UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

RÉOPTIMISATION DES HORAIRES D'ÉQUIPAGES AÉRIENS SUR UN JOUR ET PLUS

RAPHAËLLE DION
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)
SEPTEMBRE 2000

© Raphaëlle Dion, 2000.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

0-612-60893-X

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

RÉOPTIMISATION DES HORAIRES D'ÉQUIPAGES
AÉRIENS SUR UN JOUR ET PLUS

présenté par : DION Raphaelle
en vue de l'obtention du diplôme : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. SMITH Benjamin, T., Ph.D., président
M. SOUMIS François, Ph.D., membre et directeur de recherche
M. CORDEAU Jean-François, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche, François Soumis, pour le soutien professionnel et financier qu'il m'a apporté pendant ma maîtrise.

Je veux aussi remercier Mirela Stojkovic pour tout son travail et son aide à la compréhension et la modélisation du problème.

Finalement, je veux remercier mes parents qui m'ont encouragée et aidée pendant toutes mes études.

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite le problème de gestion des équipages aériens durant la journée des opérations. Ce problème consiste à réparer les blocs mensuels des employés lorsqu'une perturbation rend l'horaire original non réalisable. L'objectif est de réaffecter les vols d'une certaine période afin d'en couvrir un maximum. L'horaire de chaque employé doit subir le moins de modification possible. Les horaires modifiés doivent respecter la réglementation gouvernementale et la convention collective de la compagnie aérienne. De plus, le problème doit être résolu en très peu de temps afin que la solution puisse être appliquée.

Dans ce mémoire, nous considérons uniquement les équipages à un seul membre (les pilotes). L'horaire des vols ainsi que les itinéraires des avions sont fixes. Les modifications aux horaires des pilotes ne peuvent se faire que sur une période de temps prédéfinie. Dans le modèle de base, au maximum un service de vol peut être modifié pour chaque pilote. Le modèle de base est un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec contraintes supplémentaires. Il est résolu avec la décomposition de Dantzig-Wolfe jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensemble et les sous-problèmes sont des plus courts chemins dans un réseau.

Un réseau est créé pour chaque pilote dont l'horaire peut être modifié. Le réseau de chaque pilote est séparé en trois parties : la partie initiale fixée, la partie opérationnelle et la partie finale fixée. La partie opérationnelle comprend tous les vols à réaffecter aux pilotes disponibles. Chaque nœud représente un vol et chaque arc représente une connexion possible entre deux vols. La plupart des contraintes sont prises en considération lors de la construction des réseaux. Les autres contraintes sont modélisées avec des ressources.

Par la suite, des améliorations sont apportées aux réseaux de base. Les modifications au modèle de base peuvent avoir trois objectifs : compléter le modèle, obtenir une solution qui ressemble plus au plan original et accélérer le temps de création des réseaux. Un réseau est créé pour les pilotes en réserve afin de pouvoir affecter des vols à ces pilotes. Les vols non affectés, c'est-à-dire les vols qui ne sont affectés à aucun pilote lors du jour des opérations, sont ajoutés aux réseaux. Une série de pénalités sont ajoutées afin d'améliorer la solution : des pénalités sur l'utilisation des pilotes en réserve, des pénalités sur les changements d'avion à l'intérieur du service de vol d'un pilote, des pénalités sur les vols qui ne faisaient pas partie de l'horaire original d'un pilote et des pénalités sur les débordements de la rotation prévue d'un pilote. Un nettoyage des réseaux consistant à ne pas créer les arcs inutiles pour chaque réseau est ajouté afin d'accélérer la génération des réseaux. Finalement, la période sur laquelle se fait la réorganisation des horaires des pilotes est allongée afin de couvrir un peu plus d'un service de vol (sans en couvrir deux au complet). Des arbres d'énumération sont créés dans les réseaux afin d'éviter de devoir recourir à des ressources supplémentaires.

Le modèle de base ainsi que les améliorations sont testées sur des problèmes de taille moyenne. Les résultats obtenus sont très satisfaisants : les temps de calcul son raisonnables et la qualité des solutions est bonne. Les améliorations apportées au modèle ont eu les effets attendus : le modèle est devenu très réaliste, la solution s'est améliorée avec chaque modification, le nettoyage des réseaux a accéléré leur création. Nous avons donc réussi à modéliser le problème de gestion des équipages aériens durant le jour des opérations et à obtenir une bonne solution en des temps très raisonnables.

ABSTRACT

This master's thesis treats the operational airline crew scheduling problem. The problem consists in repairing employees' monthly blocks when perturbations render these blocks infeasible. The goal is to cover a maximum number of flights over a given time period. Modifications to a crew member's schedule must be kept at a minimum. A modified crew member's schedule must respect government regulations and the airline company's collective agreement. The operations are underway therefore the problem must be solved in real-time.

We consider only covering of flights by a single crew member. This is the operational airline pilot scheduling problem. The flight schedule and the aircraft itineraries are fixed. Modifications to a pilot's schedule may only be made during a predetermined period. In the basic model, no more than one duty may be modified for each pilot. The problem is mathematically formulated as an integer nonlinear multi-commodity network flow model with additional constraints. The solution process uses a Dantzig-Wolfe decomposition combined with a branch-and-bound method. The master problem is a set partitioning type problem and the subproblems are shortest path problems in an acyclic network.

One network is built for each pilot whose schedule may be modified. Each network is divided into three parts : the fixed beginning part, the operational part and the fixed end part. All the flights in the operational part must be reassigned to the available pilots. Each node represents a flight and an arc exists between two nodes if a connection is possible between the two flights represented by the nodes. The network structure is such that it respects most constraints of the problem. The other constraints are modeled as resource variables.

Extensions to the basic model are then added. These extensions can serve three purposes : bring the basic model closer to reality, improve the solution by making it closer to the planned schedules and decrease network generation time. A network is created for the reserve pilots. Flights can then be assigned to the available reserve pilots. Flights that aren't assigned to any pilot are added to the networks. A few penalties are added to improve the solution : penalties for assigning flights to reserve pilots, penalties for aircraft changes inside a pilot's duty, penalties for assigning flights that were not a part of the pilot's original schedule, and penalties on draft premiums (assigning flights that either start before the pilot's trip or end after the pilot's trip). A process consisting in not creating useless arcs in each network cleans networks. This accelerates network generation. Finally, the reorganization of the schedules is done over a longer period. Rather than modifying schedules over a single duty, we now modify schedules over a little more than a duty (but not quite two duties). We build a tree in each network to enumerate possibilities of completion of one of the duties that is being modified. This method allows us to avoid adding resources to the networks.

The basic model as well as its improvements was tested on medium sized problems. The results were very satisfying : good solutions were obtained in little time. The improvements to the basic model proved quite useful : the improved model is close to reality, each modification succeeded in improving the solution and cleaning the networks effectively reduced network generation time. Therefore, we succeeded in formulating a model for the operational airline crew scheduling problem and obtaining a good solution to this problem in real-time.

TABLES DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... Erreur! Signet non défini.

RÉSUMÉ ..... Erreur! Signet non défini.

ABSTRACT ..... Erreur! Signet non défini.

TABLE DES MATIÈRES ..... Erreur! Signet non défini.

LISTE DES TABLEAUX ..... Erreur! Signet non défini.

LISTE DES FIGURES ..... Erreur! Signet non défini.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION ..... Erreur! Signet non défini.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE ..... Erreur! Signet non défini.

2.1 Problème de planification des horaires des équipages aériens 6
2.2 Problèmes de gestion des équipages durant la journée des opérations 10

CHAPITRE 3 : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ..... Erreur! Signet non défini.

3.1 Période opérationnelle 14
3.2 Objectifs et contraintes 16
3.3 Formulation mathématique 18
3.4 Méthode de résolution 20
3.4.1 Problème maître 20
3.4.2 Sous-problèmes 22
3.4.3 Séparation et évaluation 23

CHAPITRE 4 : MODÉLISATION DE BASE ..... Erreur! Signet non défini.

4.1 Nœuds 26
4.2 Arcs 27
4.2.1 Parties fixées 29
4.2.2 Partie opérationnelle 29
4.2.3 Partie initiale fixée vers les autres parties 30
4.2.4 Partie opérationnelle vers la partie finale fixée 33
4.3 Ressources 35
4.3.1 « Duty_leg » 35
4.3.2 « Duty_duration » 35
4.3.3 « Block_time » 36

4.3.4 « Credit_time » 37
4.3.5 « Trip_time » 38
4.4 Coûts 39

CHAPITRE 5 : EXTENSIONS DU MODÈLE ..... Erreur! Signet non défini.

5.1 Réserves anonymes 41
5.1.1 Modélisation pour les réserves 41
5.1.2 Pénalités sur les réserves 44
5.2 Vols non affectés 45
5.3 Un réseau par pilote 46
5.4 Pénalités sur les changements d'avion 47
5.5 Pénalités sur les vols non planifiés 48
5.6 Débordement au début de la rotation prévue 49
5.7 Débordement à la fin de la rotation prévue 50
5.8 Nettoyage du réseau 52
5.9 Période opérationnelle couvrant plus d'un SDV 53
5.9.1 Construction de l'arbre des SDV(j) 55
5.9.2 Construction de l'arbre des SDV(j+1) 56

CHAPITRE 6 : ÉTUDES NUMÉRIQUES ..... Erreur! Signet non défini.

6.1 Modèle de base 59
6.2 Ajout des pilotes en réserve 61
6.3 Ajout des vols non affectés 64
6.4 Un réseau par pilote 66
6.4.1 Pénalités sur les changements d'avion et sur les vols non planifiés 67
6.4.2 Pénalités de débordement de la rotation prévue 67
6.4.3 Nettoyage des réseaux 71
6.5 Période opérationnelle couvrant plus d'un SDV 73
6.6 Branchement heuristique 77
6.7 Conclusion 79

CHAPITRE 7 : CONCLUSION ..... Erreur! Signet non défini.

RÉFÉRENCES ..... Erreur! Signet non défini.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 6.1 : Caractéristiques des problèmes de base 59

Tableau 6.2 : Qualité des solutions aux problèmes de base 60

Tableau 6.3 : Résolution des problèmes de base 61

Tableau 6.4 : Caractéristiques des problèmes avec réserves 62

Tableau 6.5 : Qualité des solutions aux problèmes avec réserves 62

Tableau 6.6 : Résolution des problèmes avec réserves 63

Tableau 6.7 : Caractéristiques des problèmes avec vols non affectés 64

Tableau 6.8 : Qualité des solutions aux problèmes avec vols non affectés 65

Tableau 6.9 : Résolution des problèmes avec vols non affectés 66

Tableau 6.10 : Caractéristiques des problèmes à un réseau par pilote 68

Tableau 6.11 : Qualité des solutions aux problèmes à un réseau par pilote 69

Tableau 6.12 : Résolution des problèmes à un réseau par pilote 70

Tableau 6.13 : Résolution des problèmes nettoyés 72

Tableau 6.14 : Caractéristiques des problèmes couvrant plus d'un SDV 74

Tableau 6.15 : Qualité des solutions aux problèmes couvrant plus d'un SDV 75

Tableau 6.16 : Résolution des problèmes couvrant plus d'un SDV 76

Tableau 6.17 : Résolution des problèmes avec un branchement heuristique 78

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1 : Réseau type d'un pilote 25

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La rémunération des équipages constitue une grande partie des dépenses pour les compagnies aériennes. Une gestion efficace des équipages peut donc permettre à une compagnie aérienne de réaliser de grosses économies. Le problème de gestion des équipages aériens comporte deux phases : la phase de planification et la phase opérationnelle.Le problème de planification des horaires des membres d'équipage comporte aussi deux phases. La première phase consiste à construire des rotations couvrant l'ensemble des vols. Une rotation est composée de services de vol séparés les uns des autres par des périodes de repos et un service de vol est composé de vols séparés par des connexions. La deuxième phase consiste à construire le bloc mensuel de chaque employé. Un bloc mensuel est composé de rotations séparées par des périodes de repos, des congés, des périodes de formation, etc. Trois formules sont utilisées pour la création et l'affectation de blocs mensuels. La première formule est le *bidline*. Cette formule consiste à créer les blocs mensuels sans tenir compte des employés. Ensuite, les employés choisissent leur bloc mensuel. La priorité est donnée aux employés les plus anciens. La deuxième formule est le *rostering*. Ici, un bloc mensuel personnalisé est construit pour chaque employé en tenant compte des activités qui lui sont déjà affectées. La troisième formule est le *preferential bidding*. Cette formule consiste aussi à construire un bloc mensuel pour chaque employé tout en tenant compte des activités qui lui sont déjà affectées. Par contre, avec cette formule, on tient aussi compte des préférences et de l'ancienneté de chaque employé. Les préférences des employés les plus anciens ont priorité. La compagnie aérienne se trouve alors à maximiser la satisfaction de ses employés.

La phase opérationnelle correspond au problème de gestion des équipages aériens durant la journée des opérations. Nous traiterons de ce dernier problème dans ce mémoire. Lors de la journée des opérations, il se produit fréquemment des perturbations : un pilote absent, un vol en retard, etc. Certaines perturbations sont sans

importance, car les pilotes peuvent poursuivre leur rotation courante telle que prévue malgré ces perturbations. D'autres perturbations, par contre, brisent la rotation courante de certains pilotes, c'est-à-dire que ces pilotes ne sont plus en mesure de poursuivre leur rotation telle que prévue. Les vols qui étaient affectés à un de ces pilotes ne peuvent alors plus être couverts par le pilote en question. Le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations consiste à réaffecter un ensemble de vols aux pilotes de façon à ce que les rotations brisées soient réparées et qu'un maximum de vols soient couverts. De plus, le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations doit être résolu rapidement afin que la solution puisse être appliquée dans la réalité.

Le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations a une très grande importance pour les compagnies aériennes. En effet, les perturbations peuvent engendrer des coûts importants pour la compagnie ainsi qu'affecter le niveau de satisfaction du personnel. Une bonne gestion du personnel permet de minimiser ces coûts additionnels et de maintenir le taux de satisfaction du personnel à un niveau acceptable. Cependant, la plupart des travaux effectués jusqu'à maintenant portent sur la phase de planification des horaires des membres d'équipage. Une revue de littérature sur la planification des horaires des membres d'équipage ainsi qu'une revue de littérature exhaustive sur le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations sont présentées au chapitre 2.

Le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations est défini au chapitre 3. Nous présentons les objectifs et les contraintes du problème. Les objectifs sont de minimiser le nombre de vols non couverts et de minimiser les changements à l'horaire original de chaque pilote et ce, en temps réel. Les contraintes comprennent les contraintes de rotation et de service de vol, les contraintes de bloc et les contraintes opérationnelles. Nous définissons l'horizon sur lequel sera faite la réorganisation des horaires. Cet horizon couvrira au maximum un service de vol pour

chaque pilote. Par la suite, nous présentons la formulation mathématique du problème ainsi que la méthode de résolution utilisée. Le problème est formulé comme un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec contraintes supplémentaires. La résolution utilise la décomposition de Dantzig-Wolfe jumelée à une méthode de séparation et d'évaluation. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensemble et les sous-problèmes sont des plus courts chemins dans des réseaux. Nous utilisons une méthode de séparation et d'évaluation afin d'obtenir la solution optimale.

La modélisation de base des sous-problèmes est décrite au chapitre 4. Les réseaux sont séparés en trois parties : la partie initiale fixée, la partie opérationnelle et la partie finale fixée. La partie opérationnelle comprend tous les vols contenus dans l'horizon sur lequel se fait la réorganisation des horaires. Les nœuds représentent les vols. Les arcs correspondent à la possibilité de faire un vol après un autre. Différents types d'arcs représentent différents types de connexions entre deux vols (période de repos, période de coucher, connexion). Chaque problème de plus court chemin comprend cinq contraintes de ressources servant à modéliser des contraintes de bloc, de rotation et de service de vol. Les contraintes opérationnelles sont toutes respectées lors de la construction des réseaux. Les coûts sur les arcs comprennent les coûts réels pour la compagnie ainsi que des pénalités sur certains vols non couverts. Un réseau qui permet la couverture artificielle des vols de la partie opérationnelle est créé et comprend les pénalités sur la non-couverture des vols. Ce chapitre contribue à présenter un modèle simple de résolution du problème. Ce modèle tient compte des contraintes principales du problème.

Dans le chapitre 5, nous apportons des améliorations au modèle de base décrit au chapitre 4. Nous ajoutons la possibilité d'affecter des vols aux pilotes en réserve, c'est-à-dire aux pilotes auxquels aucun vol n'est affecté pendant l'horizon prédéfini. Nous ajoutons ensuite une pénalité sur l'utilisation de ces pilotes. Certains vols qui n'étaient

pas affectés à un pilote dans la solution planifiée n'étaient pas inclus dans le modèle de base. Nous ajoutons ces vols à la partie opérationnelle du réseau. Par la suite, en modifiant légèrement le réseau, nous ajoutons un certain nombre de pénalités à la fonction de coût sur les arcs : des pénalités sur les changements d'avion qui rendent la solution plus robuste, des pénalités sur les vols non planifiés qui permettent de reproduire autant que possible l'horaire original de chaque pilote et des pénalités sur les débordements de la rotation prévue. Les pénalités sur les débordements de la rotation prévue représentent des coûts réels pour la compagnie, mais permettent aussi de reproduire autant que possible l'horaire original. Nous avons finalement étiré l'horizon sur lequel se fait la réorganisation des horaires. Après cette modification, l'horizon peut couvrir un peu plus d'un service de vol sans en couvrir deux au complet. Nous évitons de recourir à des ressources supplémentaires en utilisant des arbres d'énumération. Ceci permet de couvrir plus de vols en donnant plus de jeu pour la réorganisation des horaires des pilotes. Toutes ces améliorations au modèle de base permettent d'obtenir un modèle très réaliste. Ce chapitre contribue à l'amélioration du modèle de base élaboré au chapitre 4. La construction d'un seul ensemble d'arcs pour chaque membre d'équipage permet l'ajustement de la fonction coût sur les arcs à chacun. Ainsi, plus d'éléments sont considérés dans le modèle résultant. De plus, dans ce chapitre, la généralisation à un horizon couvrant plus d'un service de vol contribue à l'obtention de meilleures solutions en permettant plus de possibilités de réorganisation des vols.

Dans le chapitre 6, nous présentons des résultats numériques sur des problèmes de taille moyenne. Les premiers résultats ont trait au modèle de base. Le problème est résolu à optimalité en très peu de temps. Les améliorations au modèle décrites au chapitre 5 sont testées une à une. Chacun des tests effectués montre l'utilité des modifications apportées au modèle : la solution se rapproche de l'horaire original, plus de vols sont couverts et les temps restent très acceptables. Nous avons donc un modèle réaliste pour le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations. Toutes les contraintes sont respectées et les objectifs sont atteints. La

contribution globale de ce mémoire consiste en la résolution de problèmes de gestion des équipages durant la journée des opérations de taille commerciale. Tous les facteurs pertinents sont pris en considération et le temps de résolution sont raisonnables rendant ainsi la solution applicable. Les généralisations développées dans ce mémoire améliore grandement la productivité et la qualité de la solution tout en conservant des temps de résolution acceptables.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Comme nous l'avons vu en introduction, la gestion des équipages aériens nécessite la résolution de plusieurs problèmes : la planification des rotations et des blocs mensuels et la gestion des équipages durant la journée des opérations.

Même si ce mémoire porte seulement sur le problème de gestion des équipages durant la journée des opérations, nous présentons les travaux sur l'ensemble des problèmes énumérés. Les travaux sur les problèmes de planification sont pertinents, car les formulations mathématiques ainsi que les méthodes de résolution pour ces trois problèmes présentent des similitudes. Les trois problèmes consistent à couvrir un ensemble de tâches avec des chemins réalisables. Dans le problème de planification des rotations, il faut couvrir des vols à l'aide de rotations. Dans le problème de planification des blocs mensuels, il s'agit de couvrir des rotations avec des blocs mensuels. Le problème de gestion des équipages durant la journée des opérations consiste à couvrir des vols à l'aide de blocs mensuels. Ces trois problèmes peuvent être résolus à l'aide de la génération de colonnes.

Ce chapitre est séparé en deux parties. La première partie contient une brève revue de littérature sur le problème de planification des horaires des équipages aériens. La deuxième partie contient une revue de littérature sur le problème de gestion des équipages durant la journée des opérations. Cette dernière est exhaustive puisqu'elle concerne le sujet de ce mémoire.

2.1 Problème de planification des horaires des équipages aériens

Le sujet de la planification des horaires des équipages aériens ayant beaucoup été traité dans les trente dernières années, énormément d'articles ont été écrits sur ce

problème. Dans cette partie, nous passons rapidement sur les articles publiés depuis plus de cinq ans pour nous concentrer sur les articles plus récents.

Les articles de Hoffman et Padberg [1] ainsi que Graves et al. [2] contiennent tous deux une revue de littérature sur les premières méthodes de résolution du problème de planification des horaires des équipages aériens.

Le premier article où est utilisée la génération de colonnes pour résoudre le problème est celui de Lavoie, Minoux et Odier [3]. Depuis, cette approche de résolution est largement utilisée pour le problème de planification des horaires des équipages aériens. Les articles suivants sont quelques-uns des plus récents.

Desaulniers et al. [4] présentent le problème de planification des horaires d'équipages aériens. Le problème est résolu séparément pour les pilotes et les autres membres d'équipage. Pour chacun, le problème est formulé comme un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec variables de ressources. La méthode de résolution utilise la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Le problème maître est de type partitionnement d'ensemble et les rotations sont générées à l'aide de sous-problèmes. Les sous-problèmes sont des problèmes de plus court chemin dans un réseau avec contraintes de ressources. Cette approche a été testée sur des problèmes de taille réelle d'Air France et des économies de 5% à 6% en moyenne ont été réalisées en des temps de calcul raisonnables.

Barnhart et al. [5] ainsi que Barnhart et Shenoi [6] proposent deux autres modèles pour résoudre le problème de planification des rotations. Dans les deux articles, la résolution du problème comprend une boucle servant à ajouter les vols de mise en place les plus utiles à l'ensemble des vols à couvrir. La relaxation linéaire d'un problème de partitionnemnt des vols actifs est résolue. L'ensemble des vols de mise en place pouvant servir à améliorer la solution de la relaxation linéaire est déterminé et

ajouté. Les itérations de la boucle se poursuivent pendant un certain temps prédéterminé ou jusqu'à ce que les améliorations apportées à la solution soient inférieures à un certain seuil. Par la suite, le problème de planification des rotations est résolu au complet à l'aide de la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Les différences entre les deux articles résident dans le choix du problème résolu à l'intérieur de la boucle. Dans Barnhart et al. [5], le problème résolu à l'intérieur de la boucle est celui du partitionnement des vols en rotations. Dans Barnhart et Shenoi [6], le problème résolu à l'intérieur de la boucle est celui du partitionnement des vols en services de vol. Cette deuxième méthode est plus rapide, car le problème de partitionnement des vols en services de vol est plus facile à résoudre. Les résultats obtenus démontrent une vitesse grandement accrue pour une solution presque aussi proche de la solution optimale.

Gamache et al. [7] décrivent une méthode de résolution du problème d'affectation des rotations aux membres d'équipage dans le domaine aérien (système de *rostering*). Le problème est modélisé comme un problème de partitionnement d'ensemble généralisé. Le modèle est résolu par la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Le modèle a été testé sur des problèmes réels d'Air France et des économies allant jusqu'à 7.6% ont été réalisées. Le branchement heuristique utilisé dans cette méthode a permis de réduire énormément le temps de résolution tout en conservant des solutions très proches de la solution optimale. La méthode a été implantée chez Air France, Suissair et Sabena.

Vance, Barnhart, Johnson et Nemhauser [8] proposent un nouveau modèle pour le problème de planification des horaires d'équipage. Dans leur modèle, le processus de décision est séparé en deux phases. Dans la première phase, des services de vol réalisables couvrant l'ensemble des vols sont construits. Ce problème est modélisé comme un problème de partitionnement de l'ensemble des vols à couvrir. Dans la deuxième phase, des rotations sont construites à partir des services de vol générés dans

la première phase. Le problème est modélisé comme un problème de partitionnement d'ensemble. Le modèle est résolu à l'aide de la décomposition de Dantzig-Wolfe. La relaxation linéaire de cette formulation donne de meilleures bornes inférieures, mais elle est plus difficile à résoudre.

Gamache et al. [9] présentent le problème d'affectation des rotations aux membres d'équipage selon le système de *preferential bidding*. Dans ce système, chaque employé choisit les activités qu'il aimerait avoir dans son horaire. Un score peut ainsi être attribué à chaque horaire possible pour un employé. Plus le score est élevé, meilleur est l'horaire pour l'employé. Ce système tient aussi compte de l'ancienneté des employés : la priorité est accordée aux employés les plus anciens. Un problème résiduel est résolu pour chaque employé en commençant par le plus ancien et en finissant par le plus jeune. Chaque problème résiduel k est modélisé comme un problème de partitionnement d'ensemble général. Le problème k est résolu pour l'employé k et tous les employés moins anciens que lui. Le problème consiste à maximiser le score de l'horaire de l'employé k tout en satisfaisant un ensemble de contraintes globales. Le problème est résolu par la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Afin d'accélérer le branchement, des plans de coupe sont utilisés. Cette méthode a été implantée dans de nombreuses compagnies dont Air Canada, TWA, Delta, Air Transat, Canadien régional et AWA.

Desaulniers et al. [10] étudient les problèmes de gestion des équipages aériens dans la phase de planification ainsi que dans la phase opérationnelle. Le problème de construction de rotations couvrant tous les vols, les problèmes d'affectation des rotations aux employés selon trois formules différentes (*bidline*, *rostering* et *preferential bidding*) et le problème de gestion des équipages durant la journée des opérations sont présentés. Une formulation mathématique générale pouvant s'appliquer à chacun de ces problèmes est présentée. Cette formulation est un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec contraintes supplémentaires. La méthode de résolution proposée

est la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensemble et les sous-problèmes sont des problèmes de plus court chemin dans un réseau avec variables de ressource. Plusieurs méthodes de branchement sont proposées et expliquées. Des résultats numériques démontrant l'efficacité de la formulation et de la méthode de résolution sont présentés. Notons que ces résultats proviennent de travaux présentés dans d'autres articles ([4], [7], [9] et [12]).

2.2 Problèmes de gestion des équipages durant la journée des opérations

Le développement de méthodes d'optimisation pour la gestion des équipages durant la journée des opérations a débuté récemment. Les articles sur ce problème sont encore rares et ont tous été résumés ici.

Wei, Yu et Song [11] parlent les premiers de la gestion des horaires des équipages durant la journée des opérations. Ils considèrent que la solution optimale ne peut pas se trouver en temps réel et qu'il est plus utile pour la compagnie aérienne d'obtenir plusieurs solutions acceptables. Le but est donc de trouver un certain nombre de solutions acceptables, mais pas forcément optimales, en peu de temps. Wei, Yu et Song proposent une méthode heuristique pour résoudre le problème. L'horaire des vols ainsi que l'itinéraire des avions sont fixés. Le problème est formulé comme un problème de multi-flots en nombres entiers. Chaque commodité représente un équipage complet. L'objectif est de couvrir un maximum de vols tout en minimisant le nombre total de rotations modifiées. Un algorithme de recherche heuristique est utilisé pour explorer l'arbre de recherche contenant les solutions possibles. À chaque nœud de l'arbre une solution est générée pour tous les équipages, mais les vols ne sont pas forcément tous couverts. Cette solution est trouvée à l'aide d'un plus court chemin dans un réseau. La réalisabilité de chaque rotation est vérifiée une fois la rotation générée. Si

une rotation s'avère non-réalisable, la branche de l'arbre est coupée. Plusieurs solutions sont obtenues en parcourant partiellement l'arbre de recherche. L'algorithme produit des solutions réalisables en très peu de temps pour de petits problèmes.

El Moudani et al. [15] ainsi que El Moudani et Mora-Camino [16] présentent une méthode heuristique pour résoudre le problème de la gestion des équipages durant la journée des opérations. Lors d'une perturbation, de nouvelles rotations sont créées en minimisant le nombre de vols de mise en place. Des poids sont attribués aux rotations selon des règles qualitatives plutôt que quantitatives. Les rotations sont ensuite affectées au pilote à l'aide d'une approche de programmation dynamique. La réorganisation des horaires se fait sur plusieurs jours. Cette méthode donne une solution satisfaisante, mais pas forcément optimale, en des temps raisonnables pour de petits problèmes (24 pilotes et 100 rotations).

Stojkovic, Soumis et Desrosiers [12] traitent pour la première fois le problème de la gestion des équipages pendant la journée des opérations avec une méthode d'optimisation. D'après leur définition, le problème se pose lorsque des perturbations à l'horaire original empêchent certains membres d'équipage de poursuivre leur horaire tel que planifié. Le problème consiste alors à modifier les horaires des membres du personnel de façon à ce que tous les vols compris dans un horizon prédéfini soient couverts et ce à coût minimal. Les horaires des vols et les itinéraires des avions sont fixés. Le problème est formulé comme un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec variables de ressource. La résolution utilise la génération de colonnes accompagnée d'une technique de séparation et d'évaluation. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensemble et les sous-problèmes sont des plus courts chemins dans un réseau avec ressources. De bons résultats ont été obtenus en peu de temps sur les problèmes tests.

Stojkovic et Soumis [13] proposent une approche de résolution du problème où les services de vol planifiés pour un groupe de pilotes et les horaires des vols sont modifiés tout en maintenant l'itinéraire prédéfini des avions. Le problème est formulé comme un problème de réseau multi-commodités à coût minimum et en nombres entiers avec fenêtres de temps et contraintes supplémentaires. Ces contraintes comprennent des contraintes de couverture des vols ainsi que des contraintes de préséance des vols. Ces dernières sont introduites ici pour la première fois. La méthode de résolution est une décomposition de Dantzig-Wolfe accompagnée d'une technique de séparation et d'évaluation permettant d'obtenir une solution entière. De bonnes solutions sur des problèmes de taille réelle ont été obtenues en peu de temps.

Stojkovic et Soumis [14] généralisent l'article précédent en considérant plusieurs membres d'équipage par vol. Cette généralisation est nécessaire pour traiter les problèmes d'agents de bord. Le problème est aussi formulé comme un problème de flot multi-commodités à coût minimal avec des fenêtres de temps et des contraintes supplémentaires. Les contraintes supplémentaires comprennent des contraintes de même heure de départ en plus des contraintes de couverture des vols et des contraintes de préséance des vols. L'approche de résolution est basée sur la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation. Une nouvelle méthode de branchement a été créée afin de résoudre efficacement le problème. Le branchement se fait sur les variables de flot correspondant aux membres d'équipage artificiels. Si toutes ces variables sont entières, mais que la solution n'est pas entière, le branchement se poursuit sur les variables de temps. Encore une fois, si toutes les variables précédentes sont entières, mais la solution ne l'est pas, le branchement se poursuit sur les variables de flot associées aux membres d'équipage réels. Lorsque les horaires des vols sont fixés, des problèmes de taille commerciale sont résolus en très peu de temps. Lorsque les horaires des vols sont variables, des solutions de meilleure qualité sont obtenues sur ces mêmes problèmes de taille commerciale dans des temps raisonnables.

CHAPITRE 3 : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE

Les compagnies aériennes prévoient les horaires des pilotes longtemps à l'avance. Cependant, le jour-même des opérations, il y aura fréquemment un certain nombre de perturbations à l'horaire. Ces perturbations peuvent être le retard ou l'annulation d'un vol, l'absence d'un pilote, un vol ajouté, un changement de l'avion affecté à un vol, etc. Les vols ainsi perturbés appartiennent chacun à l'horaire d'un pilote. Certains des horaires perturbés peuvent alors devenir non réalisables. À ce moment, nous devons réorganiser les horaires d'un groupe de pilotes afin que les horaires de tous les pilotes soient réalisables. Ceci s'appelle un problème de gestion des horaires d'équipages aériens à un seul membre (les pilotes) durant un jour d'opérations.

Lors de la journée des opérations, les perturbations vont affecter des vols et les horaires de certains pilotes. Un vol affecté par une perturbation peut briser la rotation du pilote auquel il était affecté, c'est-à-dire que le pilote ne pourra pas effectuer les vols prévus à la suite du vol affecté. Une rotation brisée est une rotation déjà commencée qui ne peut plus être effectuée telle que planifiée par le pilote prévu à cause d'une perturbation. Par exemple, si un vol est en retard, il pourrait arriver à l'aéroport après le départ du vol suivant tel que prévu à l'horaire. Dans ce cas, le pilote qui devait faire ces deux vols ne pourra en faire qu'un seul des deux. Un vol perturbé qui brise la rotation du pilote auquel il était affecté s'appelle vol critique et la perturbation en question s'appelle perturbation critique.

Lorsqu'il y a des vols critiques, il faut réorganiser les horaires d'un ensemble de pilotes afin qu'un maximum de vols de la période considérée soient couverts.

L'ensemble de pilotes dont les horaires sont réorganisés comprend bien sûr tous les pilotes ayant une rotation brisée à leur horaire. Cependant, afin de couvrir un maximum de vols, il faut ajouter un certain nombre de pilotes dont l'horaire n'est pas

affecté par les perturbations. Les pilotes choisis seront disponibles au bon endroit au moment d'une perturbation ou alors il sera possible de modifier leur service de vol planifié afin de pallier à une perturbation.

3.1 Période opérationnelle

Nous pourrions réorganiser l'horaire des pilotes sur tout le bloc mensuel, mais il n'est pas souhaitable de traiter un si gros problème, car nous avons besoin d'obtenir une solution rapidement. De plus, comme tout changement à l'horaire original peut engendrer des coûts additionnels et réduire le taux de satisfaction des pilotes, nous voulons aussi limiter les changements aux horaires originaux. Nous allons donc modifier les blocs mensuels sur un horizon assez court. Cet horizon s'appelle la période opérationnelle et est défini pour chaque pilote.

Les conditions initiale et finale de la période opérationnelle de chaque pilote sont déterminées en fonction des activités prévues à l'horaire du pilote en question, des perturbations considérées et du temps restant avant le début des perturbations. La condition initiale d'un pilote comprend l'heure de début de la période opérationnelle du pilote, l'aéroport initial et le statut initial du pilote. Le statut initial d'un pilote représente l'activité prévue à l'horaire du pilote au début de sa période opérationnelle. De même, la condition finale comprend l'heure de fin de la période opérationnelle, l'aéroport final et le statut final du pilote.

Pour déterminer la condition initiale d'un pilote, nous examinons l'activité prévue à son horaire au début de la période opérationnelle générale. Plusieurs possibilités se présentent.

Si le pilote est en période de repos (*rest*) peu de temps avant les perturbations, son statut initial est « Début de rotation » s'il a déjà effectué au moins une rotation du

bloc mensuel présent et, si aucune rotation du bloc mensuel n'a encore été effectuée, son statut initiale sera « Début de bloc mensuel ». Dans les deux cas, le début de la période opérationnelle est déterminé en tenant compte de la période de repos minimale entre deux rotations. L'aéroport initial du pilote est sa base puisque toute rotation commence et se termine à la base du pilote. La condition initiale comporte ici un autre élément : la position initiale. Le pilote peut s'être présenté à l'aéroport au début de la période opérationnelle ou non. Si le pilote est déjà arrivé à l'aéroport au début de la période opérationnelle, sa rotation (et son service de vol) est déjà commencée. Sinon, la rotation (et le service de vol) n'est pas encore commencée.

Si le pilote est en période de coucher (*layover*) peu de temps avant les perturbations, son statut initial est « Début de SDV » (SDV = service de vol). Le début de la période opérationnelle est déterminé tout en respectant le temps de coucher minimal entre deux services de vol. L'aéroport initial est l'aéroport où le pilote a effectué son coucher. Dans ce cas-ci, la position initiale du pilote sera déterminée de la même façon que pour le cas précédent.

Si le pilote est en période de connexion entre deux vols, son statut initial est « Suite de SDV ». Le début de la période opérationnelle du pilote correspond à l'heure d'arrivée du premier vol. L'aéroport initial est celui où se fait la connexion. Dans ce cas, la position initiale n'est pas utilisée puisque le pilote est déjà à l'aéroport.

Pour déterminer la condition finale d'un pilote, nous examinons les activités prévues à son horaire après les perturbations. Plusieurs possibilités se présentent.

Si le pilote est en repos après les perturbations, son statut final est « Fin de rotation ». La fin de la période opérationnelle est déterminée en tenant compte du repos minimal entre deux rotations et l'aéroport final est la base du pilote.

Si le pilote est en période de coucher après les perturbations, son statut final est « Fin de SDV ». La fin de la période opérationnelle est déterminée en respectant la durée de coucher minimale entre deux services de vol. L'aéroport final est celui où le pilote a son coucher.

Si le pilote est en période de connexion entre deux vols, son statut final est « Suite de SDV ». La fin de la période opérationnelle correspond à l'heure de départ du deuxième vol et l'aéroport final est celui d'où part le deuxième vol.

Si un vol fait partie de la période opérationnelle d'un pilote, c'est un vol opérationnel. Un service de vol est opérationnel s'il chevauche la période opérationnelle du pilote à qui il était affecté ou encore s'il est entièrement compris dans la période opérationnelle de ce pilote. Une rotation est opérationnelle si elle remplit les mêmes conditions que le service de vol opérationnel. Il y a donc au maximum un service de vol opérationnel et une rotation opérationnelle pour chaque pilote.

3.2 Objectifs et contraintes

Lors de la réorganisation des horaires, plusieurs objectifs sont considérés. Les nouveaux horaires doivent couvrir un maximum des vols qui étaient prévus pour la période où se situent les perturbations. L'ensemble des horaires devrait aussi avoir un coût minimal. Le coût peut inclure les salaires et des pénalités pour les modifications des horaires planifiés. Ceci entraîne qu'un minimum d'horaires de pilotes soient modifiés; qu'un minimum de segments de vol soient affectés à des pilotes autres que ceux prévus dans les horaires originaux; qu'un maximum de pilotes puissent reprendre leurs activités prévues à l'horaire après la période où se situent les perturbations; qu'un minimum de pilotes dits en réserve soient appelés à faire des vols. Les quatre critères précédents déterminent la qualité de la solution.

Finalement, le temps de résolution du problème doit être relativement court. En effet, comme les perturbations ont lieu la journée-même des opérations, il faut obtenir une solution assez rapidement pour pouvoir la mettre en application avant la période où se situent les perturbations.

Lors de la réorganisation des horaires, nous devons nous assurer que les nouveaux horaires sont réalisables. L'horaire de chaque pilote doit respecter un certain nombre de contraintes qui sont définies dans la convention collective de la compagnie aérienne et les réglementations gouvernementales. De plus, chaque horaire doit respecter les règles de logique élémentaire (par exemple, un vol ne peut pas être affecté à un pilote si ce dernier n'est pas à l'aéroport de départ de ce vol).

Lors d'une connexion entre deux segments de vols, les aéroports d'arrivée et de départ doivent évidemment être les mêmes ou être co-terminaux. Deux aéroports sont co-terminaux lorsqu'ils desservent la même ville. Le temps de connexion ne doit pas dépasser le temps maximal de connexion ni être inférieur au temps minimal de connexion. Ce dernier peut varier en fonction de certains critères : si les aéroports sont co-terminaux, le temps minimal de connexion devra comprendre le temps de transport entre les deux aéroports; si les avions affectés aux deux segments de vol sont différents, le temps minimal de connexion devra être assez long pour permettre au pilote de changer d'avion.

Tout nouveau service de vol doit respecter les contraintes associées aux services de vol. Le nombre de vols dans le service de vol ne doit pas dépasser le maximum défini dans la convention collective. La durée du nouveau service de vol d'un pilote doit être inférieure à la durée maximale d'un service de vol pour ce pilote. Les *report time* (temps de préparation avant un service de vol) et *release time* (temps de relâche après un service de vol) au début et à la fin d'un service de vol doivent être respectés ainsi que la durée minimale du coucher entre deux services de vol.

Les nouvelles rotations et les nouveaux blocs mensuels ont aussi des contraintes à respecter. Le nombre de crédits dans un bloc mensuel ne doit pas excéder le maximum défini dans la convention collective. La durée du repos entre deux rotations ne doit pas être inferieure à la durée minimale d'un repos tel que décrit dans la convention collective.

Si une rotation ou un service de vol commence avec un segment de vol de nuit, la durée du repos (pour une rotation) ou du coucher (pour un service de vol) précédant la rotation ou le service de vol ne doit pas être inférieure à la durée minimale du repos ou coucher de nuit. De plus, un pilote ne doit pas travailler plus d'un certain nombre d'heures durant sept jours consécutifs, ce nombre étant défini dans la convention collective.

3.3 Formulation mathématique

Nous avons modélisé le problème de gestion des horaires des pilotes durant la journée des opérations comme un problème de multiflots non-linéaire, en nombres entiers avec contraintes supplémentaires. La formulation mathématique est la suivante.

Soit F l'ensemble de toutes les tâches f à couvrir et K l'ensemble des commodités k. Dans ce modèle, à chaque vol actif correspond une seule et unique tâche et à chaque pilote correspond une commodité distincte. À chaque pilote k est associé un graphe $G^k = (V^k, A^k)$ où V^k est l'ensemble de noeuds et A^k est l'ensemble d'arcs. Dans ce graphe, chaque chemin représente un horaire possible pour le pilote en question. Chaque graphe G^k utilise un ensemble de ressources R indexé par r. Une borne inférieure a_r ainsi qu'une borne supérieure b_r sont définies pour chaque ressource r. Pour chaque arc $(i,j) \in A^k$ sont définis un coût c_{ij}^k, une consommation de chaque ressource

t_{ij}^{kr} et, pour chaque tâche f, une constante binaire a_{ij}^{kf} indiquant si l'arc (i,j) couvre cette tâche ou non. De plus, un coût c_f de non-couverture est associé à chaque tâche f. Le graphe sera décrit plus en détail au chapitre 4.

Finalement, soient X_{ij}^k, k ∈ K, (i,j) ∈ A^k, une variable de flot binaire qui prend la valeur 1 si l'arc (i,j) fait partie de la solution et 0 sinon; Y_f, f ∈ F, une variable artificielle permettant la non couverture d'une tâche f; T_i^{kr}, r ∈ R, k ∈ K, i ∈ V^k, une variable de ressource. Le modèle s'énonce ainsi :

$$\text{Minimiser} \sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A^k} c_{ij}^k X_{ij}^k + \sum_{f\in F} c_f Y_f \tag{3.1}$$

Soumis à

$$\sum_{k\in K}\sum_{(i,j)\in A^k} a_{ij}^{fk} X_{ij}^k + Y_f = 1\ ,\quad \forall\, f\in F \tag{3.2}$$

$$\sum_{j:(o(k),j)\in A^k} X_{o(k),j}^k = \sum_{j:(j,d(k))\in A^k} X_{j,d(k)}^k = 1,\quad \forall\, k\in K \tag{3.3}$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A^k} X_{ij}^k - \sum_{j:(j,i)\in A^k} X_{ji}^k = 0,\quad \forall\, k\in K, \forall\, i\in V^k \tag{3.4}$$

$$X_{ij}^k(T_i^{kr} + t_{ij}^{kr} - T_j^{kr}) \le 0,\quad \forall\, r\in R^k, \forall\, (i,j)\in A^k, \forall\, k\in K \tag{3.5}$$

$$a_r \le T_i^{kr} \le b_r,\quad \forall\, r\in R^k, \forall\, i\in V^k, \forall\, k\in K \tag{3.6}$$

$$X_{ij}^k,\quad \forall\, k\in K, \forall\, (i,j)\in A^k \tag{3.7}$$

$$Y_f \text{ binaires},\quad \forall\, f\in F \tag{3.8}$$

La fonction coût (3.1) minimise la somme des coûts sur les arcs ainsi que la somme des coûts de non-couverture des vols. Les contraintes de couverture des vols (3.2) permettent la non-couverture de vols à l'aide de variables artificielles afin qu'une solution du problème puisse toujours exister. Les équations (3.3) servent à assurer qu'un seul nouvel horaire sera affecté à chaque pilote. Les contraintes (3.4) sont les

contraintes de conservation de flot dans un réseau. Les contraintes non-linéaires (3.5) sont les contraintes de compatibilité entre les variables de flot et les variables de ressources. Les contraintes (3.7) et (3.8) sont les contraintes d'intégralité des variables de flot et des variables artificielles. Les inéquations (3.6) sont les fenêtres sur les variables de ressources.

3.4 Méthode de résolution

La formulation mathématique (3.1)-(3.8) est composée d'une structure diagonale par blocs (3.3)-(3.7) séparable par pilote, d'une fonction coût aussi séparable par pilote et d'une série de contraintes liantes, i.e. les contraintes de couverture des vols (3.2). Nous pouvons donc résoudre le problème (formulation (3.1) à (3.8)) par la génération de colonnes. Nous obtenons un problème maître et un sous-problème pour chaque pilote k. Le problème maître est composé des relations (3.1), (3.2) et (3.8) tandis que les sous-problèmes sont définis par les contraintes (3.3) à (3.7). Une méthode de séparation et d'évaluation est utilisée afin d'obtenir une solution entière.

3.4.1 Problème maître

Soit maintenant Ω^k l'ensemble des chemins (entre la source et le puits) réalisables p dans le graphe G^k; x^k_{ijp} une constante binaire égale à 1 si le chemin p pour le pilote k contient l'arc $(i,j) \in A^k$; θ^k_p, $p \in \Omega^k$, $k \in K$, une variable binaire prenant la valeur 1 si le chemin p pour le pilote k fait partie de la solution et 0 sinon. Nous posons le changement de variables suivant :

$$X^k_{ij} = \sum_{p \in \Omega^k} x^k_{ijp} \theta^k_p, \quad \forall (i,j) \in A^k, \forall k \in K. \tag{3.9}$$

Le coût c_p^k, $p \in \Omega^k$, $k \in K$, et la constante binaire a_p^{fk} sont calculés de la même façon avec les équations suivantes :

$$c_p^k = \sum_{(i,j)\in A^k} x_{ijp}^k c_{ij}^k, \quad \forall k \in K, \forall p \in \Omega^k, \tag{3.10}$$

$$a_p^{fk} = \sum_{(i,j)\in A^k} x_{ijp}^k a_{ij}^{fk}, \quad \forall k \in K, \forall p \in \Omega^k, \forall f \in F. \tag{3.11}$$

En effectuant la substitution et en manipulant les équations, on obtient un problème maître qui consiste en un problème de partitionnement d'ensemble. Le problème maître contient deux types de variables : des variables de chemin (θ_p^k), et des variables artificielles.

$$\text{Minimiser} \sum_{k\in K} \sum_{p\in\Omega^k} c_p^k \theta_p^k + \sum_{f\in F} c_f Y_f \tag{3.11}$$

Soumis à

$$\sum_{k\in K} \sum_{p\in\Omega^k} a_p^{fk} \theta_p^k + Y_f = 1, \quad \forall f \in F, \tag{3.12}$$

$$\sum_{p\in\Omega^k} \theta_p^k = 1, \quad \forall k \in K, \tag{3.13}$$

$$\theta_p^k \text{ binaire } \forall k \in K, \quad \forall p \in \Omega^k, \tag{3.14}$$

$$Y_f \text{ binaire}, \quad \forall f \in F. \tag{3.15}$$

La relaxation linéaire du problème maître est obtenue en éliminant les contraintes (3.14) et (3.15). Le problème maître est résolu par une méthode de programmmation linéaire où Ω^k comprend uniquement les chemins p générés par la résolution des sous-problèmes.

3.4.2 Sous-problèmes

Soit X^k une solution pour le pilote k et $c^k(X^k)$ le coût de cette solution. Soit α_f, $f \in F$, la variable duale correspondant à la contrainte (3.12) du problème maître et β^k, $k \in K$, la variable duale associée à la contrainte (3.13) du problème maître. Le coût réduit d'un chemin dans le graphe du sous-problème est obtenu en utilisant les variables duales.

$$\text{Minimiser } c^k(X^k) - \sum_{(i,j)\in A^k} X_{ij}^k \left(\sum_{f\in F} a_p^{fk}\alpha_f\right) - \beta^k \tag{3.16}$$

Soumis à

$$\sum_{j:(o(k),j)\in A^k} X_{o(k),j}^k = \sum_{j:(j,d(k))\in A^k} X_{j,d(k)}^k = 1, \quad \forall\, k \in K, \tag{3.17}$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A^k} X_{ij}^k - \sum_{j:(j,i)\in A^k} X_{ji}^k = 0, \quad \forall\, k \in K, \forall\, (i,j) \in A^k, \tag{3.18}$$

$$X_{ij}^k (T_i^{kr} + t_{ij}^{kr} - T_j^{kr}) \le 0, \quad \forall\, r \in R^k, \forall\, (i,j) \in A^k, \forall\, k \in K, \tag{3.19}$$

$$a_r \le T_i^{kr} \le b_r, \quad \forall\, r \in R^k, \tag{3.20}$$

$$X_{ij}^k \text{ binaire}, \quad \forall\, k \in K. \tag{3.21}$$

Le sous-problème k, tel que défini par (3.16) à (3.21), est un plus court chemin avec fenêtres de ressources et coûts linéaires sur les variables de flot. Le coût d'un chemin dans le graphe est calculé en fonction des arcs inclus dans ce chemin. Un algorithme de programmation dynamique pour des réseaux acycliques est utilisé. En effet, comme les horaires de vols sont fixés, le graphe G^k ne peut pas contenir de cycle. Un certain nombre de chemins à coût réduit négatif sont trouvés dans chaque graphe G^k. Ceux-ci sont ajoutés à Ω^k et une nouvelle solution au problème maître est calculée.

D'autres chemins à coût réduit négatif sont alors identifiés et ainsi de suite jusqu'à ce que tous les chemins aient des coûts réduits positifs. La solution optimale de la relaxation linéaire du problème est alors obtenue. Si cette solution n'est pas entière, nous devons faire appel à une technique de séparation et d'évaluation.

3.4.3 Séparation et évaluation

Une technique de séparation et d'évaluation est utilisée pour obtenir une solution entière du problème. Un arbre binaire de séparation et d'évaluation est créé. À la racine correspond la relaxation linéaire du problème maître ((3.11) à (3.13)). D'autres nœuds sont créés lorsqu'on ajoute des décisions au problème maître et aux sous-problèmes.

La méthode de branchement choisie est *itfix-one*. Cette méthode est optimale et consiste à fixer des variables inter-tâches. Il s'agit donc d'imposer ou d'interdire l'exécution consécutive de deux tâches. Lorsqu'une solution fractionnaire est identifiée, des scores entre 0.0 et 1.0 sont attribués aux variables inter-tâches fractionnaires. Le score d'une variable correspond au flot sur cette variable. La variable ayant le score le plus élevé est choisie pour le branchement : la valeur de la variable est fixée à 1 sur une branche et 0 sur l'autre. L'arbre est exploré selon l'ordre d'exploration « meilleur d'abord » : le nœud de branchement dont la borne inférieure est la meilleure est exploré en premier. En cas d'égalité, l'ordre d'exploration est « profondeur d'abord ». Nous avons choisi ce branchement afin d'être en mesure de trouver la solution optimale au problème.

CHAPITRE 4 : MODÉLISATION DE BASE

Le réseau d'un pilote est composé de trois parties : la partie initiale fixée, la partie opérationnelle et la partie finale fixée (voir Figure 4.1). La partie initiale fixée comprend tous les vols depuis le début de la période planifiée jusqu'au début de la période opérationnelle. Ce sont les vols qui auront été effectués par le pilote avant le début de la période opérationnelle. Tout chemin généré dans ce réseau comprend les vols de la partie initiale fixée. La partie opérationnelle contient tous les vols des périodes opérationnelles des pilotes sélectionnés ainsi que les vols ajoutés et est partagée par tous les réseaux. Ces derniers sont les vols qui doivent autant que possible être couverts par les pilotes sélectionnés. La partie finale fixée contient les vols prévus à l'horaire du pilote après la période opérationnelle. Tous ces vols font partie de la rotation opérationnelle et peuvent soit faire partie d'un service de vol suivant le service de vol opérationnel soit être à la fin du service de vol opérationnel. Nous préférons que le pilote soit en mesure de reprendre son horaire original dès la fin de la période opérationnelle, c'est-à-dire qu'il puisse effectuer les vols de la partie finale fixée une fois sa période opérationnelle terminée. Ces vols pourront cependant ne pas faire partie du nouvel horaire du pilote si les modifications apportées à son horaire pendant la période opérationnelle ne le lui permettent pas.

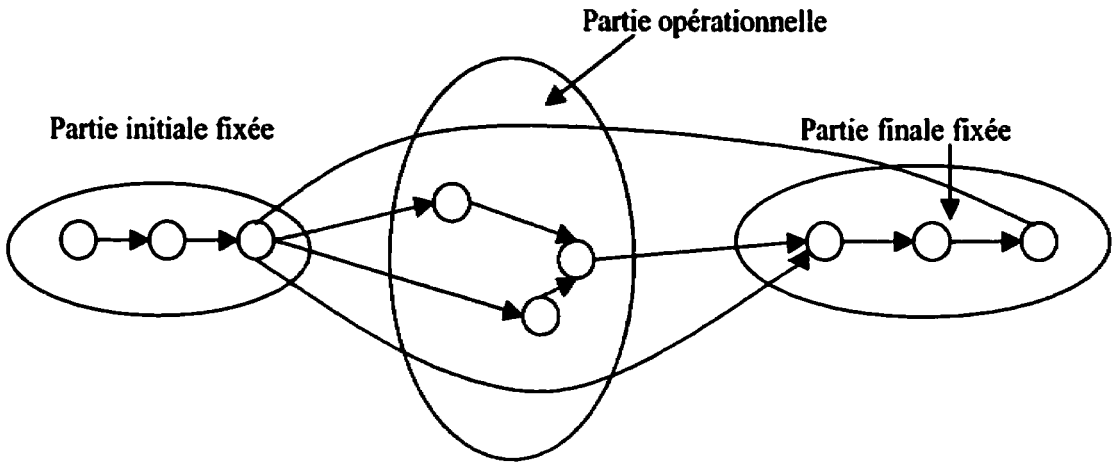

Figure 4.1 : Réseau type d'un pilote

Chaque horaire réalisable pour un pilote doit respecter un certain nombre de contraintes : les durées maximale et minimale de connexion entre deux segments de vol; les temps de *report* et *release*, ces temps-ci étant plus courts pour un vol de mise en place que pour un vol actif (pour cette compagnie); les durées minimales de repos et de coucher; le repos de nuit minimal; le nombre maximal de vols dans un service de vol; la durée maximale d'un service de vol; le nombre maximal de crédits dans un bloc mensuel et le nombre maximal d'heures de travail pendant sept jours consécutifs. Le respect de certaines contraintes découle de la construction du réseau. Les durées minimales de repos et de coucher sont imposées lors de la définition des périodes opérationnelles. Les durées maximale et minimale de connexion entre deux segments de vol, les temps de *report* et *release* et le repos de nuit minimal sont respectés lors de la création des arcs du réseau. Les autres contraintes qui ne peuvent pas être imposées par la construction du réseau sont modélisées à l'aide de ressources.

4.1 Nœuds

Chaque réseau contient une source et un puits. Tout vol précédant la période opérationnelle est représenté par un noeud de la partie initiale fixée. De même, chaque vol commençant après la période opérationnelle est représenté par un nœud de la partie finale fixée.

Pour chaque vol actif de la période opérationnelle, nous créons deux nœuds dans la partie opérationnelle du réseau : un nœud de type actif que nous voulons couvrir exactement une fois si possible et un nœud de type mise en place qui peut être couvert autant de fois que nécessaire. Le nœud de mise en place correspond au vol de mise en place ayant le même numéro que le vol actif, c'est-à-dire que le pilote dont le nouvel horaire contient un nœud de mise en place est seulement passager à bord du vol actif correspondant et donc ce vol en est un de mise en place pour ce pilote. Les vols de mise en place ayant des *report* et *release time* différents des vols actifs, un nœud de mise en place doit être créé pour chaque vol actif. De plus, pour chaque vol actif de la période opérationnelle, on crée une contrainte de couverture du vol. Le nœud de type actif correspondant à ce vol contribue une unité à la contrainte du vol en question.

Pour chaque vol de mise en place de la période opérationnelle, seul le nœud de type mise en place est créé dans la partie opérationnelle. Nous créons les nœuds correspondant aux vols de mise en place afin d'être en mesure de reproduire l'horaire original de chaque pilote. En effet, si un pilote a un vol de mise en place prévu dans son horaire original et que nous ne créons pas le nœud correspondant à ce vol, nous lui enlevons la possibilité de faire ce vol dans son nouvel horaire. Il sera donc impossible de reproduire l'horaire original du pilote. Lorsqu'un chemin passera par un nœud de type mise en place, cela signifiera que le pilote est simplement passager à bord du vol

correspondant au nœud. Nous appelons les nœuds de la partie opérationnelle des nœuds opérationnels.

4.2 Arcs

Plusieurs types d'arcs relient les nœuds de chaque réseau entre eux. Le type d'arc dépend de la relation entre les deux nœuds qu'il lie.

Si un des deux nœuds est la source, l'arc est de type *beginline*. Nous distinguons deux cas : le pilote s'est déjà présenté à l'aéroport pour commencer son service de vol planifié (le premier de sa rotation et de son bloc mensuel dans ce cas) et le cas où le pilote n'est pas encore arrivé à l'aéroport. Dans les deux cas, une condition d'existence d'un arc entre la source et un nœud est que l'aéroport de départ du vol correspondant au deuxième nœud soit la base du pilote. Si le pilote est déjà à l'aéroport, la durée entre l'heure à laquelle il s'est présenté à l'aéroport et l'heure de départ du vol en question ne doit pas dépasser le temps d'attente maximal tel que défini par la convention collective. Si le pilote n'est pas encore à l'aéroport, la durée entre le début de la période opérationnelle et l'heure de départ du vol ne doit pas être inférieure au *report time* requis pour ce vol.

Si un des deux nœuds est le puits, l'arc est de type *endline*. Il n'existe aucune condition générale d'existence pour un arc de type *endline*.

Sinon, les deux nœuds représentent des vols. Si les deux vols font partie de rotations différentes, l'arc est de type *rest*. Nous distinguons ici aussi deux cas : le pilote s'est déjà présenté à l'aéroport pour commencer son service de vol planifié (le premier de sa rotation) et le cas où le pilote n'est pas encore arrivé à l'aéroport. Les deux cas sont traités de la même façon que pour un arc de type *beginline*. Dans les deux cas, une

condition d'existence d'un arc entre les deux nœuds est que l'aéroport de départ du vol correspondant au deuxième nœud soit la base du pilote.

Si les deux vols font partie de la même rotation, mais qu'ils sont dans deux services de vol différents, l'arc est de type *layover*. Nous distinguons également les deux cas : soit le pilote est déjà à l'aéroport et son service de vol est déjà commencé, soit il n'est pas encore arrivé à l'aéroport. Les deux cas sont traités de la même façon que pour les arcs de type *beginline* et *rest*. Dans les deux cas, un arc existe entre deux nœuds si l'aéroport de départ du deuxième vol est le même que celui d'arrivée du premier vol ou si ces deux aéroports sont des co-terminaux.

Finalement, si les deux vols sont dans le même service de vol, l'arc est de type *connection*. Cet arc existe si une connexion est possible entre les deux vols correspondant aux nœuds. Une connexion entre deux vols peut avoir lieu si l'aéroport d'arrivée du premier vol est le même ou est un co-terminal de l'aéroport de départ du deuxième vol et si le temps de connexion entre les deux vols n'est ni inférieur au temps minimal de connexion ni supérieur au temps maximal de connexion. La période minimale entre l'arrivée du premier vol et l'heure de départ du deuxième vol dépend des avions auxquels sont affectés ces vols : si les deux vols sont affectés au même avion, la période de transition entre eux est de plus courte durée que si le pilote doit changer d'avion pour faire les deux vols en question. De plus, si l'aéroport de départ du deuxième vol est un co-terminal de l'aéroport d'arrivée du premier vol, le temps alloué pour la connexion entre les deux vols doit comprendre la durée du déplacement au sol entre les deux aéroports.

Tous les arcs du réseau sont regroupés en catégories. Ces catégories sont liées aux parties du réseau. Ainsi, nous avons les arcs des parties fixées, les arcs de la partie opérationnelle, les arcs reliant la partie initiale fixée aux autres parties et les arcs reliant la partie opérationnelle à la partie finale fixée.

4.2.1 Parties fixées

Les arcs des parties fixées peuvent être de tous les types. Les nœuds de la partie initiale fixée sont reliés entre eux en ordre chronologique par des arcs. Un arc entre deux nœuds de la partie initiale fixée existe si et seulement si les deux activités correspondantes sont successives dans l'horaire du pilote considéré. La source est liée au nœud correspondant à la première activité planifiée du bloc mensuel si une telle activité existe. Le type d'arc est déterminé comme indiqué précédemment. Mentionnons qu'aucun arc n'est de type *endline* puisque le puits ne fait pas partie de la partie initiale fixée. De la même façon, les nœuds de la partie finale fixée sont reliés entre eux en ordre chronologique par des arcs. La condition d'existence des arcs est identique à celle des arcs de la partie initiale fixée et les types d'arcs sont aussi déterminés de la même façon. Un arc existe entre la dernière activité de la rotation opérationnelle (si cette activité fait partie de la partie finale fixée) et le puits. Notons cette fois qu'aucun arc ne peut être de type *beginline* puisque la source n'est pas dans la partie finale fixée. Remarquons qu'aucun des arcs des parties initiale et finale fixée ne doivent satisfaire les conditions d'existence énumérées précédemment : ces conditions ont déjà été vérifiées lors de la planification des horaires.

4.2.2 Partie opérationnelle

Les nœuds de la partie opérationnelle sont reliés entre eux par des arcs de type *connection* dont les conditions d'existence sont énumérées en 4.2. Aucun autre type d'arc n'existe dans la partie opérationnelle puisque les vols de la partie opérationnelle serviront à créer les nouveaux services de vol opérationnels, chaque pilote ayant au plus un service de vol opérationnel.

4.2.3 Partie initiale fixée vers les autres parties

Les arcs reliant la partie initiale fixée aux autres parties pourront aussi être de tous les types. Ils peuvent être de tous les types et sont regroupés en trois catégories : les arcs entre la partie initiale fixée et la partie opérationnelle, les arcs entre la partie initiale fixée et le premier nœud de la partie finale fixée et les arcs entre la partie initiale fixée et le puits.

4.2.3.1 *Partie initiale fixée vers la partie opérationnelle*

Une série d'arcs relie la partie initiale fixée à la partie opérationnelle. Un arc existe entre le dernier nœud de la partie initiale fixée et un nœud de la période opérationnelle si le pilote peut faire le vol opérationnel correspondant au nœud de la période opérationnelle après le dernier vol de la partie initiale fixée. Les conditions d'existence des ces arcs varient en fonction du statut initial du pilote.

Si le statut initial du pilote est « Suite de SDV », le dernier vol de la partie initiale fixée et un vol de la partie opérationnelle relié à ce dernier font partie d'un même service de vol. Les arcs sont donc de type *connection* et respectent les conditions énumérées à la section 4.2.

Si le statut initial du pilote est « Début de bloc mensuel », les arcs sont de type *beginline*, car le dernier (et seul) nœud de la partie initiale fixée est la source. Ces arcs doivent respecter les conditions énumérées à la section 4.2.

Pour un pilote ayant comme statut initial « Début de rotation », les arcs sont de type *rest*. Nous ajoutons une condition aux conditions d'existence nommées à la section 4.2. Si le pilote n'est pas encore à l'aéroport, il faut vérifier si le vol en question est un

vol de nuit. Si oui, la durée de la période entre la fin de la rotation précédente et le début de la rotation opérationnelle commençant par ce vol ne doit pas être inférieure au temps minimal de repos de nuit.

Si le statut initial du pilote est « Début de SDV », comme le dernier vol de la partie initiale fixée et le vol opérationnel font partie de la même rotation, mais de services de vol différents, l'arc est de type *layover* et respecte les conditions énumérées à la section 4.2.

4.2.3.2 *Partie initiale fixée vers le premier nœud de la partie finale fixée*

Pour chaque réseau, il peut y avoir un arc entre le dernier nœud de la partie initiale fixée et le premier nœud de la partie finale fixée si certaines conditions sont vérifiées. Ces conditions varient en fonction des conditions initiales et finales du pilote.

Si le statut final est « Fin de rotation », le premier et seul nœud de la partie finale fixée est le puits. Il y a donc un arc de type *endline* entre le dernier nœud de la partie initiale fixée et le puits. Cet arc sert à assurer l'existence d'un chemin dans le réseau et donc il n'y a aucune condition d'existence à vérifier.

Si le statut final est « Fin de SDV » et le statut initial est « Début de rotation » ou « Début de bloc mensuel », il n'y aura pas d'arc. En effet, une rotation commence toujours à la base du pilote tandis qu'un service de vol ne se termine jamais à la base du pilote (sauf si ce service de vol est le dernier de la rotation). Les aéroports ne concordant pas, il ne pourra donc pas y avoir d'arc entre les deux nœuds.

Pour le même statut final, si le statut initial est « Début de SDV », il suffit que les aéroports initial et final de la période opérationnelle soient les mêmes ou qu'ils soient coterminaux pour que l'arc existe. L'arc est de type *layover* et respecte

automatiquement toutes les contraintes données à la section 4.2 si les aéroports sont compatibles. Si le statut initial est « Suite de SDV », l'arc est de type *layover* puisque le premier vol de la partie finale fixée est le premier d'un nouveau service de vol. Le dernier vol de la partie initiale fixée et le premier vol de la partie finale fixée font donc partie de services de vol différents. Cependant, quelques modifications s'appliquent aux conditions d'existence décrites précédemment (section 4.2). Nous ne tenons pas compte des conditions en rapport avec la position initiale du pilote puisque, pour le statut initial « Suite de SDV », cet élément de la condition initiale n'existe pas. Nous remplaçons ces conditions par la suivante : en ajoutant à l'heure de début de la période opérationnelle le *release time* correspondant au dernier vol de la partie initiale fixée, on obtient l'heure de la fin du service de vol. L'heure obtenue doit être avant l'heure de fin de la période opérationnelle pour que l'arc soit créé.

Si le statut final est « Suite de SDV », nous appliquons les mêmes conditions d'existence que lors de la création des arcs entre la partie initiale fixée et la partie opérationnelle en tenant compte des conditions initiales. Si le statut initial du pilote est « Début de rotation », nous prenons les conditions correspondant à cette situation et ainsi de suite. Le type des arcs est aussi déterminé de la même façon que pour les arcs entre la partie initiale fixée et la partie opérationnelle (section 4.2.3.1).

4.2.3.3 *Partie initiale fixée vers le puits*

Finalement, un arc entre le dernier nœud de la partie initiale fixée et le puits est créé si le statut final est différent de « Fin de rotation ». Dans ce dernier cas, l'arc a déjà été créé (section 4.2.3.2). L'arc est de type *endline* et assurera l'existence d'un chemin dans le réseau.

4.2.4 Partie opérationnelle vers la partie finale fixée

Une série d'arcs relie la partie opérationnelle à la partie finale fixée. Les arcs reliant la partie opérationnelle à la partie finale fixée peuvent être de tous les types sauf *beginline*. Deux sortes d'arcs composent cette série : les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée et les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le puits.

4.2.4.1 *Partie opérationnelle vers le premier nœud de la partie finale fixée*

Les conditions d'existence des arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée dépendent de la condition finale du pilote.

Si le statut final du pilote est « Suite de SDV », l'arc est de type *connection* puisque le vol opérationnel et le premier vol de la partie finale fixée font partie du même service de vol. Les conditions d'existence d'un arc entre un nœud de la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée sont celles qui sont décrites à la section 4.2.

Si le statut final est « Fin de SDV », le vol opérationnel est le dernier vol du service de vol opérationnel. En effet, le premier vol de la partie finale fixée est le premier vol d'un nouveau service de vol et donc les vols de la partie opérationnelle ne peuvent pas lui appartenir. L'arc est donc de type *layover* et la fin du service de vol opérationnel est l'heure d'arrivée du vol opérationnel à laquelle on ajoute le *release time* approprié. L'arc en question n'existe que si les deux conditions suivantes sont satisfaites : l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel et l'aéroport final de la période opérationnelle sont identiques ou sont co-terminaux; le service de vol opérationnel se termine avant la fin de la période opérationnel.

Si le statut final du pilote est « Fin de rotation », la partie finale fixée ne contient que le puits. L'arc sera de type *endline* puisqu'un des nœuds est le puits. Les conditions d'existence de ces derniers ne varient pas en fonction de la condition finale du pilote, mais en fonction de l'aéroport d'arrivée du vol correspondant au nœud de la partie opérationnelle. Lorsque l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel est la base du pilote, le *release time* est ajouté à l'heure d'arrivée du vol. Cette nouvelle heure correspond à la fin du service de vol et de la rotation opérationnels et doit précéder la fin de la période opérationnelle. Lorsque l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel n'est pas la base du pilote, il doit être un des aéroports admissibles pour la base ou encore un coterminal d'un aéroport admissible pour la base. Un aéroport est admissible pour une base donnée s'il est possible de ramener un pilote à sa base par un vol de mise en place partant de cet aéroport. Ces vols de mise en place ne sont pas énumérés et nous ne connaissons pas leurs heures de départ. Nous savons seulement qu'ils existent. Ces vols s'appellent les vols de mise en place virtuels. La durée du vol de mise en place virtuel pour ramener le pilote de l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel à sa base doit être ajoutée à l'heure d'arrivée du vol. Cette heure d'arrivée à la base doit être avant la fin de la période opérationnelle.

4.2.4.2 *Partie opérationnelle vers le puits*

Si le statut final n'est pas « Fin de rotation », les conditions d'existence d'un arc de type endline entre un nœud opérationnel et le puits sont les mêmes que pour un arc entre un nœud opérationnel et le premier nœud de la partie finale fixée dans le cas du statut final « Fin de rotation » (section 4.2.4.1). Par contre, si le statut final est « Fin de rotation », l'arc n'est pas créé, car un arc identique a déjà été créé (section 4.2.4.1).

4.3 Ressources

Cinq ressources servent à modéliser les quatre contraintes sur les horaires des pilotes : le nombre maximal de vols dans un service de vol, la durée maximal d'un service de vol, le nombre maximal d'heures de vol pendant sept jours consécutifs et le nombre maximal de crédits dans un bloc mensuel. La ressource « Duty_leg » sert à modéliser la première contrainte, la ressourse « Duty_duration » la deuxième contrainte, la ressource « Block_time » la troisième contrainte et les ressources « Credit_time » et « Trip_time » la dernière contrainte.

4.3.1 « Duty_leg »

Le nombre maximal de vols dans un service de vol est représenté par la ressource « Duty_leg ». Pour chaque nœud à part la source, cette ressource doit se situer entre zéro et le nombre maximal de vols dans un service de vol pour la compagnie. À la source, la ressource doit prendre la valeur nulle. Pour chaque arc dont le nœud d'arrivée fait partie du service de vol opérationnel, la consommation de la ressource est de un vol. Pour tous les autres arcs la consommation est nulle.

4.3.2 « Duty_duration »

La durée maximale d'un service de vol est représentée par la ressource « Duty_duration ». Cette durée varie d'un pilote à l'autre. Nous prenons donc comme valeur commune la plus grande des durées maximales d'un service de vol. Appelons cette valeur commune MDD. Au nœud source, la ressource doit prendre la valeur nulle. Pour les nœuds actifs, elle doit se situer entre zéro et une valeur correspondant à MDD moins le *release time*. Pour les nœuds actifs, elle se situe entre zéro et une autre valeur. Celle-ci est définie comme étant la valeur commune MDD à laquelle on a ajouté un temps d'extension et ensuite retranché le *release time*. Finalement, au puits, la valeur de

la ressource doit se situer entre zéro et une valeur correspondant à MDD plus le temps d'extension.

Comme mentionné précédemment, MDD représente le maximum des durées maximales d'un service de vol. Donc, pour plusieurs pilotes, les fenêtres de la ressource « Duty_duration » sont trop grandes. Il faut donc les réduire à l'aide d'une consommation artificielle de la ressource qui sera calculée pour chaque pilote. Nous appelons cette consommation temps de réduction. Pour tous les arcs dont le nœud d'arrivée correspond au premier vol du service de vol opérationnel, la consommation de la ressource est le temps de réduction pour le pilote auquel on ajoute le temps écoulé entre le début du service de vol et l'arrivée du premier vol. Pour tous les arcs entre deux vols du service de vol opérationnel, la consommation est égale au temps écoulé entre l'arrivée du deuxième vol et l'arrivée du premier vol. Finalement, les arcs entre le dernier nœud du service de vol opérationnel et un autre nœud ont comme consommation de la ressource le *release time* correspondant au nœud. Pour tous les autres arcs, la consommation est nulle.

4.3.3 « Block_time »

La contrainte du nombre maximal d'heures de vol pendant sept jours consécutifs est représentée par la ressource « Block_time ». Cette ressource doit être à zéro au nœud source. À tous les autres nœuds, elle doit se situer entre zéro et le nombre maximal d'heures de vol pendant sept jours consécutifs. Appelons max1 le maximum des heures de vol des sept combinaisons de sept jours consécutifs comprenant la journée des opérations si le pilote fait sa partie finale fixée. Appelons aussi max2 le maximum des heures de vol des sept combinaisons de sept jours consécutifs comprenant la journée des opérations si le pilote ne fait pas sa partie finale fixée. La consommation de la ressource « Block_time » sur les arcs de la partie opérationnelle sera égale au *blocktime* du vol correspondant au nœud d'arrivée de l'arc. Sur les arcs entre le dernier nœud de la partie

initiale fixée et un nœud opérationnel, la consommation est de max2 plus le *blocktime* du vol associé au nœud opérationnel. Pour les arcs entre le dernier nœud de la partie initiale fixée et le premier nœud de la partie finale fixée, la consommation de la ressource sur l'arc est de max1 sauf dans le cas où la partie finale fixée ne contient que le puits. Dans ce dernier cas, la consommation est nulle. Pour les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée, la consommation de la ressource est max1 auquel on soustrait max2. Dans le cas où la partie finale fixée ne contient que le puits, la consommation est nulle. Pour tous les autres arcs, il n'y a aucune consommation de la ressource.

4.3.4 « Credit_time »

La ressource « Credit_time » sert à représenter la contrainte du nombre maximal de crédits. Soit T_k le nombre maximal de crédits dans la rotation opérationnelle pour le pilote k et soit T le maximum de tous les T_k. La ressource doit être à zéro au nœud source. Aux nœuds de la période opérationnelle, la valeur de la ressource doit être comprise entre zéro et T tandis qu'à tous les autres nœuds elle devra être entre zéro et T_k.

Tous les arcs entre deux nœuds de la période opérationnelle ont comme consommation de la ressource le nombre de crédits associés au nœud d'arrivée de l'arc. Pour les arcs entre la partie initiale fixée et la partie opérationnelle, nous distinguons deux cas. Si le statut initial du pilote est « Début de rotation », la consommation de la ressource est égale au nombre de crédits associés au nœud opérationnel. Sinon, on ajoute à cette valeur de la consommation le nombre de crédits de la partie de la rotation opérationnelle qui se trouve avant la période opérationnelle. Pour les arcs entre la partie initiale fixée et le premier nœud de la partie finale fixée, la consommation de la ressource « Credit_time » est égale au nombre de crédits associé aux parties de la rotation opérationnelle se trouvant avant le début de la période opérationnelle ou après la

fin de la période opérationnelle. Si le premier nœud de la partie finale fixée n'est pas le puits, la consommation de la ressource sur un arc entre un nœud de la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée est égale au nombre de crédits associé à la partie de la rotation opérationnelle qui est après la fin de la période opérationnelle. Pour les arcs entre la partie opérationnelle et le puits, la consommation de la ressource est égale au nombre de crédits associé au vol de mis en place virtuel qui sera utilisé pour ramener le pilote à sa base. Si le pilote est déjà à sa base, ce nombre est nul. La consommation sur tous les autres arcs est nulle.

4.3.5 « Trip_time »

La contrainte de la durée maximale d'un rotation est aussi représentée par la ressource « Trip_time ». Pour cette ressource, nous utilisons les mêmes valeurs T et T_k que pour la ressource « Credit_time ». Au nœud source, « Trip_time » doit avoir la valeur nulle. À tous les autres nœuds des parties fixées, la ressource doit prendre une valeur se situant entre zéro et quatre fois T_k. Pour tous les nœuds de la partie opérationnelle, la valeur de la ressource doit être entre zéro et quatre fois T.

La consommation de la ressource sur les arcs opérationnels est égale au temps écoulé entre l'arrivée du deuxième vol et l'arrivée du premier vol. Sur les arcs entre la partie initiale fixée et la partie opérationnelle, la consommation de la ressource est égale à la période entre l'arrivée du vol de la partie opérationnelle et le début de la rotation opérationnelle. Si le statut initial est « Début de rotation » ou « Début de bloc mensuel » et que le pilote n'est pas encore arrivé à l'aéroport, cela correspond à la durée du vol de la partie opérationnelle à laquelle on ajoute le *report time* correspondant au nœud. Par contre, si le pilote est déjà arrivé à l'aéroport, nous considérons que la rotation opérationnelle commence en même temps que la période opérationnelle. Pour les arcs entre la partie initiale fixée et le premier nœud de la partie finale fixée, nous ne considérons que le cas où le premier nœud de la partie finale fixée est différent du puits.

Nous distinguons alors deux cas. Si le statut initial du pilote est « Début de rotation » ou « Début de bloc mensuel », la consommation de la ressource est égale au temps écoulé entre la fin de la rotation opérationnelle et le moment où le pilote doit se présenter pour faire le vol correspondant au premier nœud de la partie finale fixée. Sinon, la consommation de la ressource est la période entre le début et la fin de la rotation opérationnelle. Pour les arcs entre la partie opérationnelle et le premier nœud de la partie finale fixée, nous considérons encore uniquement le cas où la partie finale fixée contient au moins un nœud autre que le puits. La consommation sur ces arcs est égale au temps écoulé entre la fin de la rotation opérationnelle et l'arrivée du vol correspondant au nœud de la partie opérationnelle. Les arcs entre la partie opérationnelle et le puits ont une consommation de ressource d'une durée égale au *release time* correspondant au nœud de la partie opérationnelle si le pilote est déjà à sa base. Si le pilote n'est pas encore à sa base, la consommation de la ressource doit être égale à la durée du vol de mise en place virtuel qui ramènera le pilote à sa base. Finalement, la consommation de la ressource sur tous les autres arcs est nulle.

4.4 Coûts

La fonction de coût sur les arcs peut comprendre plusieurs éléments : des pénalités sur les vols non couverts de la partie opérationnelle ou de la partie finale fixée; des pénalités sur les changements d'avions; des pénalités sur l'utilisation de pilotes dits en réserve; des bonus permettant de minimiser les changements aux blocs mensuels planifiés; les heures de travail perdues (ces heures de travail étaient prévues et devront être payées même si le pilote ne fait pas le travail prévu) lorsqu'un pilote ne peut revenir à son horaire original après la période opérationnelle; le coût des vols de mise en place; le coût des débordements de la rotation prévue. Dans ce premier modèle, seules les pénalités sur les vols non couverts des parties opérationnelle et finale fixée, les heures de travail perdues et le coût des vols de mise en place sont utilisés pour déterminer la fonction de coût sur les arcs.

Pour assurer l'existence d'une solution, il faut permettre la non-couverture des vols opérationnels actifs. Nous aurions pu créer des variables de non-couverture dans le problème maître et leur associer les pénalités de non-couverture des vols. Cependant, nous devons pouvoir associer des tâches à ces variables. Nous avons donc créé un réseau simple permettant la non-couverture des vols opérationnels actifs et comprenant les pénalités de non-couverture de ces vols. Ce réseau contient tous les nœuds opérationnels actifs ainsi qu'un nœud source et un nœud puits. Il n'existe que deux types d'arcs dans ce réseau : les arcs de types *beginline* et les arcs de type *endline*. Un arc de type *beginline* relie la source à chacun des nœuds opérationnels actifs et un arc de type *endline* relie chaque nœud opérationnel actif au puits. Ainsi un chemin dans le réseau ne passe que par un seul nœud opérationnel actif. Les consommations de ressource sur ces arcs sont nulles. Le coût sur les arcs de type *beginline* correspond à la pénalité de non-couverture d'un vol. Le coût sur les arcs de type *endline* est nul.

CHAPITRE 5 : EXTENSIONS DU MODÈLE

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le modèle de base. Plusieurs améliorations peuvent être apportées à ce modèle. Ces améliorations peuvent avoir plusieurs buts : obtenir un modèle plus complet, c'est-à-dire un modèle représentant mieux la réalité, améliorer la qualité de la solution ou diminuer le temps d'exécution.

5.1 Réserves anonymes

En tout temps et à chaque base, il y a un certain nombre de pilotes dits en réserve. Aucun vol n'est affecté à ces pilotes, mais ils sont disponibles en cas de besoin. Nous voudrions pouvoir nous servir de ces pilotes lors de la résolution du problème afin de couvrir plus de vols de la période opérationnelle.

5.1.1 Modélisation pour les réserves

La seule information sur ces pilotes que nous utilisons est leur nombre par base. Nous construisons donc une contrainte et un réseau par base. La contrainte associée à une base indique le nombre de chemins qui doivent être pris dans son réseau. Ce nombre correspond au nombre de pilotes disponible à cette base. Si N_b est le nombre de pilotes en réserve à la base b, on obtient la contrainte suivante :

$$\sum_{j:(o(k),j)\in A^b} X^b_{o(k),j} = \sum_{j:(j,d(k))\in A^b} X^b_{j,d(k)} = N_b \quad , \qquad \forall \ b \in B$$

(5.1)

où B est l'ensemble des bases où des pilotes en réserve sont disponibles.

Pour le réseau, les aéroports de départ et d'arrivée de la période opérationnelle correspondent à la base. La partie initiale fixée ne contient que le noeud source tandis que la partie finale fixée ne contient que le puits. La partie opérationnelle contient les

mêmes nœuds et arcs que les autres réseaux puisque cette partie est partagée par tous les réseaux. Seuls les arcs entre la partie initiale fixée et les autres parties ainsi que les arcs entre la partie opérationnelle et la partie finale fixée doivent être créés.

Un arc existe entre le nœud source et un nœud de la partie opérationnelle si l'aéroport de départ du vol opérationnel est le même que la base ou encore s'il est un co-terminal de la base. De plus, le début de la période opérationnelle doit précéder l'heure de départ du vol opérationnel d'une durée au moins égale au *report time* correspondant au nœud opérationnel plus le temps de transport entre deux co-terminaux. Pour les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le puits, nous distinguons deux cas. Si l'aéroport d'arrivée du vol correspondant au nœud opérationnel est la base ou un co-terminal de la base, un arc existe entre le nœud opérationnel et le puits si l'arrivée du vol opérationnel précède la fin de la période opérationnelle d'une période au moins égale au *release time* du nœud opérationnel plus le temps de transport entre deux co-terminaux. Si l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel est un aéroport admissible pour la base, l'arc existe si la période entre l'arrivée du vol opérationnel et la fin de la période opérationnelle est supérieure ou égale à la durée du vol de mise en place virtuel qui ramène un pilote en réserve à la base. Finalement, il y a un arc entre la source et le puits afin d'assurer l'existence d'un chemin dans le réseau. Ce dernier permet aussi de satisfaire la contrainte de la base sans affecter des vols à tous les pilotes en réserve.

Les ressources doivent toutes être à zéro au nœud source et les fenêtres sur les ressources pour les nœuds de la partie opérationnelle ont déjà été établies. De plus, les consommations des ressources sur les arcs de la partie opérationnelle ont aussi déjà été décrites au chapitre 4. Au puits, la ressource « Duty_leg » doit se situer entre zéro et le nombre maximal de vols dans un service de vol. La consommation de cette ressource est d'une unité sur tous les arcs dont le nœud d'arrivée est dans la partie opérationnelle. Sinon, la consommation de la ressource est nulle.

La ressource « Duty_duration » doit être positive et inférieure ou égale à MDD plus le temps d'extension au nœud puits. Sur les arcs entre la source et un nœud de la partie opérationnelle, la consommation de la ressource est du temps de réduction approprié plus le *report time* correspondant au nœud opérationnel, le temps de transport entre deux co-terminaux et la durée du vol correspondant au nœud opérationnel. Sur les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le puits, il y a deux cas. Si l'aéroport d'arrivée du vol opérationnel est la base ou un co-terminal de la base, la consommation de la ressource est du *release time* associé au nœud opérationnel plus le temps de transport entre deux co-terminaux. Sinon, la consommation de la ressource est égale à la durée du vol de mise en place virtuel utilisé pour ramener le pilote de réserve à sa base.

Au puits, la ressource « Block_time » doit être comprise entre zéro et le nombre maximal d'heures de vol pendant sept jours consécutifs. Sur tous les arcs entre la source et un nœud de la partie opérationnelle, la consommation de la ressource est égale au *block time* du vol associé au nœud opérationnel. Sur tous les autres arcs, la consommation de la ressource est nulle.

Au puits, la ressource « Credit_Time » doit être positive et inférieure ou égale à T défini au chapitre 4. Sur tous les arcs dont le nœud d'arrivée est un nœud opérationnel, la consommation de la ressource est du nombre de crédits associé à ce nœud. Pour les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le puits, si le l'aéroport d'arrivée du vol correspondant au nœud opérationnel est admissible, la consommation de la ressource sur l'arc est égale au nombre de crédits associé au vol de mise en place virtuel qui ramène le pilote à sa base. Sur tous les autres arcs, la consommation est nulle.

La ressource « Trip_time » doit se situer entre zéro et quatre fois T au puits. Sur les arcs entre la source et un nœud de la partie opérationnelle, la consommation est égale à la durée du vol correspondant au nœud opérationnel auquel nous ajoutons le *report*

time associé au nœud opérationnel et le temps de transport entre deux co-terminaux. Pour les arcs entre la partie opérationnelle et le puits, nous distinguons deux cas. Si l'aéroport d'arrivée est la base ou un co-terminal de la base, la consommation de la ressource est égale au *release time* associé au nœud opérationnel plus le temps de transport entre deux co-terminaux. Si l'aéroport d'arrivée est admissible pour la base, la consommation de la ressource est de la durée du vol de mise en place virtuel qui ramène le pilote de réserve à sa base.

Le coût sur les arcs entre la source et un nœud opérationnel est égal au coût du vol correspondant au nœud opérationnel plus le coût du transport entre deux co-terminaux. Sur les arcs entre un nœud de la partie opérationnelle et le puits, nous distinguons ici aussi deux cas. Si l'aéroport d'arrivée du nœud opérationnel est la base ou un co-terminal de la base, le coût sur l'arc correspond au coût du transport entre deux co-terminaux. Si l'aéroport d'arrivée est admissible pour la base, le coût sur l'arc est celui du vol de mise en place virtuel qui ramène le pilote de réserve à sa base.

5.1.2 Pénalités sur les réserves

Lorsque des vols sont affectés à un pilote en réserve, il peut y avoir des suppléments à payer. De plus, la qualité de la solution se trouve détériorée par l'utilisation des pilotes en réserves. Il vaut donc mieux utiliser le moins de pilotes en réserve possible tout en couvrant un maximum de vols. Pour ce, nous créons un coût d'utilisation des pilotes en réserves. Chaque fois qu'un vol est affecté à un nouveau pilote en réserve, il faut payer le coût d'utilisation.

Comme nous n'avons pas de données concernant le coût d'utilisation d'un pilote en réserve, nous avons dû l'évaluer nous-mêmes. Le coût d'utilisation doit être choisi non seulement de façon à améliorer la qualité de la solution, mais aussi de façon à ne pas réduire le nombre de vols couverts par la solution.

Dans le modèle, nous ajoutons simplement ce coût d'utilisation à tous les arcs des réseaux pour les réserves qui font le lien entre la source et la partie opérationnelle.

5.2 Vols non affectés

Le jour des opérations, il se peut qu'un pilote, pour une raison quelconque, ne soit pas en mesure d'effectuer un ou plusieurs des vols prévus à son horaire. Par ailleurs, certains vols peuvent ne jamais avoir été affectés à un pilote lors de la phase de planification ou encore de nouveaux vols peuvent être rajoutés par la compagnie aérienne afin de satisfaire la demande. Ce sont les vols non affectés et il faut autant que possible les affecter aux pilotes disponibles.

Nous nous retrouvons donc avec un certain nombre de vols supplémentaires dans la période opérationnelle. Nous créons alors des nœuds dans la partie opérationnelle des réseaux pour représenter ces vols ainsi qu'une contrainte de couverture pour chaque vol de type actif. Pour un vol de type actif, nous créons un nœud de type actif et un nœud de type mise en place. Pour un vol de type mise en place, nous ne créons que le nœud de type mise en place. Nous appelons ces nœuds, les nœuds non affectés. Pour chaque vol actif, une contrainte de couverture est créée. Le nœud de type actif correspondant au vol contribue une unité à la contrainte de couverture du vol en question.

Nous traitons ces nouveaux nœuds comme tous les autres nœuds de la partie opérationnelle. Nous créons donc tous les arcs de type *connection* possibles entre chacun des nœuds non affectés et tous les autres nœuds qu'ils soient des nœuds non affectés ou non. Pour chaque réseau, incluant les réseaux pour les réserves, nous créons les arcs nécessaires entre la partie initiale fixée et chaque nœud non affecté et entre chaque nœud non affecté et la partie finale fixée en respectant les conditions appropriées pour chaque réseau.

Les fenêtres de ressource sur les nœuds non affectés sont identiques à celles des autres nœuds de la partie opérationnelle. Pour chaque arc que nous avons créé, les consommations de ressources sont calculées exactement de la même façon que pour les arcs de la même catégorie. Par exemple, le calcul des consommations de ressources pour un arc entre un nœud non affecté et le puits se fait comme le calcul des consommations des ressources pour un arc entre un autre nœud opérationnel et le puits.

De même, les coûts sur les arcs entre un nœud non affecté et un autre nœud du réseau sont calculés comme ceux sur les arcs entre un nœud opérationnel et un autre nœud du réseau.

5.3 Un réseau par pilote

Jusqu'à présent, la partie opérationnelle des réseaux était unique et partagée par tous les réseaux. Cette dernière était composée des arcs de type *connection* et de tous les nœuds associés aux vols faisant partie de la période opérationnelle. Maintenant, nous éliminons les arcs de type *connection* de la partie opérationnelle et celle-ci ne contiendra que les nœuds correspondant aux vols de la période opérationnelle. Nous créons alors les arcs de type *connection* pour chaque réseau, incluant les réseaux pour les pilotes en réserve. Ainsi, pour chaque arc de type *connection* qui était auparavant dans la partie opérationnelle, nous avons autant de copies de cet arc qu'il y a de pilotes et de bases pour les pilotes en réserves.

Lorsque chaque réseau est composé d'un ensemble d'arc qui lui est propre, nous pouvons adapter chaque réseau au pilote qu'il représente. Nous pouvons ajouter un certain nombre de pénalités qui complèteront le modèle et amélioreront la solution. Des pénalités sur les changements d'avion entre deux vols du SDV opérationnel seront ajoutées pour améliorer la qualité de la solution. Des pénalités seront appliquées

lorsqu'un vol est affecté à un pilote différent de celui de l'horaire original pour améliorer la qualité de la solution. Des pénalités de débordement au début et à la fin de la rotation opérationnelle réduiront le nombre de pilotes commençant ou finissant leur rotation opérationnelle avant ou après (respectivement) les heures prévues. Finalement, nous ajouterons un nettoyage des réseaux qui accélérera la génération des réseaux en évitant de créer des arcs inutiles. D'autres pénalités sont rendues possibles par la création d'un seul ensemble d'arcs pour chaque pilote, mais nous ne les développerons pas ici.

5.4 Pénalités sur les changements d'avion

Lorsqu'un pilote reste dans le même avion pendant tout un SDV, son horaire est plus robuste, c'est-à-dire qu'il résiste mieux aux perturbations. En effet, si un pilote reste dans le même avion pendant tout son SDV, quand un des vols affectés au pilote en question est en retard, le vol suivant n'a pas besoin d'être réaffecté à un autre pilote. Le pilote auquel il était initialement affecté sera disponible au même moment que l'avion qui servira à effectuer le vol. De plus, les pilotes préfèrent rester dans le même avion pendant tout leur SDV. Une solution de bonne qualité contiendra donc peu de changements d'avion à l'intérieur du SDV opérationnel de chaque pilote.

Afin de favoriser l'affectation des vols faits par un même avion à un seul pilote, nous ajoutons une pénalité sur les changements d'avion. Sur tous les arcs entre deux vols dont au moins un est dans la partie opérationnelle, nous comparons les numéros d'avion associés à chacun des vols. Si les deux numéros d'avions sont identiques ou si les deux vols étaient prévus à l'horaire original du pilote, le coût de l'arc reste inchangé. Sinon, nous ajoutons la pénalité sur les changements d'avion au coût de l'arc. Ainsi les connexions où il y a changement d'avion coûteront plus cher et l'optimiseur les évitera autant que possible.

Nous devons cependant être attentifs au choix de la pénalité. Plusieurs pénalités peuvent s'accumuler le long d'un chemin du réseau et ainsi grossir la valeur de la pénalité totale associée au chemin. Il ne faut jamais que la pénalité totale soit supérieure à la pénalité pour la non-couverture d'un vol afin que l'optimiseur ne choisisse jamais de maintenir un pilote dans le même avion au détriment de la couverture des vols.

5.5 Pénalités sur les vols non planifiés

Lors de l'optimisation, notre but premier est de couvrir un maximum de vols de la période opérationnelle. Cependant, nous voulons aussi une solution qui soit le plus près possible de l'horaire original. Pour satisfaire cet objectif secondaire, nous allons ajouter des pénalités lorsqu'un pilote est affecté à un vol qu'il ne devait pas faire dans son horaire original. Ceci nous est rendu possible grâce à la création de réseaux contenant une série d'arcs de type *connection* propre à chaque pilote.

Chaque fois qu'un vol est affecté à un pilote, nous ajoutons une pénalité correspondant à ce vol. Si le vol est prévu tel quel à l'horaire du pilote, il n'y a aucune pénalité. Si le vol affecté au pilote est la version de mise en place d'un vol prévu à l'horaire du pilote, il y a une petite pénalité. Si le vol n'était pas du tout prévu dans le service de vol original du pilote, il y a une grande pénalité.

Pour réaliser ceci, nous avons ajouté une pénalité aux arcs de type *connection* de tous les pilotes et aux arcs reliant la partie fixée initiale à la partie opérationnelle des pilotes dont la condition initiale est « Suite de SDV ». Pour chacun des pilotes, on ajoute une pénalité aux arcs mentionnés ci-dessus selon le nœud d'arrivée de l'arc. Si le nœud représente un vol planifié pour le pilote et que ce nœud est de type actif, aucune pénalité n'est ajoutée. Si le nœud représente un vol planifié pour le pilote, mais que ce nœud est de type mise en place, la petite pénalité est ajoutée au coût de l'arc.

Finalement, si le nœud représente un vol non planifié pour le pilote, la grande pénalité est ajoutée.

Il faut cependant faire très attention aux pénalités choisies : elles ne doivent en aucun cas pousser la solution à maintenir le plan original au détriment de la couverture de vols. Un pilote peut faire plusieurs vols qui ne lui étaient pas assignés au départ, en particulier s'il est dans l'impossibilité de faire un de ceux qui lui étaient affectés dans le plan original. Ces pénalités peuvent donc s'accumuler sur un chemin et il faut s'assurer que leur somme ne puisse jamais dépasser la pénalité pour un vol de la période opérationnelle non couvert. De plus, il faut tenir compte des autres modifications que nous apporterons à la fonction de coût.

5.6 Débordement au début de la rotation prévue

Lorsqu'une perturbation force les dirigeants d'une compagnie aérienne à modifier les horaires originaux d'un groupe de pilotes, il peut arriver que l'un de ces pilotes commence sa rotation plus tôt que prévu. La compagnie aérienne doit alors lui verser un supplément qui varie selon la convention collective. Nous voulons donc éviter le plus possible d'affecter des vols dont l'heure de départ précède le début de la rotation prévue a l'horaire original. Pour accomplir ceci, nous allons simplement ajouter à certains arcs le supplément à payer approprié. Ce supplément sert aussi à inciter la solution à suivre l'horaire original et donc améliore la qualité de la solution.

Comme supplément à payer à un pilote qui commence sa rotation plus tôt que prévu, nous avons choisi le système suivant : un surplus de 50% des crédits associés aux heures de vols précédant le début de la rotation prévue est versé. Si un vol commence avant le début de la rotation prévue, mais finit après, il faut utiliser une règle de trois pour calculer le nombre de crédits associé à la partie du vol qui précède le début de la rotation prévue à l'horaire original. Le supplément est ajouté aux arcs de type

connection et aux arcs reliant la partie fixée initiale à la partie opérationnelle pour les pilotes dont la condition initiale est « Début de bloc mensuel » ou « Début de rotation », c'est-à-dire les pilotes qui commencent une nouvelle rotation au début de la période opérationnelle. Pour chacun de ces arcs, on regarde le nœud d'arrivée. Si l'heure de départ du vol correspondant au nœud est après le début de la rotation prévue pour ce pilote, aucun supplément n'est ajouté au coût de l'arc. Si l'heure de départ du vol est avant le début de la rotation prévue, deux possibilités se présentent. Si l'heure d'arrivée du vol est après le début de la rotation, on utilise une règle de trois pour déterminer le nombre de crédits associé à la portion du vol qui précède la rotation prévue et on ajoute 50% de ce nombre au coût de l'arc. Si l'heure d'arrivée du vol est avant le début de la rotation prévue, on ajoute 50% du nombre de crédits associé au vol au coût de l'arc. Dans ces deux derniers cas, si le vol est de type actif, il faudra vérifier le type du nœud : si le nœud est de type actif alors rien ne change, mais si le nœud est de type mise en place, le nombre de crédits associés au vol doit être divisé par deux.

5.7 Débordement à la fin de la rotation prévue

Lorsque la réoptimisation des horaires des pilotes est faite, il peut aussi arriver que, dans la solution, un pilote finissse sa rotation plus tard que ce qui était prévu dans l'horaire initial. Dans ce cas, il faut aussi verser un supplément au pilote pour le nombre d'heures de vol qu'il fait en surplus. De plus, ce supplément améliore la solution en l'incitant à ressembler à l'horaire original. Nous voulons donc éviter autant que possible de prolonger les rotations des pilotes.

Nous utilisons le même système que pour le début des rotations : un supplément de 50% des crédits associés aux heures de vol suivant la fin de la rotation prévue à l'horaire original pour un pilote est versé au pilote en question. Si un vol finit après la fin de la rotation prévue, mais commence avant, il faut ici aussi utiliser une règle de trois pour calculer le nombre de crédits associé à la portion du vol qui est après la fin de la

rotation prévue. Pour les pilotes dont la condition finale est « Fin de rotation » le supplément est ajouté aux arcs de type *connection*, aux arcs reliant la partie opérationnelle au puits et à l'arc reliant la partie initiale fixée au puits. Pour les pilotes dont la condition finale est « Suite de SDV », le supplément est ajouté aux arcs reliant la partie opérationnelle au puits et à l'arc reliant la partie initiale fixée au puits si la condition initiale du pilote est « Début de SDV » ou « Suite de SDV ». Ces pilotes pourraient ne pas faire leur partie finale fixée et devoir prendre un vol de mise en place virtuel pour revenir à la base. Dans ce cas, ils pourraient se trouver à finir leur nouvelle rotation plus tard que la rotation qui était prévue dans l'horaire original. Rien n'est ajouté aux arcs des pilotes dont la condition finale est « Fin de SDV » : dans ce cas, nous sommes assurés que, si le pilote ne fait pas sa partie finale fixée, il aura le temps de retourner à la base avant la fin de la rotation qui était prévue à son horaire.

Pour les arcs de type *connection*, le même principe s'applique que pour les débordements au début de la rotation prévue. Pour chaque arc, on regarde le nœud d'arrivée. Si l'heure d'arrivée du vol correspondant à ce nœud est avant la fin de la rotation prévue, rien n'est ajouté au coût de l'arc. Si l'heure d'arrivée du vol est après la fin de la rotation prévue, il y a deux possibilités. Si l'heure de départ du vol est avant la fin de la rotation prévue, il faut utiliser une règle de trois pour calculer le nombre de crédits associé à la portion du vol qui est après la fin de la rotation prévue et ajouter 50% de ce nombre au coût de l'arc. Si l'heure de départ du vol est après la fin de la rotation prévue, on ajoute simplement 50% des crédits associés au vol en question au coût de l'arc. Encore une fois, si le vol est de type actif, mais le nœud est de type mise en place, le nombre de crédits associé au vol doit être divisé par deux.

Pour tous les autres arcs, la situation est un peu différente. Il s'agit d'arcs qui ramènent le pilote à sa base. Si le pilote est déjà à la base, il n'y a rien à faire. Sinon, le pilote doit revenir à la base à l'aide d'un vol de mise en place virtuel. Comme nous ne savons pas exactement quand un tel vol pourra ramener le pilote à sa base, nous prenons

le *virtualdhtime* entre l'aéroport où se trouve le pilote et la base du pilote comme temps maximal pour que le pilote revienne à la base. Ce temps est déterminé par la compagnie aérienne et peut comprend en général le temps de vol entre deux aéroports ainsi que le temps d'attente maximal avant qu'un vol soit disponible pour amener un pilote d'un aéroport à l'autre. Pour savoir s'il faut ajouter un supplément au coût de l'arc, on regarde le nœud de départ de l'arc. À l'heure d'arrivée du vol correspondant au nœud on ajoute le *virtualdhtime* entre l'aéroport d'arrivée du vol et la base du pilote. Si l'heure obtenue est avant la fin de la rotation prévue du pilote, on n'ajoute rien au coût de l'arc. Si l'heure obtenue est après la fin de la rotation prévue, on doit ajouter un supplément au coût de l'arc. Le supplément correspondra à 50% du nombre de crédits associé au vol de mise en place virtuel qui ramène le pilote à sa base.

5.8 Réduction du réseau

La création de plusieurs copies de chaque arc de type *connection* augmente sensiblement le temps de construction des réseaux. Cependant, il se pourrait que certains arcs soient inutiles pour certains pilotes. Pour un pilote, si l'heure de départ d'un vol opérationnel précède le début de la période opérationnelle du pilote, ce vol ne pourra pas être affecté au pilote. Nous savons donc qu'aucun chemin entre la source et le puits du réseau ne passera par un nœud correspondant à ce vol. Nous pouvons donc éviter de créer tous les arcs passant par un nœud correspondant à ce vol et ainsi épargner du temps. Pour ce, il suffit de comparer l'heure de départ du vol associé à chaque nœud opérationnel avec le début de la période opérationnelle du pilote avant de créer l'arc de type *connection* entre le nœud en question et un autre nœud de la partie opérationnelle. Si les heures ne sont pas compatibles, nous ne créons pas l'arc.

Nous pouvons appliquer un raisonnement semblable aux vols dont l'heure d'arrivée suit la fin de la période opérationnelle d'un pilote. Dans ce cas, par contre, nous ne pouvons éliminer des arcs que si la condition finale du pilote est « Fin de

rotation ». En effet, pour les autres conditions finales, le pilote pourrait ne pas faire les vols suivant la période opérationnelle. Nous pourrions donc avoir un chemin passant par un nœud opérationnel associé à un vol dont l'heure d'arrivée suit la fin de la période opérationnelle. Par contre, pour la condition finale « Fin de rotation », tous les arcs entre la partie opérationnelle et la partie finale fixée sont entre un nœud opérationnel et le puits. Nous avons donc que la fin de la période opérationnelle est la même que l'heure associée au puits et aucun chemin ne passera par un nœud si l'heure d'arrivée du vol qui lui est associé est après la fin de la période opérationnelle. Nous évitons donc de créer les arcs de type *connection* qui passent par ce nœud. Pour ce, quand la condition finale du pilote est « Fin de rotation », nous comparons l'heure d'arrivée du vol opérationnel à la fin de la période opérationnelle. Si ces heures sont incompatibles, les arcs entre un nœud associé au vol opérationnel et un autre nœud de la partie opérationnelle ne sont pas créés.

5.9 Période opérationnelle couvrant plus d'un SDV

Lorsqu'une perturbation se produit très près de la fin d'un SDV pour un pilote, il ne reste plus beaucoup de flexibilité pour réorganiser l'horaire du pilote à l'intérieur de ce SDV. En effet, le nombre maximal de vols par SDV et la durée maximale d'un SDV peuvent être déjà presque atteints. De plus, si le SDV opérationnel d'un pilote dont la fin (le début) fait partie de la période opérationnelle se termine (commence) à un aéroport peu achalandé, il existe peu de choix quant aux vols qui pourraient être affectés au pilote. Nous voudrions donc étirer la période opérationnelle de façon à ce qu'elle couvre plus d'un SDV.

En prenant une période opérationnelle comprenant deux SDV, nous obtiendrions une meilleure solution. Cependant, le problème deviendrait très gros et compliqué. Il ne pourrait vraisemblablement pas être résolu en temps réel. Nous faisons donc un compromis en étirant la période opérationnelle de façon à ce qu'elle couvre un peu plus

d'un SDV, mais pas deux au complet. Nous espérons ainsi obtenir de meilleures solutions tout en gardant des temps de résolution raisonnables. Le modèle que nous construisons tire parti du modèle de base. Le modèle pour la période opérationnelle utilise les mêmes ressources et contraintes que le modèle de base. De plus, le réseau est très semblable. Nous obtenons ainsi un modèle simple pour une situation qui aurait facilement pu devenir très complexe.

Lorsque la période opérationnelle couvre plus d'un SDV, une portion de chacun des SDV couverts est dans la période opérationnelle. Nous appelons cette portion de SDV la portion opérationnelle. La grandeur d'une portion de SDV est déterminée d'abord en fonction du nombre de vols qu'elle contient et ensuite par sa durée. Le SDV dont la portion opérationnelle est la plus grande est appelé grand SDV. L'autre SDV est le petit SDV. Le premier SDV en ordre chronologique est appelé le SDV(j) et le deuxième est le SDV(j+1).

La réorganisation du grand SDV se fait comme avant. Par contre, la réorganisation de la partie non fixée du petit SDV se fait différemment. Plutôt que de laisser l'optimiseur trouver des chemins réalisables pour le petit SDV, nous énumérons tous les petits SDV réalisables lors de la construction du réseau.

Nous avons modélisé la situation où la période opérationnelle couvre un peu plus d'un SDV de façon à maintenir le plus possible la structure des réseaux pour une période opérationnelle couvrant au plus un SDV que nous avons déjà mise en place. Ainsi, chaque réseau sera toujours composé des trois mêmes parties : les parties fixée initiale, opérationnelle et fixée finale. Toutes les modifications sont faites dans la partie opérationnelle et les parties fixées intiale et finale restent inchangées.

La modification majeure dans la partie opérationnelle est l'ajout d'un arbre contenant tous les petits SDV réalisables pour le pilote. La racine de cet arbre est reliée

à la partie fixée initiale dans le cas où les petits SDV sont des SDV(j) et à la partie fixée finale dans l'autre cas. Chaque nœud de l'arbre représente un petit SDV réalisable pour le pilote. Ces nœuds sont d'un nouveau type : le type SDV. Chaque nœud de l'arbre est relié aux nœuds opérationnels (actifs et de mise en place) et à la partie fixée opposée à la racine (la partie fixée finale dans le cas des SDV(j)) lorsque possible. Notons que tous les vols faisant partie de la période opérationnelle d'un pilote sont représentés par des nœuds tel que décrit dans le modèle de base.

5.9.1 Construction de l'arbre des SDV(j)

La racine de l'arbre des SDV(j) est un nœud représentant uniquement la partie fixée du petit SDV. Les autres nœuds sont construits un niveau à la fois. Le premier niveau comprend tous les petits SDV réalisables contenant un vol de plus que la racine et ainsi de suite. Ce vol est choisi parmi les nœuds opérationnels. Un nœud opérationnel est choisi si certaines conditions sont respectées. Les conditions ayant trait aux connexions entre deux vols comme les temps minimum et maximum de connexion et la concordance des aéroports s'appliquent. À ces dernières se rajoutent des conditions nécessaires pour valider le nouveau SDV créé. Le nouveau SDV doit respecter les contraintes de durée maximale d'un SDV et de nombre maximal de segments de vol dans un SDV. De plus, lorsqu'un vol est ajouté, son aéroport d'arrivée ne doit être ni un grand aéroport ni la base du pilote. Si nous prenions les vols provenant de grands aéroports, trop de possibilités s'offriraient pour la création de nouveaux SDV et le temps de résolution du problème ne serait plus acceptable. Si le vol ajouté est de type actif, le nouveau nœud SDV contribue une unité à la contrainte de couverture de ce vol.

Un arc de type *connection* relie le nœud représentant le nouveau SDV à son parent. Le coût sur cet arc est identique à celui d'un arc de type *connection* entre deux nœuds opérationnels. Toutes les consommations de ressources sur cet arc sont nulles.

Si possible, un arc de type *layover* relie le nouveau nœud SDV au premier nœud de la partie fixée finale. Les conditions d'existence de cet arc sont les mêmes que celles d'un arc entre le dernier nœud de la partie fixée initiale et le premier nœud de la partie fixée finale pour un pilote dont les statuts initial et final sont respectivement « Début de SDV » et « Fin de SDV ». Le coût et les consommations de ressource sur cet arc sont aussi les mêmes. Cependant, si le vol ajouté au SDV est actif et opérationnel, il y a une contribution d'une unité à la contrainte de couverture du vol en question.

Un arc de type *endline* relie aussi le nouveau nœud SDV au puits si l'aéroport où se termine le nouveau SDV est soit la base, soit un aéroport admissible. Le coût et les consommations de ressource sur cet arc est identique au coût et consommations de ressource sur un arc de type *endline* pour un pilote dont la condition initiale est « Début de SDV ».

Finalement, des arcs de type *layover* sont créés entre le nouveau SDV et les nœuds opérationnels si les conditions d'existence appropriées sont respectées. Ces conditions sont les mêmes que celles pour les arcs reliant le dernier nœud de la partie fixée initiale aux nœuds opérationnels dans le cas d'un pilote ayant « Début de SDV » comme statut initial. Le coût, les consommations de ressources sur ces arcs et les contributions aux contraintes de couverture sont aussi les mêmes. Notons que les arcs entre le dernier nœud de la partie fixée initiale et les nœuds opérationnels sont remplacés par les arcs entre les divers nœuds représentant de nouveaux SDV et les nœuds opérationnels.

5.9.2 Construction de l'arbre des SDV(j+1)

La construction de l'arbre des SDV(j+1) est très semblable à celle de l'arbre des SDV(j). Comme pour l'arbre des SDV(j), la racine de l'arbre des SDV(j+1) est un nœud représentant uniquement la partie fixée du petit SDV. Les autres nœuds sont construits

un niveau à la fois. Le premier niveau comprend tous les petits SDV réalisables contenant un vol de plus que la racine et ainsi de suite. Ce vol est choisi parmi les nœuds opérationnels. Un nœud opérationnel est choisi si certaines conditions sont respectées. Ces conditions sont presque identiques aux conditions de choix d'un nœud de l'arbre des SDV(j). Les conditions ayant trait aux connexions entre deux vols et les conditions de validité d'un SDV (durée maximale et nombre maximal de segments de vol) restent les mêmes. Lorsqu'un vol est ajouté, il faut vérifier cette fois-ci si l'aéroport d'arrivée du vol n'est ni un grand aéroport ni la base du pilote pour les mêmes raisons que précédemment. Par contre, si la durée maximale d'un SDV n'est pas respectée, nous vérifions si l'ajout d'un autre vol créerait un SDV respectant toutes les conditions. Si oui, le nœud SDV est créé. Cependant, les arcs reliant ce nœud aux nœuds des parties opérationnelle et fixée initiale ne sont pas créés. Si le vol ajouté au nouveau SDV est opérationnel et actif, le nouveau nœud SDV contribue une unité à la contrainte de couverture du vol.

Un arc de type *connection* relie le nœud représentant le nouveau SDV à son parent. Le coût et les consommations de ressources sont les mêmes que pour les arcs de type *connection* à l'intérieur d'un arbre de SDV(j).

Si possible, un arc de type *layover* relie le dernier nœud de la partie fixée initiale au nouveau SDV. Les conditions d'existence de cet arc sont les mêmes que celles d'un arc entre le dernier nœud de la partie fixée initiale et le premier nœud de la partie fixée finale pour un pilote dont les statuts initial et final sont respectivement « Début de SDV » et « Fin de SDV ». Le coût et les consommations de ressource sur l'arc sont également identiques à ceux de cet arc.

Finalement, des arcs sont créés entre les nœuds opérationnels et le nouveau SDV si les conditions d'existence appropriées sont respectées. Ces conditions sont les mêmes que celles pour les arcs reliant les nœuds opérationnels au premier nœud de la partie

fixée finale dans le cas d'un pilote ayant « Fin de SDV » comme statut final. Les coûts et consommations de ressource sont aussi identiques. Notons que les arcs entre les nœuds opérationnels et le premier nœud de la partie fixée finale sont remplacés par les arcs entre les nœuds opérationnels et les divers nœuds représentant de nouveaux SDV.

CHAPITRE 6 : ÉTUDES NUMÉRIQUES

Nous avons modélisé le problème de la gestion des équipages aériens pendant le jour des opérations en respectant toutes ou presque toutes les contraintes. Par la suite, nous avons ajouté des améliorations à notre modèle pour qu'il soit plus près de la réalité, pour obtenir de meilleures solutions et pour augmenter la vitesse d'exécution. Nous devons maintenant effectuer des tests afin de vérifier si tous les objectifs ont été atteints.

6.1 Modèle de base

Nous avons testé l'implantation informatique de notre modèle sur deux jeux de données : Problème 1 et Problème 2. Chacun de ces problèmes contient un certain nombre de perturbations critiques. Ces perturbations comprennent des retards de vols et des changements de l'avion prévu pour un vol donné. De plus, le Problème 2 contient une annulation de vol. Le Tableau 6.1 présente les différentes caractéristiques de ces deux problèmes. Notons que la troisième colonne représente le nombre de vols actifs dans la période opérationnelle.

Tableau 6.1 : Caractéristiques des problèmes de base

Nom du problème	Nombre de pilotes	Nombre de perturbations	Nombre de pilotes critiques	Nombre de vols opérationnels
Problème 1	36	9	9	102
Problème 2	45	10	10	141

Le Tableau 6.2 présente les résultats obtenus avec le modèle de base en termes de qualité de la solution. Rappelons que la qualité de la solution a été définie au chapitre 3. Nous nous servirons de ces résultats comme point de comparaison pour les autres tests. La deuxième colonne du tableau représente le nombre de vols non couverts dans

la solution; la troisième colonne représente le nombre de vols qui sont affectés à un pilote différent de celui de l'horaire original; la quatrième colonne est le nombre de pilotes pour lesquels il est impossible d'effectuer la fin de leur rotation opérationnelle après la période opérationnelle; la cinquième colonne indique le nombre de pilotes dont l'horaire a été modifié.

Tableau 6.2 : Qualité des solutions aux problèmes de base

Problème	Vols non couverts	Vols réaffectés	Fins non complétées	Horaires changés
Problème 1	1(1%)	53(52%)	0	31(86%)
Problème 2	2(1%)	64(45%)	1(2%)	34(76%)

Le Tableau 6.3 présente les détails sur la résolution du problème. Ces résultats serviront aussi de point de comparaison pour les autres problèmes. La deuxième colonne contient le nombre de nœuds dans l'ensemble des réseaux. La troisième colonne représente le nombre d'arcs dans l'ensemble des réseaux. La quatrième colonne contient le nombre de nœuds de branchement explorés lors de la résolution du problème. Les trois dernières colonnes représentent respectivement le temps de construction des réseaux et du problème maître, le temps de résolution du problème par GENCOL [17] et le temps total utilisé par le programme. Les temps de traitement des données et des résultats ne sont pas donnés. Les temps sont en secondes.

Tableau 6.3 : Résolution des problèmes de base

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps		
				réseaux	GENCOL	total
Problème 1	1664	6196	0	8.81	2.70	14.07
Problème2	2065	8940	4	13.00	6.00	21.71

Pour les deux problèmes, les temps de résolution sont très raisonnables. Le nombre de vols non couverts est petit, mais nous pouvons espérer le réduire. Beaucoup de vols ont été affectés à des pilotes différents de l'horaire original et beaucoup de pilotes ont subi des modifications à leur horaire. Des améliorations peuvent vraisemblablement être apportées à ces deux critères. Le nombre de pilotes ne pouvant reprendre leur horaire original après la période opérationnelle est très acceptable.

6.2 Ajout des pilotes en réserve

Afin d'avoir un modèle plus complet, couvrir plus de vols et utiliser toutes les ressources disponibles, nous avons ajouté des réseaux pour les pilotes en réserve à chaque base. Cependant, afin d'obtenir une solution de meilleure qualité (chapitre 3), nous avons ajouté une pénalité d'utilisation des pilotes en réserve. Chaque fois qu'un premier vol est affecté à un pilote en réserve, la pénalité s'applique, c'est-à-dire que la pénalité ne s'applique qu'une fois, peu importe le nombre de vols affectés au pilote en réserve.

Les Problèmes 1.1 et 2.1 correspondent respectivement aux Problèmes 1 et 2 auxquels nous avons ajouté les pilotes en réserve. Les Problèmes 1.2 et 2.2 correspondent quant à eux aux Problèmes 1.1 et 2.1 auxquels ont été ajoutées des pénalités sur l'utilisation des réserves. Le Tableau 6.4 présente ces quatre problèmes. La deuxième colonne représente le nombre de pilotes en réserve disponibles à chaque

base. Appelons les deux bases considérées Base1 et Base 2. Le premier nombre représente le nombre de pilotes disponibles à la Base 1 et le deuxième le nombre de pilotes disponibles à la Base 2. La troisième colonne contient la valeur de la pénalité pour l'utilisation d'un pilote en réserve.

Tableau 6.4 : Caractéristiques des problèmes avec réserves

Nom du problème	Pilotes en réserve		Pénalité
	Base 1	Base 2	
Problèmes 1.1 et 2.1	15	5	0
Problèmes 1.2 et 2.2	15	5	1000

Nous avons effectué les tests pour ces quatre problèmes. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 6.5. La deuxième colonne représente le nombre de vols non couverts dans la solution. La troisième colonne représente le nombre de pilotes de réserve auxquels ont été affectés un ou plusieurs vols. Les trois dernières colonnes correspondent aux trois dernières colonnes du Tableau 6.2.

Tableau 6.5 : Qualité des solutions aux problèmes avec réserves

Problème	Vols non couverts	Réserves utilisées	Vols réaffectés	Fins	Horaires changés
1.1	1(1%)	18(90%)	33(32%)	0	30(83%)
1.2	1(1%)	0	49(48%)	0	29(81%)
2.1	2(1%)	20(100%)	65(46%)	0	33(73%)
2.2	2(1%)	1(5%)	62(43%)	0	32(71%)

Les détails sur la résolution de ces problèmes sont présentés dans le Tableau 6.6 dont les colonnes sont identiques à celle du Tableau 6.3.

Tableau 6.6 : Résolution des problèmes avec réserves

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps		
				réseaux	GENCOL	total
1.1	1668	6384	3	8.81	3.30	13.77
1.2	1668	6384	0	8.93	2.60	14.06
2.1	2069	9244	8	12.91	5.70	22.76
2.2	2069	9244	1	12.69	5.30	21.37

L'ajout de pilotes en réserve devrait diminuer le nombre de vols non-couverts, mais n'a à peu près aucun effet sur les trois critères servant à évaluer la qualité de la solution (nombre de vols affectés à un pilote différent de l'horaire original, nombre de pilotes ne pouvant pas continuer leur horaire prévu après la période opérationnelle, nombre de pilotes dont l'horaire original a été modifié).

Notons tout d'abord que l'ajout de pilotes en réserve n'augmente ni le temps de construction du problème, ni le temps de résolution du problème. Comme prévu, le nombre de vols affectés à des pilotes différents de l'horaire original et le nombre de pilotes dont l'horaire original se trouve modifié reste sensiblement pareil. Dans le cas du Problème 2, le nombre de pilotes ne pouvant poursuivre leur horaire original après la période opérationnelle est diminué. Le nombre de vols non couverts ne diminue pas. Ceci est dû au fait que les problèmes ne contiennent qu'un petit nombre de vols de mise en place dont aucun ne peut servir à emmener un pilote de sa base à l'aéroport de départ d'un vol opérationnel. Les pilotes en réserve ne peuvent donc pas être pleinement utilisés.

Par ailleurs, l'ajout de pénalités sur les pilotes en réserve réduit énormément le nombre de pilotes en réserve utilisés tout en maintenant la qualité des solutions. Ces pénalités sont donc efficaces pour l'utilisation judicieuse des pilotes en réserve.

6.3 Ajout des vols non affectés

Le jour des opérations, il se peut qu'un pilote ne soit pas disponible, qu'un vol soit rajouté à la dernière minute ou encore qu'un vol n'ait été affecté à aucun pilote dans la planification. Tous ces vols qui appartiennent à la période opérationnelle sont considérés comme étant des vols non affectés. Nous avons ajouté des vols de ce type aux problèmes pour obtenir un modèle plus complet, c'est-à-dire représentant mieux la réalité.

Les problèmes contenant des vols non affectés ont été construits à partir des Problèmes 1.2 et 2.2. Ils contiennent donc la possibilité d'utiliser des pilotes en réserve moyennant une pénalité. Les caractéristiques des problèmes sont présentées dans le Tableau 6.7. La première colonne contient le nom du problème; la deuxième, le nombre de vols contenus dans la période opérationnelle incluant les vols non affectés; la troisième, le nombre de vols non affectés parmi l'ensemble des vols opérationnels.

Tableau 6.7 : Caractéristiques des problèmes avec vols non affectés

Nom du problème	Nombre de pilotes	Nombre de vols opérationnels	Nombre de vols non affectés
1.2l	36	103	1
1.2d	35	102	3
1.2t	35	102	4
2.2l	45	143	2
2.2d	44	141	3
2.2ld	44	143	5

Comme mentionné précédemment, trois types de vols non affectés peuvent être ajoutés aux problèmes existants afin d'en créer de nouveaux. Si un vol est ajouté à un problème ou si un vol n'était affecté à aucun pilote dans la planification, la lettre « l » est ajoutée à la fin du nom du problème pour obtenir le nom du nouveau problème. Si les vols non affectés proviennent de l'horaire d'un pilote absent, la lettre « d » ou « t » est ajoutée à la fin du nom du problème pour obtenir le nom du nouveau problème. La lettre « d » est ajoutée si le pilote est absent pour un seul service de vol et « t » s'il est absent pour une rotation complète. De plus, si les vols non affectés proviennent de l'horaire d'un pilote absent, le nouveau problème comprend un pilote de moins que le problème original. Si un problème contient des vols non affectés ajoutés ainsi que des vols non affectés provenant de l'horaire d'un pilote absent, toutes les lettres correspondantes sont ajoutées.

Nous avons effectué des tests sur ces six problèmes. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.8 où les colonnes sont identiques à celles du Tableau 6.5.

Tableau 6.8 : Qualité des solutions aux problèmes avec vols non affectés

Problème	Vols non couverts	Réserves	Vols réaffectés	Fins	Horaires changés
1.2l	1(1%)	0	53(51%)	0	28(78%)
1.2d	1(1%)	0	55(54%)	0	30(86%)
1.2t	1(1%)	0	47(46%)	0	29(83%)
2.2l	2(1%)	2(10%)	58(41%)	0	34(76%)
2.2d	3(2%)	1(5%)	46(33%)	0	27(61%)
2.2ld	3(2%)	2(10%)	56(39%)	0	32(73%)

Les détails sur la résolution des problèmes sont présentés dans le Tableau 6.9 où les colonnes sont identiques à celles du Tableau 6.3.

Tableau 6.9 : Résolution des problèmes avec vols non affectés

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps		
				réseaux	GENCOL	total
1.2l	1670	6471	0	8.83	2.60	14.70
1.2d	1631	6253	0	8.45	1.90	13.24
1.2t	1633	6209	0	8.71	2.20	14.11
2.2l	2073	9424	1	13.06	3.70	20.25
2.2d	2025	9061	1	12.32	3.60	19.28
2.2ld	2029	9237	2	12.55	4.80	20.52

Les temps de résolution et de construction des réseaux restent sensiblement les mêmes que précédemment. Dans deux cas (problèmes 2.2d et 2.2ld), le nombre de vols non-couverts augmente légèrement. Comme mentionné avant, l'ajout des vols de mise en place appropriés devrait régler le problème. Peu de pilotes en réserve sont utilisés et tous les pilotes sont en mesure de reprendre leur horaire original après la période opérationnelle. Le nombre de vols affectés à un pilote différent de celui de l'horaire original et le nombre de pilotes dont l'horaire est modifié sont assez grands.

6.4 Un réseau par pilote

Nous avons créé des copies de tous les arcs *connection* de la partie opérationnelle pour obtenir un ensemble d'arcs unique à chaque pilote. Nous avons ainsi éliminé l'ensemble d'arcs qui était partagé par tous les réseaux. Le Tableau 6.10 présente des groupes de paramètres pour des problèmes où chaque réseau est composé d'un seul ensemble d'arcs qui lui est propre.

6.4.1 Pénalités sur les changements d'avion et sur les vols non planifiés

Afin d'améliorer la qualité de la solution, nous avons ajouté des pénalités sur les changements d'avion et sur les vols non planifiés. La pénalité sur les changements d'avion sert à ce que le pilote reste autant que possible dans le même avion pendant tout un service de vol. Ceci n'a que peu d'effet sur les critères servant à évaluer la qualité d'une solution et améliore surtout le degré de satisfaction des pilotes ainsi que la robustesse de la solution. La valeur de cette pénalité est indiquée dans la deuxième colonne du Tableau 6.10.

Les pénalités sur les vols non planifiés servent à améliorer la qualité de la solution, c'est-à-dire à minimiser le nombre de changements apportés aux horaires originaux des pilotes. Les pénalités sur les vols non planifiés comprennent deux coûts distincts. Une « grande » pénalité est imposée si un vol actif ou de mise en place est affecté à un pilote différent de celui auquel il était affecté dans l'horaire original. Une « petite » pénalité est imposée si un vol actif de l'horaire original d'un pilote est remplacé par une mise en place sur ce même vol. Ces pénalités peuvent s'accumuler le long d'un chemin dans un réseau. Elles ne doivent donc pas être trop grandes afin de ne pas nuire à la couverture des vols. La valeur de ces deux pénalités est indiquée dans la troisième colonne du Tableau 6.10.

6.4.2 Pénalités de débordement de la rotation prévue

Nous avons introduit une nouvelle pénalité afin d'inciter davantage la solution à s'approcher de l'horaire original. Cette pénalité représente aussi un coût réel pour les compagnies aériennes et sert donc à améliorer le modèle en plus d'améliorer la solution. Lorsque, dans la solution modifiée, un pilote commence sa rotation avant l'heure prévue dans l'horaire original ou qu'il finit sa rotation après l'heure prévue dans l'horaire

original, il faut lui verser un supplément sur les heures de vols qui débordent de l'horaire prévu pour la rotation. Les deux dernières colonnes du Tableau 6.10 indiquent si les coûts de débordement de la rotation prévue ont été ajoutés.

Tableau 6.10 : Caractéristiques des problèmes à un réseau par pilote

Groupes de paramètres	Pénalités			Draft premium	
	changement d'avion	vol non planifié		début	fin
		grande	petite		
P0	0	0	0	non	non
P1	10	25	5	non	non
P2	10	25	5	oui	oui

Les résultats des tests sur les problèmes du Tableau 6.10 sont présentés dans le Tableau 6.11. La deuxième colonne donne le nom du groupe de paramètres pour le problème. La troisième colonne représente le nombre de vols non couverts dans la solution. Les quatre colonnes suivantes sont identiques à celles du Tableau 6.8. La dernière colonne représente le temps de vol débordant du début ou de la fin de la rotation opérationnelle d'un pilote. Ce temps est indiqué en heures et en minutes.

Tableau 6.11 : Qualité des solutions aux problèmes à un réseau par pilote

Problème	Para-mètres	Vols non-couverts	Réserves utilisés	Vols réaffectés	Fins	Horaires changés	Temps draft
1.2.0	P0	1(1%)	0	41(40%)	0	28(78%)	17:28
1.2.1	P1	1(1%)	0	30(29%)	0	19(53%)	10:07
1.2.2	P2	1(1%)	0	30(29%)	0	19(53%)	10:07
1.2l.0	P0	1(1%)	0	49(48%)	0	27(75%)	26:29
1.2l.1	P1	1(1%)	0	32(31%)	0	21(58%)	11:01
1.2l.2	P2	1(1%)	0	32(31%)	0	21(58%)	11:01
1.2d.0	P0	1(1%)	0	48(47%)	0	28(80%)	24:19
1.2d.1	P1	1(1%)	0	32(31%)	0	21(60%)	16:25
1.2d.2	P2	1(1%)	0	32(31%)	0	21(60%)	16:25
1.2t.0	P0	1(1%)	0	45(44%)	0	28(80%)	22:50
1.2t.1	P1	1(1%)	0	31(30%)	0	21(60%)	16:03
1.2t.2	P2	1(1%)	0	35(34%)	0	21(60%)	15:17
2.2.0	P0	2(1%)	1(5%)	48(34%)	0	32(71%)	13:01
2.2.1	P1	2(1%)	1(5%)	29(21%)	0	21(47%)	07:36
2.2.2	P2	2(1%)	1(5%)	31(22%)	0	19(42%)	06:25
2.2l.0	P0	2(1%)	2(10%)	46(32%)	0	28(62%)	18:00
2.2l.1	P1	2(1%)	2(10%)	30(21%)	0	22(49%)	10:19
2.2l.2	P2	2(1%)	2(10%)	33(23%)	0	19(42%)	08:18
2.2d.0	P0	3(2%)	1(5%)	52(37%)	0	27(61%)	17:48
2.2d.1	P1	3(2%)	1(5%)	33(23%)	0	21(48%)	12:31
2.2d.2	P2	3(2%)	1(5%)	35(25%)	0	21(48%)	11:17
2.2ld.0	P0	3(2%)	2(10%)	52(36%)	0	29(66%)	23:25
2.2ld.1	P1	3(2%)	2(10%)	31(22%)	0	22(50%)	16:25
2.2ld.2	P2	3(2%)	2(10%)	36(25%)	0	21(48%)	13:09

Tableau 6.12 : Résolution des problèmes à un réseau par pilote

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps		
				réseaux	GENCOL	total
1.2.0	1668	56778	2	44.32	4.50	52.94
1.2.1	1668	56788	0	43.95	3.30	51.71
1.2.2	1668	56788	0	45.02	3.30	52.82
1.2l.0	1670	58049	0	45.51	3.40	54.04
1.2l.1	1670	58049	0	43.13	3.60	51.46
1.2l.2	1670	58049	0	44.28	3.00	52.05
1.2d.0	1631	55285	1	40.93	3.10	48.57
1.2d.1	1631	55285	0	40.85	2.60	47.96
1.2d.2	1631	55285	0	41.54	3.10	48.97
1.2t.0	1633	55241	0	41.93	2.70	49.58
1.2t.1	1633	55241	0	41.78	2.80	49.77
1.2t.2	1633	55241	0	42.23	3.60	50.93
2.2.0	2069	84684	0	91.09	5.70	102.72
2.2.1	2069	84684	0	90.18	6.50	102.58
2.2.2	2069	84684	0	91.63	6.60	104.11
2.2l.0	2073	86704	0	92.85	7.20	105.52
2.2l.1	2073	86704	0	93.20	6.40	104.55
2.2l.2	2073	86704	0	93,90	7.70	106.32
2.2d.0	2025	82861	1	88.89	6.50	99.27
2.2d.1	2025	82861	0	87.34	7.60	99.69
2.2d.2	2025	82861	0	88.53	7.00	100.27
2.2ld.0	2029	84837	1	89.73	6.40	100.93
2.2ld.1	2029	84837	0	90.13	7.30	103.05
2.2ld.2	2029	84837	0	91.24	7.30	104.37

Le Tableau 6.12 contient les détails sur la résolution des problèmes tests. Les colonnes sont identiques à celles du Tableau 6.3.

L'élimination de l'ensemble d'arcs partagé par tous les réseaux n'a pas modifié la valeur de la solution. Les critères de qualité pour la solution peuvent être différents puisque deux solutions différentes ayant le même coût peuvent exister. Cependant, le temps de construction des réseaux est grandement augmenté. Les temps de résolution sont semblables.

L'ajout des pénalités sur les changements d'avion et les vols non planifiés ne change pas le nombre de vols non couverts ni les temps de résolution et de construction du problème. Le nombre de vols affectés à un pilote différent de l'horaire original diminuent de 25% à 35% de sa valeur initiale tandis que le nombre de pilotes dont l'horaire est modifié diminue de 20% à 35% de sa valeur initiale. Nous obtenons donc une bonne amélioration de la qualité de la solution avec les pénalités implantées.

Les pénalités sur les débordements de la rotation prévue ont eu pour effet de diminuer ou, au pire, de maintenir le nombre d'heures de vol débordant du début et de la fin des rotations prévues des pilotes. La diminution d'heures de débordement des rotations prévues des pilotes est de 8.7% en moyenne (de 0% à 19.9%). Ceci permet à la compagnie aérienne de payer le moins de pénalités de débordement de la rotation prévue possible lors de la réorganisation des horaires et donc de réduire le coût de la réorganisation des horaires. L'ajout des pénalités de débordement de la rotation prévue n'a pas augmenté les temps de construction et résolution du problème.

6.4.3 Nettoyage des réseaux

L'élimination de l'ensemble d'arcs partagé par tous les réseaux a augmenté de façon importante le temps de construction des réseaux. Le nettoyage des réseaux

consiste à ne pas créer les arcs qui ne pourront pas être empruntés dans la construction d'un chemin dans le réseau d'un pilote. Nous avons testé le nettoyage des réseaux sur les problèmes des deux tableaux précédents dont les pénalités sur les changements d'avion, vols non planifiés et de débordement de la rotation prévue ne sont pas nulles. Les nouveaux temps obtenus sont présentés dans le Tableau 6.13.

Tableau 6.13 : Résolution des problèmes nettoyés

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps		
				réseaux	GENCOL	total
1.2.2	1668	48880	0	40.00	3.00	47.20
1.2l.2	1670	49907	0	40.95	2.80	48.28
1.2d.2	1631	47387	0	38.35	2.80	45.32
1.2t.2	1633	47554	0	39.15	3.30	46.55
2.2.2	2069	63813	0	67.09	5.60	77.51
2.2l.2	2073	65227	0	68.5	6.40	79.7
2.2d.2	2025	62067	0	65.18	5.80	75.37
2.2ld.2	2029	63437	0	66.99	6.10	77.30

Notons tout d'abord que, pour chacun des problèmes, la valeur de la fonction objectif est restée la même, que le nettoyage des réseaux soit utilisée ou non. Le nombre de nœuds reste le même, mais le nombre d'arcs diminue de 19.5% en moyenne (entre 14% et 25%). Le temps de construction des réseaux est diminué de 7% à 27% des temps initiaux tandis que les temps totaux sont réduits de 7% à 25% des temps initiaux obtenus.

6.5 Période opérationnelle couvrant plus d'un SDV

Afin d'améliorer la solution tout en gardant des temps de construction et de résolution raisonnables, nous avons étiré la période opérationnelle afin qu'elle couvre un peu plus d'un SDV pour certains pilotes. Ceci nous donne plus de jeu pour réorganiser les horaires des pilotes. Pour éviter de trop allonger les temps de construction et de résolution du problème, nous énumérons les possibilités pour la portion opérationnelle de SDV la plus petite. De plus, lors de l'énumération, la portion opérationnelle du SDV ne peut contenir de connexions dans de grands aéroports pour que le nombre de possibilités de complétion du SDV soit raisonnable. Finalement, dans l'horaire original, la portion opérationnelle du SDV à énumérer ne peut contenir de connexions dans de grands aéroports afin que la solution originale puisse être reproduite.

Nous avons créé des problèmes avec des périodes opérationnelles couvrant un peu plus d'un SDV à partir des problèmes utilisés pour tester le nettoyage des réseaux. Ces problèmes sont présentés dans le Tableau 6.14. La première colonne contient le nom du problème. Si seulement des SDV(j+1) sont construits dans le problème, le nom du problème porte la lettre « a ». Si des SDV(j+1) et des SDV(j) sont construits, le nom du problème porte la lettre « b ». La deuxième colonne représente le nombre de pilotes dont la portion opérationnelle de SDV la plus courte est celle du premier SDV, soit SDV(j). La troisième colonne représente le nombre de pilotes dont la portion opérationnelle de SDV la plus courte appartient au deuxième SDV opérationnel, soit SDV(j+1).

Tableau 6.14 : Caractéristiques des problèmes couvrant plus d'un SDV

Problème	SDV(j)	SDV(j+1)	Vols opérationnels
1.2.2a	0	12	118
1.2.2b	10	12	129
1.2l.2a	0	12	119
1.2l.2b	10	12	130
1.2d.2a	0	11	118
1.2d.2b	10	11	129
1.2t.2a	0	12	118
1.2t.2b	10	12	129
2.2.2a	0	12	163
2.2.2b	13	19	176
2.2l.2a	0	19	165
2.2l.2b	13	19	178
2.2d.2a	0	19	163
2.2d.2b	13	19	176
2.2ld.2a	0	19	165
2.2ld.2b	13	19	178

Les résultats des tests effectués sur les problèmes du Tableau 6.10 sont présentés dans le Tableau 6.15. Les colonnes du tableau sont identiques à celles du Tableau 6.5.

Tableau 6.15 : Qualité des solutions aux problèmes couvrant plus d'un SDV

Problème	Vols non-couverts	Réserves	Vols réaffectés	Fins	Horaires changés
1.2.2a	1(1%)	0	33(28%)	0	20(56%)
1.2.2b	0	0	38(29%)	0	21(58%)
1.2l.2a	1(1%)	0	31(26%)	0	20(56%)
1.2l.2b	0	0	40(31%)	0	22(61%)
1.2d.2a	0	0	45(38%)	0	22(63%)
1.2d.2b	0	0	45(35%)	0	22(63%)
1.2t.2a	0	0	45(38%)	0	22(63%)
1.2t.2b	0	0	39(30%)	0	22(63%)
2.2.2a	2(1%)	0	40(25%)	0	20(44%)
2.2.2b	2(1%)	0	40(25%)	0	20(44%)
2.2l.2a	2(1%)	2(10%)	40(24%)	0	18(40%)
2.2l.2b	2(1%)	2(10%)	39(22%)	0	18(40%)
2.2d.2a	3(2%)	1(5%)	39(24%)	0	20(45%)
2.2d.2b	2(1%)	2(10%)	40(25%)	0	20(45%)
2.2ld.2a	3(2%)	2(10%)	45(27%)	0	20(45%)
2.2ld.2b	2(1%)	3(15%)	41(24%)	0	21(48%)

Les détails sur la résolution des problèmes du Tableau 6.14 sont présentés dans le Tableau 6.16. Les quatre premières colonnes sont identiques à celle du Tableau 6.3. La cinquième colonne contient le temps nécessaire pour construire l'ensemble des arbres d'énumération des portions de SDV. Les trois dernières colonnes sont identiques aux trois dernières colonnes du Tableau 6.3.

Tableau 6.16 : Résolution des problèmes couvrant plus d'un SDV

Problème	Nœuds	Arcs	Nœuds de branchement	Temps			
				réseaux		GENCOL	total
				arbres	total		
1.2.2a	1793	52700	2	11.10	56.21	7.40	69.40
1.2.2b	1875	57331	0	14.70	63.50	6.40	74.39
1.2l.2a	1795	53729	2	11.43	58.07	7.70	70.33
1.2l.2b	1877	58484	0	14.90	65.25	7.60	78.11
1.2d.2a	1742	51126	0	10.34	54.88	4.60	64.67
1.2d.2b	1824	55491	0	13.34	60.54	7.10	72.15
1.2t.2a	1758	51504	0	11.51	56.61	3.90	65.36
1.2t.2b	1840	55952	0	14.89	63.45	8.30	76.41
2.2.2a	2239	69824	0	16.30	95.65	8.00	110.59
2.2.2b	2357	76441	12	20.97	110.15	60.80	176.12
2.2l.2a	2243	71250	25058	17.06	100.42	88454.0	90411.60
2.2l.2b	2361	77927	66753	21.17	112.99	345347.0	350984.0
2.2d.2a	2195	67972	0	16.25	93.04	7.80	105.67
2.2d.2b	2313	74589	0	21.05	107.81	9.80	122.41
2.2ld.2a	2199	69354	12	16.35	95.97	37.30	138.84
2.2ld.2b	2317	76031	0	21.10	110.16	8.80	124.04

Les résultats obtenus montrent que l'allongement des périodes opérationnelles à un peu plus d'un SDV permettent généralement (50% des problèmes) de couvrir plus de vols. Le nombre de vols affectés à un pilote différent de l'horaire original augmente de 1% en moyenne (entre –5% et 7%). Le nombre de pilotes dont l'horaire original est modifié augmente de 1% en moyenne (entre –3% et 5%). Ces nombres sont très raisonnables étant donné que la réorganisation des horaires se fait sur une plus longue

période. En effet, plus la période opérationnelle est longue, plus elle contient de vols appartenant à chaque pilote. Il devient alors plus difficile de maintenir l'horaire original d'une grande partie des pilotes.

Les temps de construction des réseaux ont augmenté. Ceci s'attribue au fait que les réseaux sont plus gros : la partie opérationnelle contient plus de nœuds et d'arcs et les arcs reliant la partie opérationnelle aux autres parties du réseau sont aussi plus nombreux. Le nombre de nœuds a augmenté de 8% pour les problèmes portant la lettre « a » et de 13% en moyenne (entre 12% et 14%) pour les problèmes portant la lettre « b ». Le nombre d'arcs augmente de 8.5% en moyenne (entre 8% et 9%) pour les problèmes portant la lettre « a » et de 18.5% en moyenne (entre 17% et 20%) pour les problèmes portant la lettre « b ». Les temps de résolution du problème ont aussi augmenté à cause de la grosseur des réseaux.

Notons que tous les problèmes ont été résolus de façon optimale, c'est-à-dire avec une méthode de branchement optimale. Dans certains cas, ce branchement est très long puisqu'il est optimal. Pour diminuer le temps de résolution, nous pouvons remplacer cette méthode de branchement par d'autres méthodes de branchement heuristiques qui donneront de très bons résultats en beaucoup moins de temps.

6.6 Branchement heuristique

Nous avons effectué des tests sur tous les problèmes dont la résolution comportait un nombre de nœuds de branchement non nul. Pour ces problèmes, nous avons changé la méthode de branchement pour une méthode heuristique (cfix). Cette méthode consiste à fixer une colonne complète à chaque étape du branchement. Ainsi, seule une partie de l'arbre de branchement est explorée. Les noms de ces problèmes portent la lettre « c » à la fin. Les résultats sont présentés dans le Tableau 6.17. La

deuxième colonne donne l'écart en pourcentage entre la solution obtenue avec le branchement optimal et la solution obtenue avec le branchement heuristique.

Tableau 6.17 : Résolution des problèmes avec un branchement heuristique

Problème	Écart	Nœuds de branchement	Temps			
			réseaux		GENCOL	total
			arbres	total		
2c	0%	3	0	12.5	5.10	20.91
1.1c	0%	3	0	8.65	1.80	13.65
2.1c	0%	7	0	12.5	4.30	19.98
2.2c	0%	1	0	12.5	4.50	20.20
2.2lc	0%	1	0	12.77	3.60	19.69
2.2dc	0%	1	0	12.01	3.60	18.79
2.2ldc	0%	4	0	12.31	5.70	21.19
1.2.0c	0%	1	0	42.95	4.00	51.69
1.2d.0c	0%	1	0	41.62	3.30	49.41
2.2d.0c	0%	1	0	88.70	6.60	100.46
2.2ld.0c	0%	1	0	92.30	7.30	104.77
1.2.2ac	0.0118%	2	11.14	56.87	5.90	67.14
1.2l.2ac	0.0182%	2	11.34	58.67	6.90	70.29
2.2.2bc	0.0170%	3	21	111.11	19.60	135.74
2.2l.2ac	0%	4	16.53	99.29	12.50	116.78
2.2l.2bc	0%	13	21.79	116.86	30.20	152.30
2.2ld.2ac	0%	1	17.16	97.91	9.60	112.24

Les temps de résolution ont diminué de 10.5% en moyenne (entre –15% et 69%). Le branchement heuristique est surtout efficace pour les problèmes où des arbres de

SDV sont construits (diminution du temps de résolution de 40% en moyenne; valeurs comprises entre 3% et 69%). Les solutions sont très près de l'optimum et l'optimalité est même atteinte dans douze des dix-sept cas.

6.7 Conclusion

Pour tous les problèmes, nous avons obtenu des solutions de bonne qualité et ce, en particulier après avoir amélioré le modèle. Les temps de résolutions très raisonnables permettent de résoudre efficacement les problèmes de petite et moyenne tailles en temps réel.

Cependant, nous rappelons que, pour obtenir la plus grande couverture de vols possible, il faut ajouter les vols de mise en place permettant les déplacements des bases vers les autres aéroports. Sans ses vols, les pilotes en réserve ne peuvent être utilisés à leur plein potentiel.

CHAPITRE 7 : CONCLUSION

Nous voulions modéliser et résoudre le problème de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations. Nous devions respecter à la fois les contraintes de rotation et de SDV, les contraintes de bloc et les contraintes opérationnelles. De plus, le problème devait être résolu en temps réel afin que sa solution puisse être appliquée. Nous avons construit un modèle de base qui respecte toutes les contraintes énumérées. Nous avons ensuite testé ce modèle sur des problèmes de taille moyenne. Pour chacun des tests, le problème a été résolu à optimalité en très peu de temps.

Par la suite, nous avons ajouté des améliorations au modèle de base. Ces améliorations pouvaient avoir plusieurs objectifs : rendre le modèle plus conforme à la réalité, améliorer la qualité de la solution et accélérer le temps d'exécution du programme.

Nous avons ajouté les pilotes en réserve au modèle afin de le compléter et de couvrir un plus grand nombre de vols. Le temps de résolution n'a pas augmenté, mais aucun vol supplémentaire n'a été couvert. Ceci est dû au fait que le modèle ne contient aucun vol de mise en place pour amener un pilote de sa base vers un autre aéroport. L'ajout de ces vols permettrait une utilisation plus efficace des pilotes en réserve. De plus, dans un des tests, l'ajout des pilotes en réserve a permis de réorganiser les horaires de façon à ce que tous les pilotes soient en mesure de reprendre leurs activités prévues après la période opérationnelle.

Afin d'utiliser un minimum de pilotes en réserve, nous avons ajouté une pénalité sur leur utilisation. Cette pénalité a eu pour effet de diminuer énormément (90% à 95%) le nombre de pilotes de réserve utilisés dans la solution et ce, sans augmenter le nombre de vols non couverts. La pénalité est donc très efficace pour l'utilisation judicieuse des pilotes en réserve.

Comme il peut arriver que des vols ne soient affectés à aucun pilote lors de la planification pour de multiples raisons, nous avons ajouté les vols non affectés à notre modèle. Nous avons ainsi obtenu un modèle plus complet pour lequel le temps de résolution n'a pas augmenté.

Par la suite, nous avons éliminé l'ensemble d'arcs partagé par tous les réseaux. Chaque réseau est maintenant composé d'un ensemble d'arcs qui lui est propre. Ce changement a augmenté le temps de génération des réseaux, mais permet des améliorations auparavant impossibles.

Nous avons ajouté des pénalités sur les changements d'avion et sur les vols non planifiés afin d'améliorer la qualité de la solution. Les pénalités sur les changements d'avion ont permis d'obtenir des solutions plus robustes et plus satisfaisantes pour les pilotes. Les pénalités sur les vols non planifiés avaient pour but d'inciter la solution à se rapprocher le plus possible de l'horaire original. Ces pénalités ont diminué le nombre de vols affectés à des pilotes différents de l'horaire original de 25% à 35% et le nombre de pilotes dont l'horaire est modifié de 20% à 35%. Les deux types de pénalités ont donc eu pour effet d'améliorer sensiblement la qualité de la solution sans augmenter le temps d'exécution du programme.

Nous avons ensuite ajouté des pénalités sur les débordements de la rotation opérationnelle prévue. Ces pénalités correspondent à des coûts réels pour les compagnies aériennes et servent donc à compléter le modèle. Comme elles incitent le modèle à reproduire l'horaire original, ces pénalités se trouvent aussi à améliorer la qualité de la solution. Lors des tests, les pénalités sur les débordements de la rotation prévue ont permis de diminuer le nombre d'heures de vol débordant du début ou de la fin des rotations opérationnelles prévues des pilotes de 8.7% en moyenne. Elles

réduisent ainsi le coût réel de la solution (coût de la réorganisation pour la compagnie) sans augmenter le temps d'exécution du programme.

Comme mentionné précédemment, la création d'un seul ensemble d'arcs pour chaque réseau a augmenté le temps de génération des réseaux. Pour réduire cette augmentation de temps, nous avons introduit le nettoyage des réseaux. Le nettoyage des réseaux consiste à éviter de créer les arcs inutiles dans chaque réseau. Le nettoyage des réseaux a diminué le nombre d'arcs total de 19.5% en moyenne et a réduit les temps de génération des réseaux de 7% à 27%. Cette amélioration a donc contribué à rendre le programme plus efficace.

Afin de couvrir plus de vols tout en maintenant des temps de construction et résolution raisonnables, nous avons allongé la période opérationnelle pour qu'elle couvre un peu plus d'un SDV pour certains pilotes. Ceci nous laisse plus de jeu pour réorganiser les horaires des pilotes permettant ainsi de couvrir plus de vols.

Nous énumérons toutes les façons de compléter le SDV dont la partie opérationnelle est la plus courte. Ceci nous évite de recourir à des ressources supplémentaires qui allongeraient le temps de résolution. Nous avons créé deux modèles d'arbres d'énumération : un pour compléter le SDV si celui-ci est le premier des deux SDV dont une partie est réorganisée et un pour compléter le SDV si celui-ci est le deuxième des deux SDV dont une partie est réorganisée. Des conditions sont posées afin que le nombre de façons de compléter les SDV ne soit pas trop grand et que la construction des arbres ne prenne pas trop de temps.

Nous avons effectué des tests sur des problèmes de taille moyenne. Le nombre de vols non couverts diminue dans la moitié des cas tandis que la qualité de la solution reste stable. Comme la couverture des vols est l'objectif premier de la gestion des équipages aériens durant la journée des opérations, cette dernière amélioration au

modèle de base est donc très importante. Les problèmes ont pu être résolus à optimalité en temps très raisonnable dans la plupart des cas. Dans certains cas, le temps de résolution est plus élevé. Ceci est causé par un temps anormalement long utilisé par le branchement. En utilisant une méthode de branchement heuristique, nous obtenons une solution presque optimale (0.0182% de différence entre la solution heuristique et la solution optimale dans le pire des cas) en temps très satisfaisant. Souvent, la solution heuristique est même égale à la solution optimale.

Nous avons finalement un modèle pour le problème de gestion des équipages aériens durant la journée des opérations. Ca modèle est très réaliste et produit des solutions de bonne qualité qui respectent toutes les contraintes énumérées au début. De plus, les solutions sont produites en des temps très raisonnables, ce qui permet d'utiliser ce système en temps réel.

RÉFÉRENCES

[1] HOFFMAN, K. L. et PADBERG, M., (1993). Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branc-and-Cut, *Management Science* **39**, 657-682.

[2] GRAVES, G. W., MCBRIDGE, R. D., GERSHKOFF, I., ANDERSSON, D. et MAHIDHARÉ, D., (1993). Flight Crew Scheduling, *Management Science* **39**, 736-745.

[3] 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.

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

[5] BARNHART, C., JOHNSON, E. L., ANBIL, R. A. et HATAY, L., (1994). A Column Generation Technique for the Long-Haul Crew Assignment Problem, *Optimization in Industry 2 : Mathematical Programming and Modeling*, T. A. Crainic et R. Leachman (eds), John Wisley and Sons, New York, 7-22.

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

[7] GAMACHE, M., SOUMIS, F. MARQUIS, G. et J. DESROSIERS, J., (1999). A Column Generation Approach for Large-Scale Aircrew Rostering Problems, *Operations Research* **47**, No. 2, 247-263.

[8] VANCE, P. H., BARNHART, C., JOHNSON, E. L. et NEMHAUSER, G. L., (1997). Airline Crew Scheduling : A New Formulation and Decomposition Algorithm, *Operations Research* **45**, 188-200.

[9] GAMACHE, M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., DESROSIERS, J. et GÉLINAS, É., (1998). The Preferential Bidding System at Air Canada, *Transportation Science* **32**, 246-255.

[10] DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., GAMACHE, M. et SOUMIS, F., (1997). Crew Scheduling in Air Transportation, *Les Cahiers du GERAD G-97-26*, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada, H3T 2A7.

[11] WEI, G. et G. YU, G., (1997). Optimization Model and Algorithm for Crew Management During Airline Irregular Operations, *Journal of Combinatorial Optimization* **1**, 305-321.

[12] STOJKOVIC, M., SOUMIS, F. et DESROSIERS, J., (1998). The Operational Crew Scheduling Problem, *Transportation Science* **32**, No. 3, 232-245.

[13] STOJKOVIC, M. et SOUMIS, F., (2000). An Optimization Model for the Simultaneous Operational Flight and Pilot Scheduling Problem, *Les cahiers du GERAD G-2000-01*, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada, H3T 2A7.

[14] STOJKOVIC, M. et SOUMIS, F., (2000). The Operational and Multi-Crew Scheduling Problem, *Les Cahiers du GERAD G-2000-27*, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada, H3T 2A7.

[15] EL MOUDANI, W., BILEGAN, C. I., HANDOU, M. et MORA-CAMINO, F., (1999). An Operational Approach for the Airlines Crew Rostering Problem Based on Artificial Intelligence Techniques, LAAS du CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, Toulouse, France, 31077.

[16] EL MOUDANI, W. et MORA-CAMINO, F., (1999). A Fuzzy Solution Approach for the Roster Planning Problem, LAAS du CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, Toulouse, France, 31077.

[17] VILLENEUVE, D., (1999). Logiciel de génération de colonnes, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Canada.