{a \in O_f} x_{fa} \leq W_f, \quad \forall f \in F \quad (3.4)$$

$$x_{fa} \in \mathbf{Z}^+, \quad \forall a \in G_f, \forall f \in F \quad (3.5)$$

$$x_{fa} \in \{0, 1\}, \quad \forall a \in L_f, \forall f \in F. \quad (3.6)$$

L'objectif (3.1) consiste à minimiser le total des coûts incluant les coûts d'opérations. Les contraintes (3.2) sont les contraintes de couverture assurant que chaque segment de vol est couvert par un et un seul type d'avion. Les contraintes (3.3) sont les contraintes de conservation de flot assurant que le nombre d'avions entrant à chaque aéroport est le même nombre d'avions sortant de cet aéroport. Les contraintes (3.4) assurent que le nombre d'avions disponibles pour chaque type n'est pas excédé dans l'affectation. Enfin, les contraintes (3.5) et (3.6) assurent l'intégrité des variables de décision.

3.1.2 Problème d'affectation des types d'avions aux vols avec robustesse

Nous présentons ici un modèle plus général que celui de la section précédente, permettant d'évaluer de façon plus robuste les affectations des types d'avions aux vols.

Ce nouveau modèle demeure un programme linéaire en nombres entiers.

Soit I l'ensemble des itinéraires de passagers indexé par i . En réalité, toutes les lignes aériennes ont des itinéraires avec plus d'un segment de vol, c'est-à-dire, les passagers effectuent des correspondances à des aéroports intermédiaires. Ainsi, chaque segment de vol aura des passagers qui voyagent sur différents itinéraires. Dans notre modèle, les vols sont assignés aux pétales et au coeur de la fleur. Les routes d'avions d'un pétale k seront annulées si la capacité de l'aéroport de ce pétale est réduite λ^k de temps (λ^k est le pourcentage du temps perdu en cas de mauvais temps). Les itinéraires de passagers utilisant seulement les vols du coeur seront protégés en cas d'un problème météorologique qui réduit la capacité d'un aéroport. Les itinéraires de passagers utilisant un vol d'une certain pétale sont perturbés et les revenus sont perdus quand la capacité de l'aéroport associé est réduite et que les vols de ce pétale sont annulés. L'ensemble des vols dans le coeur ne peut pas excéder le nombre maximum de vols qui peuvent être opérés en cas de mauvais temps à chaque aéroport ayant une contrainte de capacité.

Pour ce problème F-FAP, le réseau approprié est une suite de réseaux $G^{*f} = (N_f, A_f)$ tels que décrits dans la section 3.1.1. De plus, nous considérons le réseau des passagers représenté par l'ensemble des itinéraires utilisés par les passagers. Ce réseau permettra d'évaluer le revenu perdu quand des vols sont annulés (voir figure 3.2).

Dans ce mémoire, on s'intéresse à résoudre le problème d'affectation des types d'avions aux vols en cas de présence de mauvaises conditions météorologiques aux aéroports. En effet, ce problème est résolu à l'aide de la structure de fleur implémentée pour un horaire de vols et des itinéraires de passagers donnés. Pour se faire, on choisi les aéroports qui peuvent être opérés si la capacité à ces aéroports est réduite en cas de mauvais temps.

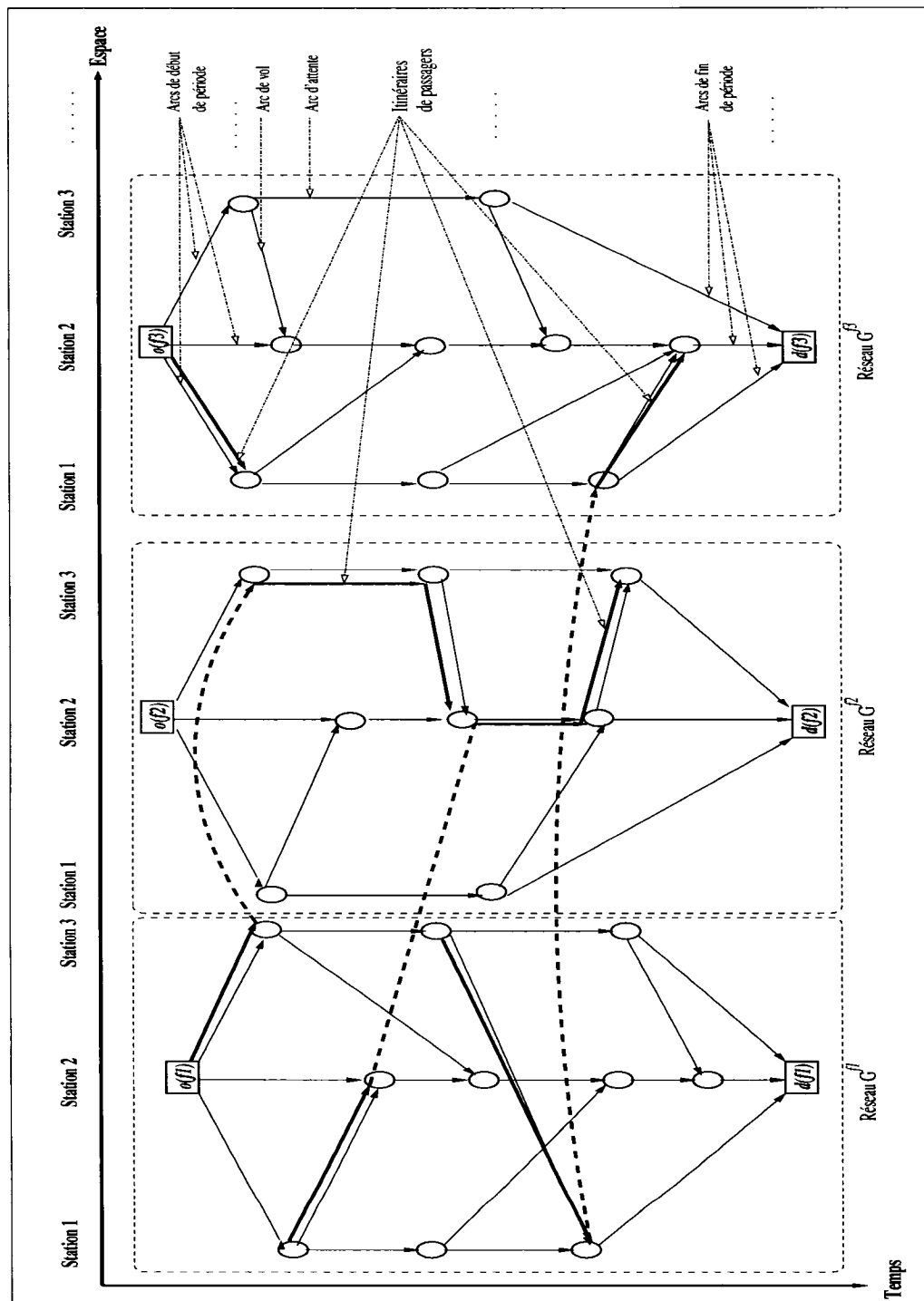


Figure 3.2 – Exemple des itinéraires de passagers dans un réseau aérien.

Paramètres

La formulation mathématique de F-FAP requiert peu de paramètres. D'abord, on a besoin de déterminer combien de pétales sont considérés dans la structure de fleur, la capacité réduite aux aéroports en cas de mauvais temps et le revenu perdu qui en découle. Enfin, après avoir déterminé les paramètres de la structure de fleur, le modèle d'optimisation détermine les vols dans chaque partie de la fleur pour protéger autant que possible les itinéraires de passagers et le revenu de la compagnie.

a. Nombre de pétales On considère un pétale pour chaque aéroport qui a un trafic suffisant pour devenir congestionné si la capacité est réduite en cas de mauvais temps. Dans ce mémoire, on suppose qu'un seul pétale est perturbé à la fois. Généralement, les problèmes du mauvais temps les plus courants, par exemple, le brouillard du matin et les orages, ne peuvent toucher plus d'un aéroport à la fois. En effet, deux aéroports ou plus perturbés à la fois est un cas possible mais pas fréquent. Par exemple, une tempête de neige qui touche tout le continent est un cas possible, mais peut être connue une fois chaque cinquante ans. Dans ce cas, si on a deux pétales touchés par ce problème météorologique à la fois, et que le pourcentage du temps perdu dans chaque pétale est estimé à 5% du temps, alors le pourcentage du temps perdu pour les deux pétales à la fois est de l'ordre de 0.25%. C'est une quantité petite qu'on néglige.

b. Capacité réduite aux aéroports On peut facilement déterminer la capacité maximale à n'importe quel aéroport en calculant le nombre d'opérations (vols entrants et sortants) extraites d'un horaire de vols donné. La question qui se pose est donc, comment déterminer la capacité réduite d'un aéroport suite à des perturbations atmosphériques. Dans ce mémoire, on suppose que la capacité maximale aux

aéroports est réduite par un taux de réduction θ , $0 < \theta < 1$ en cas de mauvaises conditions météorologiques. Puisque la capacité maximale à l'aéroport est allouée à la compagnie aérienne proportionnellement au nombre total d'opérations planifiées pour n'importe quel aéroport, on suppose que cette fraction de capacité maximale reste la même durant la présence de mauvaises et de bonnes conditions météorologiques. Plusieurs scénarios peuvent être considérés sur la valeur de la capacité réduite et sur le nombre de pétales.

c. Revenu des passagers Pour un itinéraire de passagers qui se trouve dans le coeur, il est facile de supposer que son revenu de passagers est bien protégé, puisque les segments de vols qui définissent cet itinéraire et qui se trouvent dans cette partie de la fleur sont toujours protégés de toutes les perturbations en cas de mauvais temps. Pour les itinéraires de passagers qui passent par une des pétales de la fleur, leurs revenus sont donc entre zéro et le plein revenu. Ce revenu dépend de la fréquence d'annulation de vols incidents à l'aéroport k en cas de mauvais temps. Nous considérons que le revenu complet du pétale est perdu une fraction λ^k du temps.

Les points **b.** et **c.** correspondent à l'approximation présentée dans la figure 3.3. Cette figure représente la répartition de la capacité disponible à un aéroport. Par exemple, la capacité est maximale jusqu'à 96% du temps. Aussi, on remarque un certain pourcentage de capacité réduite dû aux mauvaises conditions météorologiques pour une certaine période. Comme il peut y avoir une période transitoire en courbe descendante. Notre modèle estime le revenu perdu dans le pétale k par le rectangle de capacité $C_{max} - R_k$ avec une durée λ_k . Cette approximation cause peu d'erreurs en autant que les situations (**A**), où la capacité est faiblement réduite, et qui sont négligées par l'approximation, sont compensées par les situations (**B**) où l'on surestime la réduction de capacité.

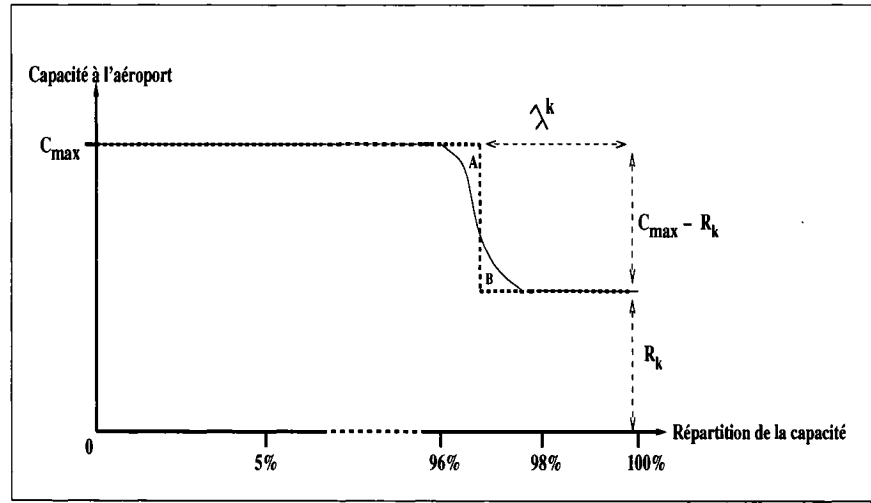


Figure 3.3 – Répartition de la capacité disponible à un aéroport.

Définition des ensembles

On définit les ensembles suivants :

T = ensemble des tranches de temps, indexé par t ;

H = ensemble des aéroports importants où la capacité peut être insuffisante en cas de mauvais temps, ($|H| = 3$ à 7), indexé par k ;

$H \cup \{0\}$ = ensemble de tous les aéroports, indexé par k , qui contiennent des groupes de vols dans les pétales ($k \in H$) et autrement dans le coeur ($k \in \{0\}$) ;

F = ensemble des flottes, indexé par f ;

L_f = ensemble des arcs de vols pour le type d'avion $f \in F$, indexé par a ;

L = ensemble des arcs de vols, indexé par a , $L = \bigcup_{f \in F} L_f$;

L_t^k = ensemble des arcs de vols partant ou arrivant à l'aéroport $k \in H$ dans l'intervalle de temps $t \in T$;

G_f = ensemble des arcs d'attente pour le type d'avion $f \in F$ indexé par a ;

A_f = ensemble des arcs pour le type d'avion $f \in F$ indexé par a , $A_f = L_f \cup G_f$;
 O_f = ensemble des arcs de nuit pour le type d'avion $f \in F$ indexé par a , $O_f \subset A_f$;
 N_f = ensemble des noeuds (aéroports) pour le type d'avion $f \in F$ indexé par n ;
 $\Gamma^+(n)$ = ensemble des arcs de A_f entrants au noeud n , $n \in N_f$;
 $\Gamma^-(n)$ = ensemble des arcs de A_f sortants du noeud n , $n \in N_f$;
 λ^k = pourcentage du temps pour lequel l'aéroport $k \in H$ fonctionne à capacité réduite. Si chaque aéroport $k \in H$ fonctionne à capacité réduite une à deux fois d'opération par semaine (soit 15% à 30%) pendant deux à trois heures sur les 18 heures de la journée (soit 2/18 à 3/18). Alors λ^k varie entre 2% et 5%.

Les variables x_{fa} sont remplacées par x_{fa}^k lesquelles prennent la valeur 1 si le vol $a \in L$ utilise le type d'avion $f \in F$ dans le groupe $k \in H \cup \{0\}$, ou la valeur 0 sinon. De plus, un autre type de variables de décision est ajouté au nouveau modèle. Les variables de décision z_i^k prennent la valeur 1 si quelques segments de vol de l'itinéraire i sont dans le pétale $k \in H$ de la fleur, ou la valeur 0 sinon.

Comme le coeur est la partie la plus importante dans le réseau, tous les itinéraires dans cette partie sont protégés car les vols de cette partie sont opérables même en présence de perturbations. Pour un horaire avec plusieurs pétales, le revenu d'un itinéraire est perdu si au moins l'un des segments de vols qui le constituent se trouve dans un pétale.

Également, deux autres types de coefficients sont ajoutés à la fonction objectif :

δ_a^i : coefficient binaire qui prend la valeur 1 si l'arc de vol $(f, a) \in A_f$ appartient à l'itinéraire $i \in I$, ou la valeur 0 sinon ;
 ν_i : revenu de l'itinéraire $i \in I$.

De plus, le nouveau modèle mathématique exige trois autres types de paramètres :

R_k : capacité réduite à l'aéroport $k \in H$,

$R_k = \theta \times \{\text{nombre de vols entrants et sortants de l'aéroport } k \in H\}$, tel que θ est le taux de réduction ($0 < \theta < 1$);

Z^* : Coût minimum de FAP obtenu lors de la résolution du problème de base d'affectation des types d'avions aux vols ($Z^* < 0$, c'est le négatif du bénéfice);

$\epsilon > 0$: paramètre sur la perte du bénéfice acceptable pour augmenter la robustesse.

On impose que ϵ est petit, positif et non nul car on permet une certaine flexibilité sur le revenu planifié pour pouvoir organiser les routes d'avions avec une structure de fleur qui réduira la perte de revenu en cas de mauvais temps.

En utilisant les notations ci-dessus, le problème d'affectation des types d'avions aux vols en fleur F-FAP s'écrit comme suit :

$$\text{Maximiser} \quad \sum_{i \in I} \nu_i (1 - \sum_{k \in H} \lambda^k z_i^k) \quad (3.7)$$

sujet à :

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in H \cup \{0\}} x_{fa}^k = 1, \quad \forall a \in L \quad (3.8)$$

$$\sum_{a \in \Gamma^+(n)} x_{fa}^k - \sum_{a \in \Gamma^-(n)} x_{fa}^k = 0, \quad \forall f \in F, \forall n \in N_f, \forall k \in H \cup \{0\} \quad (3.9)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{a \in L_i^{k'}} \sum_{k \in H \cup \{0\} / \{k'\}} x_{fa}^k \leq R_{k'}, \quad \forall k' \in H, \forall t \in T \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in H \cup \{0\}} \sum_{a \in O_f} x_{fa}^k \leq W_f, \quad \forall f \in F \quad (3.11)$$

$$z_i^k \geq \sum_{f \in F} x_{fa}^k \delta_a^i, \quad \forall i \in I, \forall a \in L, \forall k \in H \quad (3.12)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{k \in H \cup \{0\}} \sum_{a \in L} c_{fa} x_{fa}^k \leq Z^* (1 - \epsilon) \quad (3.13)$$

$$x_{fa}^k \in \mathbf{Z}^+, \quad \forall f \in F, \forall a \in G_f, \forall k \in H \cup \{0\} \quad (3.14)$$

$$x_{fa}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall f \in F, \forall a \in L_f, \forall k \in H \cup \{0\} \quad (3.15)$$

$$z_i^k \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall k \in H. \quad (3.16)$$

L'objectif (3.7) consiste à maximiser le revenu total provenant des passagers. L'expression linéaire utilisée néglige le cas où deux pétales seront perturbés en même temps, mais c'est un cas peu fréquent. Les contraintes (3.8) sont les contraintes de couverture assurant que chaque segment de vol est couvert par un et un seul type d'avion et qu'il se trouve dans l'une des deux parties de la fleur, soit dans *le coeur* ou dans l'un des *pétales*. Les contraintes (3.9) sont les contraintes de conservation de flot assurant que le nombre d'avions entrant à chaque aéroport est égal au nombre d'avions sortant de cet aéroport. Les contraintes (3.10) assurent la réalisabilité de l'horaire à chaque aéroport lorsque la capacité aux aéroports est réduite. Elles assurent que le nombre d'opérations à chaque aéroport ne dépasse pas la capacité aux aéroports dans les mauvaises conditions atmosphériques quand les vols dans le pétale correspondant sont annulés. Les contraintes (3.11) calculent le nombre d'avion disponible pour chaque type. Les contraintes (3.8), (3.9) et (3.11) ensemble assurent la réalisabilité de FAP. La contrainte (3.12) impose que $z_i^k = 1$ si un segment de vol de l'itinéraire i est dans le pétale k . La contrainte (3.13) relie le coût optimal obtenu de la résolution du problème de FAP et les coûts de F-FAP. La valeur de ϵ ne peut être nulle car on doit conserver un bénéfice planifié au moins égal à la fraction $(1 - \epsilon)$ du bénéfice du problème FAP. Si $(1 - \epsilon) = 1$ ceci posera des problèmes de non-réalisabilité pour la contrainte (3.10). Une inégalité $\leq$ est utilisée car Z^* est le négatif du bénéfice. Les contraintes (3.14), (3.15) et (3.16) assurent l'intégrité des variables de décision.

3.2 Approche de résolution

Cette section décrit l'approche de résolution en nombres entiers du modèle (3.7)-(3.16) décrit dans la section 3.1.2 pour le problème d'affectation des types d'avions aux vols tout en préservant des itinéraires de passagers robustes en cas de la présence des mauvaises conditions météorologiques. La résolution de chaque problème

a été effectuée à l'aide de l'optimiseur CPLEX 9.0.3. Avant la résolution de chaque problème, nous avons utilisé la procédure de réduction du problème avec le préprocesseur de l'optimiseur CPLEX. Afin d'obtenir facilement des solutions entières dans le branchement, une procédure heuristique d'arrondi est appliquée après la résolution de la relaxation linéaire du noeud racine avant d'appliquer la procédure de branchement. Ainsi, les variables de flot binaires et des itinéraires dont la valeur fractionnaire est supérieure à un certain seuil que nous avons posé à 0.7, sont fixées à 1. La relaxation linéaire a été résolue à l'aide de l'algorithme de points intérieurs suivi d'une procédure pour obtenir une solution de base (crossover). Les relaxations linéaires des autres noeuds de l'arbre de branchement ont été résolues à l'aide de l'algorithme du simplexe primal. En effet, la résolution des autres noeuds de l'arbre par cet algorithme offre une stabilité dans les temps de résolution des problèmes par rapport à l'algorithme de points intérieurs suivi d'une procédure pour obtenir une solution de base (crossover). La méthode de branchement employée consiste à fixer une variable de recouvrement d'un segment de vol à 0 ou 1. Nous n'accordons aucune priorité aux variables pendant le branchement. La méthode d'exploration de l'arbre est de type profondeur d'abord. Notons que nous permettons des retours en arrière dans l'arbre de branchement. Le critère d'arrêt correspond à la première solution entière trouvée.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET COMPARAISONS

Dans ce chapitre, on présente les différents résultats obtenus lors de la résolution des problèmes FAP et F-FAP en appliquant les différentes valeurs de paramètres sur différentes périodes de planification. L'approche de résolution décrite dans la section 3.2 a été testée sur un jeu de données fourni par la compagnie Air Canada pour la saison été 2002. Les caractéristiques de cet ensemble de données sont présentées dans le tableau 4.1. Les colonnes du tableau indiquent la période de planification, le nombre de segments de vol, le nombre de types d'avion, le nombre total d'avions utilisés dans l'affectation et le nombre d'itinéraires de passagers. On a considéré les itinéraires de passagers sélectionnés par la compagnie. Entre autre, les itinéraires avec de très petits nombres de passagers n'ont pas été considérés. Tous les tests numériques présentés dans cette section ont été effectués sur un processeur d'une machine UltraSPARC à 900MHz et 8GB de mémoire.

En particulier, nous calculons les solutions du problème F-FAP pour différentes valeurs de paramètres avec celles du problème de base d'affectation des types d'avions aux vols FAP.

Pour cela, on a commencé d'abord par résoudre le problème de base FAP. L'approche de résolution de F-FAP peut être résumée comme suit :

DÉBUT

- Résoudre FAP. Soit Z^* la valeur optimale de la fonction objectif;
- Poser $\epsilon = 0.0001$;
- Poser la contrainte : valeur de FAP $\leq Z^*(1 - \epsilon)$;
- Résoudre F-FAP.

FIN

Tableau 4.1 – Statistiques sur les données (saison été 2002).

Période de plani.	Nb. seg. vol	Nb. de types	Nb. d'avions	Nb. d'itin. de pass.
Lundi	763	15	203	429
Mardi	754	15	203	474
Mercredi	757	15	203	479
Jeudi	760	15	203	482
Vendredi	766	15	203	481
Samedi	708	15	203	435
Dimanche	691	15	203	447
Lundi et mardi	1517	15	203	3008
Mardi et mercredi	1511	15	203	2981
Mercredi et jeudi	1517	15	203	3028
Jeudi et vendredi	1526	15	203	3060
Vendredi et samedi	1474	15	203	3029
Samedi et dimanche	1399	15	203	2624
Lundi à mercredi	2274	15	203	5611
Lundi à jeudi	3034	15	203	8235
Lundi à vendredi	3800	15	203	10920
Lundi à samedi	4508	15	203	13557
Semaine	5199	15	203	17889

Dans ce mémoire, Différentes valeurs et versions de paramètres décrites dans la section 3.1.2 sont appliquées au problème F-FAP. Dans un premier temps, on a seulement considéré trois aéroports, soient : Montréal (YUL), Toronto (YYZ) et Vancouver (YVR), qui représentent les villes les plus importantes qui sont certainement

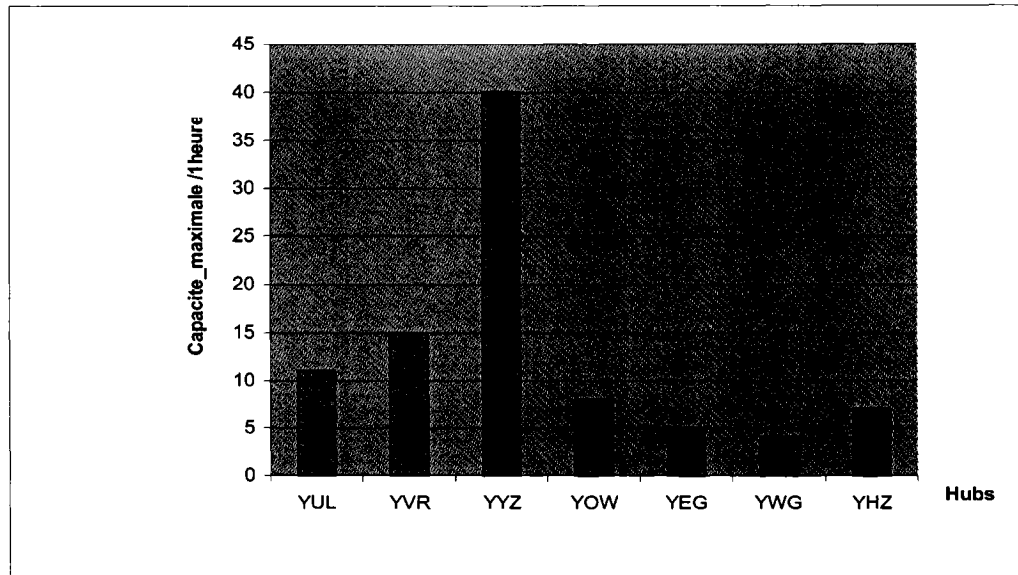


Figure 4.1 – Exemple de capacités maximales aux aéroports par tranche de temps d'une heure.

congestionnées quand la capacité de l'aéroport est réduite par des problèmes météorologiques. Dans un deuxième temps, on a ajouté quatre autres aéroports de moyenne importance qui peuvent aussi présenter des problèmes de congestion : Ottawa (YOW), Edmonton (YEG), Winnipeg (YWG) et Halifax (YHZ).

4.1 Capacité réduite aux aéroports

Tel qu'il est mentionné dans la section 3.1.2, on a calculé la capacité réduite à tous les aéroports considérés en présence de mauvaises conditions atmosphériques. Ceci est obtenu en réduisant la capacité maximale aux aéroports considérés, autrement dit, en réduisant le nombre de vols entrants et sortants à chaque aéroport à un taux spécifique θ pour chaque tranche de temps d'environ une heure. Pour bien illustrer notre idée, on a considéré deux scénarios de taux (50% et 75%) pour réduire la

capacité maximale d'un aéroport. La figure 4.1 est un histogramme qui montre la valeur de la capacité maximale aux aéroports enregistrée durant une des tranches de temps d'une heure. Les capacités réduites aux différents aéroports obtenues sont présentées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Exemple de capacités réduites aux aéroports par tranche de temps d'une heure.

Aéroport	1 ^{er} scénario de cap. réd.	2 ^{me} scénario de cap. réd.
YUL	06 vols (54.54%)	08 vols (72.72%)
YVR	08 vols (53.33%)	11 vols (73.33%)
YYZ	20 vols (50%)	30 vols (75%)
YOW	04 vols (50%)	06 vols (75%)
YEG	03 vols (60%)	04 vols (80%)
YWG	02 vols (50%)	03 vols (75%)
YHZ	04 vols (57.14%)	05 vols (71.43%)

La première colonne du tableau 4.2 correspond à l'aéroport. Les deux dernières colonnes indiquent respectivement le premier scénario de capacité réduite correspondant à 50% et le deuxième scénario correspondant à 75%.

4.2 Résultats numériques et comparaison

Dans cette section, nous présentons les résultats numériques correspondant à la solution du problème d'affectation des types d'avions aux vols avec la structure de la fleur F-FAP qui permet de localiser l'impact des retards et/ou annulations de vols en présence de mauvaises conditions atmosphériques aux aéroports sans propager ces perturbations dans le reste du réseau. On commence par présenter les résultats obtenus pour un jour, deux jours, ..., graduellement jusqu'à ce qu'on couvre toute

une semaine type. Ensuite, nous comparons cette solution pour différentes valeurs de paramètres de capacité réduite, de pourcentage de temps pendant lequel la capacité d'un aéroport est réduite et de nombre de aéroports considérés. Enfin, nous calculons le gain produit par F-FAP versus FAP lors de l'opération.

Le tableau 4.3 indique la taille des trois types de problèmes FAP, F-FAP-3 (avec 3 aéroports) et F-FAP-7 (avec 7 aéroports) pour différentes périodes de planification. La première colonne de ce tableau correspond à la période de planification considéré pour chaque type de problème. La deuxième et la troisième colonne indiquent respectivement le nombre de variables et le nombre de contraintes utilisés dans le problème de base FAP. La quatrième et la cinquième colonne correspondent respectivement au nombre de variables et de contraintes pour le problème F-FAP-3. Enfin, les deux dernières colonnes indiquent respectivement le nombre de variables et de contraintes du problème F-FAP-7.

On remarque que l'augmentation de la taille de l'ensemble des aéroports et la période de planification considéré a engendré l'élargissement de la taille du problème F-FAP (voir Tableau 4.3). Cependant, la résolution du F-FAP a résulté des temps de calcul (CPU) raisonnables par rapport au temps de calcul du problème de base FAP (voir les tableaux 4.4, 4.5, et 4.6).

Le tableau 4.4 présente les résultats numériques obtenus de la résolution du problème de base FAP pour chaque période de planification considérée. Les tableaux 4.5 et 4.6 indiquent les résultats numériques de la résolution de chaque type de problème F-FAP-3 et F-FAP-7 respectivement, pour différents scénarios de capacité réduite et de pourcentage de temps pendant lequel la capacité est réduite, sur un horizon donné de planification. La première colonne de ces trois tableaux correspond au type de chaque problème testé. La deuxième colonne indique la période de planification considérée pour chaque type de problème. Les troisième, quatrième et cinquième colonnes correspondent respectivement aux temps de résolution de la relaxation linéaire, le temps

Tableau 4.3 – Taille des problèmes FAP et F-FAP pour différentes périodes de planification.

Période de plani.	FAP-base		F-FAP-3		F-FAP-7	
	Nb. var.	Nb. contr.	Nb. var.	Nb. contr.	Nb. var.	Nb. contr.
Lundi	21732	13500	22124	13987	22284	14225
Mardi	21483	13330	21917	13838	22103	14088
Mercredi	21429	13313	21865	13822	22051	14070
Jeudi	21543	13382	21976	13888	22162	14137
Vendredi	21721	13512	22152	14017	22338	14266
Samedi	20138	12444	20527	12912	20692	13146
Dimanche	19696	12176	20098	12639	20267	12867
Lundi et mardi	42734	26806	45663	29875	46000	30344
Mardi et mercredi	42437	26621	45323	29624	45686	30103
Mercredi et jeudi	42485	26669	45414	29713	45777	30190
Jeudi et vendredi	42771	26864	45732	29939	46101	30418
Vendredi et samedi	41371	25926	44304	28979	44648	29442
Samedi et dimanche	39277	24590	41809	27231	42134	27674
Lundi à mercredi	63682	40095	69161	45756	69684	46453
Lundi à jeudi	84716	53447	92769	61722	93460	62648
Lundi à vendredi	105933	66929	116621	77880	117479	79036
Lundi à samedi	125572	79343	138851	92931	139877	94301
Semaine	144657	91486	162222	109364	163407	110930

de branchement et le nombre du noeuds de branchement. Les sixième et septième colonnes indiquent respectivement la valeur de la relaxation linéaire et la valeur de la solution optimale pour chaque problème. Enfin, les deux dernières colonnes correspondent respectivement au temps total CPU pour résoudre chaque problème et au gap en pourcentage.

On constate que les temps de calcul pour le problème de base sont très raisonnables alors qu'on enregistre une durée de 2 heures et 58 minutes pour résoudre FAP sur un horizon d'une semaine. Les temps de calcul s'accroissent en fonction de la période de planification considérée. Pour l'ensemble des problèmes F-FAP testés pour trois et sept aéroports et pour différents scénarios de capacité réduite et de proportion du temps pendant laquelle la capacité d'un aéroport est réduite, on voit que les temps

Tableau 4.4 – Résultats numériques sur la résolution du problème FAP.

Pb.	Période de plani.	relax. lin. (sec)	Branch. (sec.)	Nb. noeuds branch.	Val. relax.	Val. sol.	CPU (sec)	Gap (%)
FAP	Lundi	1.5	22.4	0	-7945291	-7945291	23	0
	Mardi	1.4	22	0	-7787797	-7787797	23	0
	Mercredi	3.5	62.2	0	-7696839	-7696839	65	0
	Jeudi	3.2	52.6	0	-8129640	-8129640	55	0
	Vendredi	3.5	57.7	0	-8144678	-8144678	61	0
	Samedi	2.6	42.7	0	-7372098	-7372098	45	0
	Dimanche	4.5	52.7	0	-7664015	-7664015	57	0
	Lundi et mardi	7.2	157	1	-15732730	-15732730	164	0
	Mardi et mercredi	20	177	4	-15481858	-15481858	197	0
	Mercredi et jeudi	23	230	4	-15828304	-15828304	254	0
	Jeudi et vendredi	29	359	6	-16273334	-16273334	388	0
	Vendredi et samedi	10	199	2	-15513448	-15513448	210	0
	Samedi et dimanche	12	216	1	-15048784	-15048784	228	0
	Lundi à mercredi	41	350	3	-23436985	-23436985	391	0
	Lundi à jeudi	71	969	7	-31572938	-31572938	1041	0
	Lundi à vendredi	253	897	6	-39723926	-39723926	1151	0
	Lundi à samedi	517	3861	9	-47101002	-47101002	4378	0
	Semaine	345	10357	11	-54798685	-54798685	10702	0

de calcul sont plus élevés que les temps de résolution de FAP, ce qui s'explique par la taille du problème qui a considérablement augmenté, mais ils restent toujours raisonnables par rapport à la période de planification considérée et la taille du problème.

En ce qui concerne les solutions obtenues, on remarque que pour le problème de base FAP, les solutions entières sont de bonne qualité et sont identiques à celles de la relaxation linéaire, donc le gap est nul pour chaque période de planification considérée. Pour les problèmes F-FAP-3 et F-FAP-7, pour différents scénarios et pour chaque période de planification, les solutions sont bonnes. On constate que le fait d'introduire le facteur de robustesse au problème de base FAP permet d'obtenir des solutions de bonne qualité. De plus, on constate que le gap produit dans F-FAP-3 et F-FAP-7 est non nul mais très petit. Cette erreur ne pose pas de problème en pratique. Il n'est pas utile d'augmenter les temps de calcul pour réduire ce gap.

Également, on remarque que les solutions obtenues de F-FAP-3 et de F-FAP-7 dans le premier scénario ($R^k = 50\%$, $\lambda^k = 2\%$) sont meilleures que celles obtenues dans

le deuxième scénario ($R^k = 50\%$, $\lambda^k = 5\%$). Même remarque constatée entre le troisième ($R^k = 75\%$, $\lambda^k = 2\%$) et le quatrième scénario ($R^k = 75\%$, $\lambda^k = 5\%$) ce qui permet de dire que plus la probabilité de perte de revenu dans un pétale (proportion de temps λ^k) augmente, plus le revenu diminue. Par contre, on constate que les valeurs des solutions obtenues du troisième scénario sont meilleures que celles obtenues du premier scénario pour chaque période de planification considérée. Même remarque constatée entre le quatrième et le deuxième scénario ce qui s'explique par le fait de permettre une capacité de 75% dans le coeur de la fleur pour le troisième et le quatrième scénario comparée à une capacité de 50% dans le coeur de la fleur pour le premier et le deuxième scénario. Plus la capacité réduite est grande plus on protège de vols dans le coeur de la fleur, et plus on conserve de revenu. Donc, ces résultats nous permettent de dire que plus la capacité réduite est grande et le pourcentage de temps perturbé λ^k est petit plus les solutions seront bonnes. En comparant les résultats du premier et quatrième scénario, on constate que l'augmentation de 2% à 5% du temps de perturbation a moins d'effet sur le bénéfice que la réduction de capacité de 75% à 50%. En effet, pour la semaine, cette différence est de l'ordre de 630000\$. La différence est dans le même sens pour six périodes de planification sur sept. Pour la septième (période de lundi à jeudi), la différence est très petite.

Les tableaux 4.7 et 4.8 donnent respectivement les taux de vols protégés placés dans le coeur de la fleur après résolution du problème F-FAP-3 et F-FAP-7. La première colonne de ces tableaux indique la période de planification considérée. La deuxième colonne indique l'aéroport, et les quatre dernières colonnes correspondent respectivement aux taux de vols placés dans le coeur de la fleur selon les quatre scénarios considérés : scénario 1 " $R^k = 50\%$, $\lambda^k = 2\%$ ", scénario 2 " $R^k = 50\%$, $\lambda^k = 5\%$ ", scénario 4 " $R^k = 75\%$, $\lambda^k = 2\%$ " et scénario 4 " $R^k = 75\%$, $\lambda^k = 5\%$ ".

On remarque que le taux de vols passant par les aéroports Toronto (YYZ) et Vancouver (YVR) qui sont placés dans le coeur de la fleur sont proches du taux de la

capacité réduite imposée dans le modèle. Par contre, ceux qui passent par l'aéroport Montréal (YUL) sont moins serrés par rapport au taux de R^k considéré dans le modèle F-FAP, ce qui s'explique par le nombre de mouvements (vols entrant et sortant de l'aéroport Montréal). On constate qu'un seul mouvement d'avion de moins que le maximum permis est annulé pour une certaine tranche de temps déjà considérée dans le tableau 4.2. Par contre, pour le problème F-FAP-7, on constate que le pourcentage de vols protégés passant par l'aéroport Toronto (YYZ) placés dans le coeur de la fleur est bien proche du pourcentage de R^k imposés. Les taux de vols protégés des six autres aéroports restants sont moins proches en pourcentage de R^k mais il s'agit seulement d'une différence d'un vol.

Le tableau 4.9 présente le gain (en \$) obtenu par la *structure de fleur* en comparant avec la solution optimale FAP. Pour évaluer la solution de FAP en présence des perturbations, on a pris la solution obtenue de FAP sur un horizon d'une journée (lundi) et d'une semaine type. On a fixé l'affectation des types d'avions aux vols et on a réoptimisé les routes d'avions pour maximiser le bénéfice durant l'opération, c'est-à-dire appliquer des mises à jour optimales aux routes d'avions suite aux perturbations. C'est une évaluation optimiste car on maximise le bénéfice sans affecter les modifications aux routes d'avions. En pratique, les mises à jour durant l'opération conservent autant que possible les routes d'avions pour préserver les autres éléments de la planification tels que les horaires d'équipage, le service au sol,... La première colonne du tableau 4.9 indique le type de problème. Les quatre dernières colonnes correspondent respectivement au gain obtenu pour chacun des quatre scénarios de λ^k et R^k . C'est la différence entre le bénéfice avec F-FAP et FAP.

On remarque que notre nouvelle structure du réseau *structure de fleur* a permis d'obtenir un gain substantiel par rapport à FAP même si on a estimé de façon très optimiste le bénéfice de FAP en opération. On constate pour l'ensemble des problèmes testés F-FAP-3 et F-FAP-7 versus FAP que le gain obtenu pour le premier

scénario est meilleur que celui du troisième scénario et le gain obtenu du deuxième scénario est meilleur que celui du quatrième scénario. Ceci permet de dire que plus la capacité est réduite à cause des perturbations plus le gain de la planification robuste est important. De même, on remarque que le gain obtenu du deuxième et du quatrième scénario sont meilleurs que ceux obtenus du premier et du troisième scénario respectivement. Ceci s'explique par le pourcentage du temps λ^k qui est passé de 2% pour les premier et troisième scénarios à 5% pour les deuxième et quatrième scénarios. Donc, plus le pourcentage du temps de perturbation augmente plus le gain de la planification robuste est important. En effet, pour les huit scénarios considérés, on a obtenu un gain de 100000\$ à 200000\$ par semaine, ce qui donne 5 à 10 millions par année.

On conclut de notre cheminement expérimental que le modèle F-FAP a permis de préserver une plus grande partie de revenu suite à des perturbations que le modèle FAP. Ceci est obtenue avec *la structure de fleur* qui permet de protéger dans le coeur les vols les plus importants passant par chaque aéroport et d'annuler en cas de mauvaises conditions atmosphériques seulement des vols moins payants et moins connectés avec le reste du réseau. Pour une évaluation plus précise il faudrait simuler l'opération avec des scénarios de perturbations et un système de mise à jour.

Tableau 4.5 – Résultats numériques sur la résolution du problème F-FAP-3.

Pb.	Période de plani.	relax. lin. (sec)	Branch. (sec.)	Nb. noeuds branch.	Val. relax.	Val. sol.	CPU (sec)	Gap (%)
F-FAP-3 $R^k = 50\%$ $\lambda^k = 2\%$	Lundi	3.2	158	3	6863501	6861741	161	0.02
	Mardi	3.4	118.5	5	7122651	7121008	121	0.02
	Mercredi	4.2	130.7	5	7260431	7256477	134	0.05
	Jeudi	3.2	145.1	4	7581260	7579320	148	0.02
	Vendredi	3.5	134.7	1	7313001	7312180	138	0.01
	Samedi	1.9	121.4	3	7291421	7288997	123	0.03
	Dimanche	3.4	90.1	2	7390438	7389658	93	0.01
	Lundi et mardi	30.5	913.1	7	13986848	13983538	943	0.02
	Mardi et mercredi	33.5	2831	26	14385387	14382763	2864	0.01
	Mercredi et jeudi	24	621.2	15	14843626	14837879	645	0.03
	Jeudi et vendredi	36.1	1246.5	31	14895316	14891633	1282	0.02
	Vendredi et samedi	21	744.1	14	14605430	14601820	765	0.02
	Samedi et dimanche	363.9	71835	46	14682787	14681164	7547	0.01
	Lundi à mercredi	117.5	1952.7	39	21250570	21244030	2070	0.03
	Lundi à jeudi	383.3	6614	47	28481171	28454856	6997	0.09
	Lundi à vendredi	401.1	4197.5	71	36150966	36142758	4598	0.02
	Lundi à samedi	544.9	10279.3	87	43443874	43432751	10824	0.02
	Semaine	686	41700.6	98	50830487	50817976	42386	0.02
F-FAP-3 $R^k = 50\%$ $\lambda^k = 5\%$	Lundi	3.2	173.8	2	6768746	6764068	176	0.06
	Lundi et mardi	36.5	1903.4	9	13805492	13793140	1939	0.08
	Lundi à mercredi	230.2	3071.9	18	20984587	20971825	3302	0.06
	Lundi à jeudi	1186.6	3524.8	21	28191300	28186249	4711	0.01
	Lundi à vendredi	145.9	7984.5	43	35707507	35683705	8130	0.06
	Lundi à samedi	5045.7	8451.7	91	42909455	42888006	13497	0.05
	Semaine	957.1	19670.5	89	50209876	50185452	20627	0.04
F-FAP-3 $R^k = 75\%$ $\lambda^k = 2\%$	Lundi	3.2	107.5	3	6864023	6862690	110	0.01
	Lundi et mardi	32.1	868.9	5	13987437	13984243	901	0.02
	Lundi à mercredi	558.43	4507.65	21	21258653	21247334	5066	0.05
	Lundi à jeudi	1776.3	7104.4	32	28837109	28830380	8880	0.02
	Lundi à vendredi	495.2	10912	76	36159438	36143787	11407	0.04
	Lundi à samedi	1004.9	11712.6	81	43451094	43436773	12717	0.03
	Semaine	2220.1	15438.3	88	50832016	50819294	17658	0.02
F-FAP-3 $R^k = 75\%$ $\lambda^k = 5\%$	Lundi	2.8	691.2	4	6769298	6765801	693	0.05
	Lundi et mardi	46.5	896.1	9	13840162	13799371	942	0.29
	Lundi à mercredi	159.4	3470.8	18	20987002	20976966	3630	0.04
	Lundi à jeudi	374.2	4738.5	36	28488957	28468567	5112	0.07
	Lundi à vendredi	880.8	5515.4	29	35775986	35686823	6396	0.24
	Lundi à samedi	1060.1	3005.5	41	42950327	42891736	4065	0.01
	Semaine	921.4	36281.1	97	50220085	50186479	37202	0.06

Tableau 4.6 – Résultats numériques sur la résolution du problème F-FAP-7.

Pb.	Période de plani.	relax. lin. (sec)	Branch. (sec.)	Nb. noeuds branch.	Val. relax.	Val. sol.	CPU (sec)	Gap (%)
F-FAP-7 $R^k = 50\%$ $\lambda^k = 2\%$	Lundi	4.2	166.7	2	6856037	6854068	170	0.02
	Lundi et mardi	171.5	4708.4	45	13971940	13968158	4879	0.02
	Lundi à mercredi	27.8	5113.9	58	21227932	21221655	5141	0.02
	Lundi à jeudi	119.2	1713.4	23	28805408	28798219	1832	0.02
	Lundi à et vendredi	1681	9294.5	74	36107960	36100023	10975	0.02
	Lundi à samedi	842.6	13799.2	76	43404095	43394032	14641	0.02
	Semaine	1386	14580.7	83	50785579	50773824	15966	0.02
F-FAP-7 $R^k = 50\%$ $\lambda^k = 5\%$	Lundi	3.6	187.4	2	6747336	6745483	190	0.02
	Mardi	3.4	185.4	4	7015938	7011060	188	0.06
	Mercredi	5.8	160.5	2	7150937	7147681	166	0.04
	Jeudi	3.4	182.1	3	7465472	7460832	185	0.06
	Vendredi	3.5	473.1	7	7202469	7199516	476	0.04
	Samedi	2.5	149.8	2	7189330	7178922	152	0.14
	Dimanche	4	170.1	2	7294577	7291503	174	0.04
	Lundi et mardi	29.9	939.5	7	13748220	13742916	969	0.03
	Mardi et mercredi	29.3	898	5	14173707	14159972	927	0.09
	Mercredi et jeudi	44	1093.9	21	14622448	14605047	1137	0.11
	Jeudi et vendredi	358.2	979.5	23	14670109	14660083	1337	0.06
	Vendredi et samedi	29.5	709.4	8	14398248	14383932	738	0.09
	Samedi et dimanche	47.2	2024.1	24	14487868	14476107	2071	0.08
	Lundi à mercredi	114.8	2963.2	38	20917993	20913847	3078	0.01
	Lundi à jeudi	513.6	6058.1	61	28394547	28382344	6571	0.04
	Lundi à vendredi	4048.7	4331.3	75	35612492	35582526	8380	0.08
	Lundi à samedi	4026.7	10259.3	78	42791006	42774342	14286	0.03
	Semaine	930.3	17867.9	95	50097605	50060706	18498	0.07
F-FAP-7 $R^k = 75\%$ $\lambda^k = 2\%$	Lundi	3.61	159.5	2	6856648	6854118	163	0.03
	Lundi et mardi	29.1	875.9	8	13977264	13968778	905	0.06
	Lundi à mercredi	89.5	4166.3	47	21228022	21223160	4255	0.02
	Lundi à jeudi	330.8	6947.7	48	28840526	28798586	7278	0.14
	Lundi à vendredi	869.3	18275.6	79	36118679	36102199	19144	0.04
	Lundi à samedi	4513.1	31532.7	102	43445079	43394094	36045	0.11
	Semaine	1527.7	39784.4	107	50787583	50775017	41312	0.02
F-FAP-7 $R^k = 75\%$ $\lambda^k = 5\%$	Lundi	3.3	1090.8	13	6758257	6746175	1094	0.17
	Lundi et mardi	28.5	1581.9	17	13770864	13749428	1610	0.15
	Lundi à mercredi	146.6	2241.8	30	20932573	20916020	2388	0.07
	Lundi à jeudi	825.2	3553.3	54	28482007	28384139	4378	0.34
	Lundi à vendredi	423.6	13671.9	82	35639251	35591950	14095	0.13
	Lundi à samedi	997.8	13276.1	76	42865387	42784965	14273	0.18
	Semaine	6035	15257.7	89	50110537	50067904	21292	0.08

Tableau 4.7 – Taux de vols protégés dans le coeur de la fleur après la résolution de F-FAP-3.

Période de plani.	Aéroport	scén.1	scén.2	scén.3	scén.4
Lundi	YYZ	45.49%	45.49%	68.28%	68.28%
	YUL	39.51%	39.51%	58.87%	58.87%
	YVR	44.16%	43.50%	65.58%	65.58%
Lundi et mardi	YYZ	46%	46%	69%	69%
	YUL	39.43%	39.43%	58.94%	58.94%
	YVR	44.22%	44.22%	66.34%	66.34%
Lundi à mercredi	YYZ	47.48%	47.48%	71.22%	71.22%
	YUL	49.40%	49.40%	58.97%	58.97%
	YVR	44.15%	44.15%	66.23%	66.45%
Lundi à jeudi	YYZ	47.19%	47.19%	70.81%	70.81%
	YUL	39.39%	39.39%	58.98%	58.98%
	YVR	43.87%	43.87%	49.34%	49.34%
Lundi à vendredi	YYZ	47.04%	47.04%	70.56%	70.7%
	YUL	39.38%	39.38%	58.99%	58.99%
	YVR	43.93%	43.93%	66.09%	65.96%
Lundi à samedi	YYZ	47.41%	47.41%	71.10%	71.10%
	YUL	39.34%	39.34%	59%	59%
	YVR	43.77%	43.99%	65.71%	65.71%
Semaine	YYZ	45.99%	45.99%	69%	69%
	YUL	39.57%	39.57%	59.35%	59.35%
	YVR	43.77%	43.77%	65.74%	65.74%

Tableau 4.8 – Taux de vols protégés dans le coeur de la fleur après la résolution de F-FAP-7.

Période de planification	Aéroport	Scén.1	Scén.2	Scén.3	Scén.4
Lundi	YYZ	41.19%	41.19%	61.89%	61.89%
	YUL	37.90%	37.90%	56.45%	56.45%
	YVR	39.61%	39.61%	59.09%	59.09%
	YOW	36.58%	36.58%	54.88%	54.88%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	30.80%	30.80%	46.15%	46.15%
	YWG	34.21%	34.21%	50%	50%
Lundi et mardi	YYZ	41.67%	41.67%	62.44%	62.44%
	YUL	37.80%	37.80%	56.50%	56.50%
	YVR	39.93%	39.93%	59.73%	59.73%
	YOW	36.58%	36.58%	54.88%	54.88%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	29.63%	29.63%	44.44%	44.44%
	YWG	34.21%	34.21%	51.31%	51.31%
Lundi à mercredi	YYZ	42.98%	43.05%	64.50%	64.50%
	YUL	37.77%	37.77%	56.52%	56.52%
	YVR	39.73%	39.95%	60.26%	59.60%
	YOW	36.58%	36.58%	54.88%	54.88%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	29.27%	29.27%	43.90%	43.90%
	YWG	34.21%	34.21%	50.88%	50.88%
Lundi à jeudi	YYZ	42.76%	42.76%	64.17%	64.17%
	YUL	37.75%	37.75%	56.53%	56.53%
	YVR	39.57%	39.57%	59.44%	59.44%
	YOW	36.58%	36.58%	54.88%	54.88%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	29.09%	29.09%	43.64%	43.64%
	YWG	34.21%	34.21%	51.31%	51.31%
Lundi à vendredi	YYZ	42.62%	42.62%	63.93%	63.93%
	YUL	37.74%	37.74%	56.54%	56.54%
	YVR	39.58%	39.58%	59.37%	59.76%
	YOW	36.58%	36.58%	54.88%	54.88%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	28.98%	28.98%	43.48%	43.48%
	YWG	34.21%	34.21%	51.58%	51.58%
Lundi à samedi	YYZ	45.01%	45.01%	67.54%	67.54%
	YUL	37.67%	37.67%	56.51%	56.51%
	YVR	39.58%	39.47%	59.21%	59.54%
	YOW	36.61%	36.61%	54.81%	54.81%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	28.74%	28.74%	43.32%	43.32%
	YWG	34.21%	34.21%	51.31%	51.31%
Semaine	YYZ	41.75%	41.75%	62.62%	62.62%
	YUL	37.89%	37.89%	56.83%	56.83%
	YVR	39.69%	39.50%	59.26%	59.26%
	YOW	36.53%	36.53%	54.80%	54.80%
	YHZ	35%	35%	52.50%	52.50%
	YEG	28.62%	28.62%	43.11%	43.11%
	YWG	34.21%	34.21%	51.50%	51.50%

Tableau 4.9 – Gain (en \$) obtenu de F-FAP versus FAP.

Problème	F-FAP-3		F-FAP-7	
Péri. de plani.	Lundi	Semaine	Lundi	Semaine
Scénario 1	10997	177638	9089	117632
Scénario 2	16893	189378	13054	139088
Scénario 3	9995	176799	8487	110877
Scénario 4	15964	189210	13024	138933

CONCLUSION

Ce projet de maîtrise a porté sur le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avion aux vols avec robustesse. Une solution réalisable de ce problème permet de construire des itinéraires d'avions en couvrant tous les segments de l'horaire de vols donné.

L'objectif de ce travail est de rendre les horaires d'avions plus robuste en cas de mauvaises conditions météorologiques en réduisant la partie du réseau perturbé par la réduction de capacité d'un aéroport.

Les principales contributions de ce mémoire sont de présenter un cadre de modélisation générale et détaillée pour le problème hebdomadaire d'affectation des types d'avion aux vols en tenant compte des itinéraires de passagers pour pouvoir obtenir des solutions plus robustes des horaires d'avions en cas de mauvaises conditions atmosphériques. Dans nos solutions planifiées, les routes de certains avions passant par l'aéroport touché peuvent être annulées sans trop de conséquences car elles transportent peu de passagers ayant des correspondances avec les autres vols du réseau.

Tout d'abord, nous avons défini l'horaire de vols comme un horaire partitionné en plusieurs sous-horaires selon le nombre d'aéroports touchés par les problèmes météorologiques. Ensuite on a placé ces horaires d'avions dans une nouvelle structure du réseau appelée *structure de fleur*. Cette nouvelle structure originale nous a permis de préserver une grande partie de revenu suite à des perturbations des vols en cas de mauvaises conditions atmosphériques, et de protéger autant que possible des routes de passagers sans propager les perturbations dans une grande partie du réseau. Ceci permet d'augmenter la satisfaction des clients et le bénéfice de la compagnie.

Les conclusions tirées de notre étude sont les suivantes. Pour mettre en application le concept de cette nouvelle structure du réseau, nous avons identifié trois étapes pour incorporer le facteur de robustesse dans la solution d'affectation, soient : résoudre le problème de base FAP, implémenter *la structure de fleur* correspondant aux aéroports qui peuvent être perturbés, et enfin, résoudre le problème F-FAP.

Le problème F-FAP consiste à regrouper deux optimisations : minimisation des coûts des affectations qui est le négatif du bénéfice et maximisation des revenus des passagers en tenant compte des coûts fixes d'utilisation hebdomadaire des avions. Le coût des affectations d'avions représente une borne supérieure pour le problème F-FAP.

Les résultats obtenus de F-FAP sont très satisfaisants pour les temps de résolution. Les solutions numériques ont permis de constater un potentiel de gain important pour la compagnie. Pour évaluer le gain de cette dernière, on a comparé F-FAP à FAP en fixant la solution des affectations et réoptimisant les routes d'avions suite à des perturbations d'horaires d'avions en cas de mauvaises conditions atmosphériques. C'est une évaluation très optimiste de FAP en cas de mauvais temps. On conclut que plus la capacité est réduite et plus le pourcentage de temps perturbé augmente à cause des perturbations plus le gain de la planification robuste est important.

De nouvelles voies de recherche suite à cette étude peuvent porter sur la procédure du branchement dans la résolution afin de réduire les temps de calcul en appliquant d'autres approches de résolution plus sophistiquées. On pourra entre autre réduire la profondeur de l'arbre en fixant plusieurs variables à chaque noeud de branchement. Ceci ne peut pas être fait par le branchement de CPLEX. Il faudra programmer un autre branchement. Il serait aussi pertinent de poursuivre les recherches dans le but de pouvoir s'attaquer à des problèmes de plus grande taille tout en conservant des temps de calcul raisonnables. En effet, certains grands transporteurs desservent un nombre de vols beaucoup plus élevé que celui d'Air Canada.

BIBLIOGRAPHIE

ABARA, J. (1989). Applying Integer Linear Programming to the Fleet Assignment Problem. *Interfaces* **19**, 20-28.

ACHOUR, H., GAMACHE, M., SOUMIS, F. et DESAULNIERS, G. (2004). An Exact Solution Approach for the PBS Problem, *Transportation Science*.

AGARD, J., SUDAROVITCH, J. et HEMMER, F. (1973). Selection and Optimal Assignment of an Aircraft Fleet. *R.A.I.R.O.*, **7**, 3-26.

AGEEVA, Y. (2000). Approaches to Incorporating Robustness into Airline Scheduling, *Mémoire MSc, Massachusetts of Technology*.

ANBIL, R., GELMAN, E., PATTY, B. et TANGA, R. (1991). Recent Advances in Crew Pairing Optimization at American Airlines, *Interfaces* **21**, 62-74.

ARCHIVES DES COMMUNIQUÉS DE PRESSE ET ÉNONCÉS (2002) -ENVIRONNEMENT CANADA-. [http ://www.ec.gc.ca/presse/2002/021227_n_f.htm](http://www.ec.gc.ca/presse/2002/021227_n_f.htm)

BALL, M.O. et ROBERTS, A. (1985). A Graph Partitioning Approach to Air Crew Scheduling, *Transportation Science*, **19**, 107-126.

BARD, J., YU, G. et ARGUELLO, M. (2001). Optimizing Aircraft Routings in Response to Groundings and Delays, *IIE Transactions*, **33**, 931-947.

BARNHART, C., BOLAND, N., CLARKE, L.W., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L. et SHENOI, R.G. (1998A). Flight String Models for Aircraft Fleeting and Routing, *Transportation Science*, **32**(3), 208-220.

BARNHART, C., HATAY, L. et JOHNSON, E.L. (1995). Deadhead Selection for the Long-Haul Crew Pairing Problem, *Operations Research*, **43**(3), 491-499.

BARNHART, C., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L., SAVELSBERGH, M.W.P. et VANCE, P. (1998B). Branch-and-Price : Column Generation for Solving Huge Integer Program, *Operations Research*, **46**(3), 316-329.

BARNHART, C., KNIKER, T.S. et LOHATEPANONT, M. (2002). Itinerary-based Airline Fleet Assignment, *Transportation Science*, **36**(2), 199-217.

BARNHART, C. et SHENOI, R.G. (1998). An Approximate Model and Solution Approach for the Long-Haul Crew Pairing Problem, *Transportation Science*, **32**(3), 221-231.

BÉLANGER, N., DESAULNIERS, G., SOUMIS, F., *École Polytechnique de Montréal et GERAD, Canada*, DESROSIERS, J., *École des Hautes Études Commerciales, Canada* et LAVIGNE, J., *Air Canada, Dorval, Canada* (2004A). Weekly Airline Fleet Assignment with Homogeneity,

BÉLANGER, N. (2004B). Contributions au Problème d'Affectation des Types d'Avion, *Thèse de doctorat, Département de Mathématiques et Génie Industriel, École Polytechnique de Montréal*.

BYRNE, J. (1988). A Preferential Biddings System for Technical Aircrew, *AGI-FORS Symposium Proceedings*, **28**, 87-99.

CHEBALOV, S. et KLABJAN, D. (2002). Robust Airline Crew Scheduling : Move-up Crews, *Proceedings of the 2002 NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conference*.

CLARKE, L.W., HANE, C.A., JOHNSON, E.L. et NEMHAUSER, G.L. (1996). Maintenance and Crew Considerations in Fleet Assignment, *Transportation Science*, **30**(3), 249-260.

CLARKE, L.W., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L. et ZHONGXI, Z. (1997). The Aircraft Rotation Problem, *Annals of Operations Research*, **69**, 33-46.

CORDEAU, J.-F., STOJKOVIC, G., SOUMIS, F. et DESROSIERS, J. (2001). Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling, *Transportation Science*, **35**(4), 375-388.

DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., DUMAS, Y., MARC, S., RIOUX, B., SOLOMON, M. et SOUMIS, F. (1997). Crew Pairing at Air France, *European Journal of Operational Research*, **97**, 245-259.

DOBSON, G. et LEDERER, P.J. (1993). Airline Scheduling and Routing in a Hub and Spoke System, *Transportation Science*, **27**, 281-297.

EMDEN-WEINERT, T. et PROKSCH, M. (1999). Best Practice Simulated Annealing for the Airline Crew Scheduling Problem, *Journal of Heuristics*, **5**, 419-436.

ETSCHMAIER, M.M. et MATHAISEL, D.F.X. (1984). Aircraft Scheduling : The State of the Art, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **24**, 181-225.

ETSCHMAIER, M.M. et MATHAISEL, D.F.X. (1985). Airline Scheduling : an Overview, *Transportation Science*, **19**, 127-138.

FAHLE, T., JUNKER, U., KARISCH, S.E., KOHL, N., SELLMANN, M. et VAABEN, B. (2002). Constraint Programming Based Column Generation for Crew Assignment, *Journal of Heuristics*, **8**, 59-81.

GAMACHE, M. et SOUMIS, F. (1998A). A Method for Optimally Solving the Rostering Problem, *Operations Research in Airline Industry*, G. Yu (ed.), Kluwer, Boston, 124-157.

GAMACHE, M., SOUMIS, F., MARQUIS, G. et DESROSIERS, J. (1998B). A Column Generation Approach for Large-Scale Aircrew Rostering Problems, *Operations Research*, **47**, 247-262.

GAMACHE, M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., DESROSIERS, J. et GÉLINAS, E. (1999). The Preferential Bidding System at Air Canada, *Transportation Science*, **32**(3), 246-255.

GLANERT, W. (1984). A Timetable Approach to the Assignment of Pilots to Rotations, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **24**, 369-391.

GOPALAN, R. et TALLURI, K. (1998). Mathematical Models in Airline Schedule Planning : A Survey, *Annals of Operations Research*, **76**, 155-185.

GU, Z., JOHNSON, E.L., NEMHAUSER, G.L. et WANG, Y. (1994). Some Properties of the Fleet Assignment Problem, *Operations Research Letters*, **15**, 59-71 .

HANE, C., BARNHART, C., JOHNSON, E.L., MARSTEN, R., NEMHAUSER, G.L. et SIGISMONDI, G. (1995). The Fleet Assignment Problem : Solving a Large-Scale Integer Program, *Mathematical Programming*, **70**, 211-232.

JARRAH, A.I., GOODSTEIN, J. et NARASIMHAN, R. (2000). An Efficient Airline Refleeting Model for the Incremental Modification of Planned Fleet Assignments, *Transportation Science*, **34**, 349-363.

JARRAH, A.I. et STREHLER, J.C. (2002). An Optimization Model for Assigning Through Flights, *IIE Transactions*, **32**, 237-244.

JONES, R.D. (1989). Development of an Automated Airline Crew Bid Generation System , *Interfaces*, **19**, 44-51.

KLABJAN, D., SCHAEFER, A., JOHNSON, E., KLEYWEGT, A. et NEMHAUSER, G. (2001). Robust Airline Crew Scheduling, *Proceedings of TRISTAN IV*.

KLINCEWICZ, J.G. et ROSENWEIN, M.B. (1995). The Airline Exception Scheduling Problem, *Transportation Science*, **29**(1), 4-6.

LAVOIE, S., MINOUX, M. et ODIER, E. (1988). A New Approach of Crew Pairing Problems by Column Generation and Application to Air Transport, *European Journal of Operational Research*, **35**, 45-58.

LETOVSKY, L., JOHNSON, E. et NEMHAUSER, G. (2000). Airline Crew Recovery, *Transportation Science*, **34**(4), 337-348.

MASHFORD, J.S. et MARKSJO, B.S. (2001). Airline Base Schedule Optimisation by Flight Network Annealing, *Annals of Operations Research*, **108**, 293-313.

MERCIER, A., CORDEAU, J.-F. et SOUMIS, F. (2004). A Computational Study of Benders Decomposition for the Integrated Aircraft Routing and Crew Scheduling Problem, à paraître dans *Computers and Operations Research*.

- MOORE, R., EVANS, J. et NOO, H. (1978). Computerized Tailored Blocking, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **18**, 343-361.
- NIKULAINEN, M. (1992). A Simple Mathematical Method to Define Demand for Schedule Planning, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **32**, 77-85.
- PHILLIPS, R.L. et BOYD, D.W. (1989). An Integrated Approach to Airline Fleet and Scheduling Planning, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **29**, 284-298.
- RAPPORT DU COMMISSAIRE AUX PLAINTES RELATIVES AU TRANSPORT AÉRIEN : JANVIER 2003 À JUIN 2003. [http ://www.cta-otc.gc.ca/index_f.html](http://www.cta-otc.gc.ca/index_f.html).
- RUSHMEIER, R.A. et KONTOGIORGIS, S.A. (1997). Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment, *Transportation Science*, **31**(3), 159-169.
- RYAN, D.M. (1992). The Solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Air Crew Rostering, *Journal of the Operational Research Society*, **43**(5), 459-467.
- SIMPSON, R.W. (1968). A Review of Scheduling and Routing Models for Airline Scheduling, *AGIFORS Symposium Proceedings*, **8**.
- SOUMIS, F., FERLAND, J. et ROUSSEAU, J.-M. (1980). A Large Scale Model for Airline Fleet Planning and Scheduling Problem, *Transportation Research*, **14B**, 191-201.
- SRIHARI, K. et MUTHUKRISHNAN, R. (1991). An Expert System Methodology for Aircraft-Gate Assignment, *Computers and Industrial Engineering*, **21**(1), 101-105.

SUBRAMANIAN, R., SCHEFF, R.P., QUILLINAN, J.D., WIPER, D.S. et MARSTEN, R.E. (1994). Coldstart : Fleet Assignment at Delta Air Lines, *Interfaces*, **24**(1), 104-120.

SUMI KANG, L. (2004). Degradable Airline Scheduling : An Approach to Improve Operational Robustness and Differentiate Service Quality, *Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology*.

TALLURI, K.T. (1996). Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment, *Transportation Science*, **30**(3).

TALLURI, K.T. (1998). The Four-Day Aircraft Maintenance Routing Problem, *Transportation Science*, **32**(1).

THENGVALL, B., BARD, J. et YU, G. (2000). Balancing User Preferences for Aircraft Schedule Recovery During Irregular Operations, *IIE Transactions*, **32**, 181-193.

THENGVALL, B., YU, G. et BARD, J. (2001). Multiple Fleet Aircraft Schedule Recovery Following Hub Closures, *Transportation Research, A* **35**, 289-308.

YAN, S. et TU, Y. (1997). Multi-Fleet Routing and Multi-Stop Flight Scheduling for Schedule Perturbation, *European Journal of Operations Research*, **103**, 155-169.