

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**GESTION SIMULTANÉE DES VOLS, DES AVIONS
ET DES ÉQUIPAGES
DURANT LES OPERATIONS JOURNALIÈRES**

**THIERRY HÉRAUD
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)**

MAI 2005

© Thierry Héraud, 2005.



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-47669-7
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-47669-7

NOTICE:

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

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

AVIS:

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

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

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

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

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

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


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

GESTION SIMULTANÉE DES VOLS, DES AVIONS
ET DES ÉQUIPAGES
DURANT LES OPERATIONS JOURNALIÈRES

présenté par : HÉRAUD Thierry

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

a dûment été accepté par le jury constitué de

M.TRÉPANIÉ Martin, Ph.D., président

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

M.ROUSSEAU Louis-Martin, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Cette page est de loin la plus difficile à écrire, principalement parce qu'elle est la plus ingrate. Comme je ne pourrai pas énumérer de façon exhaustive toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la rédaction de ce mémoire; je me contera donc d'en citer quelques-unes, tout en m'excusant sincèrement auprès de celles qui en sont absentes.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche, François Soumis, pour ses judicieux conseils, pour la confiance qu'il m'a manifestée ainsi que pour ses encouragements soutenus tout au long de ma maîtrise. J'aimerais aussi lui présenter ma gratitude pour son aide financière qui m'a permis de me concentrer entièrement à mes études.

Un remerciement tout particulier doit aller à Mirela Stojković et à François Lessard qui m'ont permis de mener à bien cette aventure en m'aidant patiemment au sein du GERAD. Je suis aussi reconnaissant pour les nombreuses heures que Mirela a passé avec moi pour m'expliquer ce qui ne me semblait pas clair.

Je désire remercier également la compagnie AD OPT Technologies et en particulier Benoît Larouche pour le support qu'il m'a offert en me fournissant les données et les programmes nécessaires à la réalisation de mon travail. Je dois aussi également remercier Yann-Gaël Gueheneuc pour sa précieuse aide et ses nombreuses recommandations lors de la création de l'interface graphique.

Finalement, je veux remercier mes parents et ma sœur qui m'ont encouragé et soutenu pendant les 3 longues années nécessaires pour la genèse de ce projet malgré la distance qui nous sépare.

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite du problème de gestion des horaires durant le jour d'opération lorsque survient des perturbations pour une compagnie aérienne.

Nous présentons dans cet ouvrage un modèle mathématique en nombres entiers proposé par Mirela Stojković et implanté par François Lessard. Il permet de modifier l'horaire des vols ainsi que l'affectation des avions et des équipages de façon à minimiser les impacts des perturbations sur les horaires initialement planifiés et sur les passagers lorsque, par exemple, certains vols sont retardés ou annulés. Ces changements s'effectuent vis-à-vis d'un aéroport qui doit faire face à ces perturbations pendant une période clairement définie qu'on appelle généralement la période de perturbation. Une des particularités de ce modèle mathématique est qu'il peut tenir compte des équipages et/ou des passagers pour la résolution du problème. Un des impératifs lors de la mise au point du modèle mathématique fut que son implémentation informatique devait pouvoir résoudre le problème en un temps relativement court pour qu'elle puisse être utilisée par des compagnies aériennes sur des cas concrets. La qualité et la réalisabilité des solutions trouvées dans un laps de temps relativement court par cette implémentation sur différents scénarios confirment cette réussite.

Ce mémoire présente entre autres l'interface graphique programmée en java que j'ai développée. Cette interface graphique permet notamment de visualiser l'horaire planifié et/ou perturbé, d'annuler ou de retarder manuellement des vols mais aussi de visualiser les modifications proposées par l'optimiseur. Ces modifications pouvant être une réaffectation des avions et/ou des équipages ainsi que retarder et/ou annuler certains vols de façon à minimiser les répercussions des perturbations. Cette interface est efficace car elle permet à l'utilisateur une meilleure visualisation du problème dont il doit faire face sans augmenter le temps nécessaire pour exécuter le programme. Le gestionnaire peut ainsi plus facilement envisager plusieurs cas de figures possibles avant de prendre une décision.

Ce *GUI (Graphical User Interface)* a facilité la visualisation des différentes composantes du problème de départ, plus particulièrement les avions, les équipages et les passagers. Cette interface graphique a aussi permis de créer différents scénarios; ces derniers ont permis d'avoir un plus grand nombre de tests à notre disposition.

Cette interface graphique sert aussi à visualiser les solutions trouvées par l'optimiseur et vérifier plus facilement et rapidement la légalité de celles-ci. Ceci permet de vérifier si le modèle mathématique répond de façon adéquate aux différents problèmes auxquels fait face une compagnie aérienne durant le jour d'opération. Les expérimentations faites à l'aide de mon interface graphique ont facilité le travail d'amélioration du modèle mathématique et de son implémentation informatique car celle-ci permet une meilleure visualisation en ce qui concerne l'affectation des avions, des connexions des passagers.

Suite aux différents tests effectués, l'optimiseur produit les meilleurs résultats lorsque le temps est discrétisé par tranche de 5 minutes et lorsqu'on tient compte de tous les vols annulés et retardés et des contraintes liées aux avions, aux passagers et aux équipages lors de la résolution. Ce *GUI* a aussi permis de vérifier l'applicabilité du modèle et de son implémentation informatique en opérations réelles en mesurant le temps de résolution relativement court.

ABSTRACT

This master's thesis treats the problem of management of the schedules during the day of operations when disturbances occur for an airline company.

We present in this work an integer mathematical model proposed by Mirela Stojković and programmed by François Lessard. It modifies the schedule of the flights as well as the assignment of the planes and the crews in order to minimize impacts of disturbances on the initially planned schedules and passengers when, for example, certain flights are delayed or cancelled. These changes are carried out with respect to an airport with respect to an airport, which must face the disturbances for one clearly definite period. This period is generally called period of disturbance. One of characteristics of this mathematical model is that it can hold account or not crews and/or passengers during the resolution of the problem. One of the requirements during the development of the mathematical model was that its data-processing implementation solve the problem relatively quickly so that it can be used by airline companies on concrete cases. The quality and the realisability of the solutions founded in a relatively short time by this implementation on various scenarios confirm this success.

This memory is also the subject of a presentation of my graphical user interface (*GUI*) programmed in java, which was developed at the time as mathematical model, which initiated the work presented in this memory. This *GUI* in particular makes it possible to visualize planned and/or disturbed schedules, to cancel or delay manually flights but also to visualize the modifications suggested by the optimizer. These modifications are able to be reassignment of the planes and crews like delaying and/or cancelling certain flights in order to minimize reflected them disturbances.

This interface is effective because it allows to the user a better visualization of the problem without increasing time necessary to carry out the program. The manager can thus more easily consider several cases before making a decision.

This *GUI* facilitates the visualization of the various components of the starting problem, more particularly about planes and crews and passengers. It also makes it possible to create various scenarios; the latter made it possible to have a greater number of tests at our disposal.

This *GUI* is also used for visualizing the solutions found by the optimizer and checking more easily and quickly the legality of those. This makes it possible to check if the mathematical model answers in an adequate way the various problems to which an airline company faces during the day of operation. The experiments made using my *GUI* facilitated the work of improvement of the mathematical model and its data-processing implementation because this one allows a better visualization with regard to the assignment of the planes, of connections of the passengers.

Following the various tests carried out, the optimizer produces the best results when time is discretized by 5 minute old section and when one holds account of all the cancelled and delayed flights and of the constraints related on the planes, the passengers and the crews at the time of the resolution. This *GUI* also makes it possible to check the applicability of the model and its data-processing implementation in real operations by measuring the relatively short time of resolution.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	vi
ABSTRACT.....	ix
TABLE DES MATIÈRES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xviii
LISTE DES SIGLES.....	xix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 : PANIFICATION EN TRANSPORT AÉRIEN.....	3
1.1 Construction des horaires des vols (<i>flight scheduling problem</i>).....	4
1.2 Affectation des types d'avion aux vols (<i>fleet assignment problem</i>).....	4
1.3 Construction des rotations des avions (<i>aircraft routing problem</i>).....	6
1.4 Creation des rotations des equipages (<i>crew scheduling problem</i>).....	7
1.5 Confection des horaires mensuels des membres d'équipage.....	8

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE POUR LA GESTION	
DES HORAIRES DURANT LE JOUR D'OPERATION.....	10
2.1 Principales causes des perturbations.....	11
2.2 Impératifs à respecter lors de la modification des horaires.....	14
2.3 Modèles présentés dans la littérature pour résoudre	
le problème de réaffectation.....	14
2.3.1 Objectifs possibles.....	14
2.3.2 Modèles présentés dans la littérature.....	16
CHAPITRE 3 : MODÈLE MATHÉMATIQUE.....	21
3.1 Notations utilisées.....	22
3.2 Variables.....	25
3.2.1 Variables pour les vols.....	25
3.2.2 Variables pour les avions.....	25
3.2.3 Variables pour les équipages.....	27
3.2.4 Variables pour les passagers.....	31

3.3 Contraintes.....	33
3.3.1 Contraintes liées aux vols.....	33
3.3.2 Contraintes liées à l'aéroport considéré.....	33
3.3.3 Contraintes liées aux avions.....	34
3.3.4 Contraintes liées aux équipages.....	34
3.3.5 Contraintes liées aux passagers.....	36
3.4 Fonction objectif.....	37
3.4.1 Coûts vis-à-vis des vols.....	37
3.4.2 Coûts vis-à-vis des avions.....	39
3.4.3 Coûts vis-à-vis des équipages.....	41
3.4.4 Coûts vis-à-vis des passagers.....	43
3.5 Améliorations.....	44
3.5.1 Utilisation d'arcs d'attente.....	44
3.5.2 Raffinement des coûts vis-à-vis des avions.....	51

3.5.3 Raffinement des coûts vis-à-vis des équipages.....	52
CHAPITRE 4 : INTERFACE GRAPHIQUE.....	53
4.1 Historique du langage informatique java.....	53
4.2 Présentation générale de l'interface graphique.....	54
4.3 Caractéristiques communes à toutes les fenêtres de l'interface graphique.....	55
4.3.1 Description du "bandeau de tête".....	56
4.3.2 Description de la liste des options.....	57
4.3.3 Description du diagramme de Gantt.....	58
4.3.4 Données présentées pour chaque vol communes à toutes les fenêtres.....	60
4.4 Utilisation de l'interface graphique sur un exemple.....	63
4.4.1 Fenêtre initiale.....	64
4.4.2 Utilisation de la fenêtre appropriée pour les changements manuels des vols.....	65
4.4.3 Paramètres et capacités de réduction.....	68
4.4.4 Fenêtre présentant les modifications proposées par l'optimiseur....	74

4.4.5 Fenêtre présentant l'horaire final.....	75
4.5 Analyse organique et classes informatiques.....	76
4.5.1 Classes contenant les données.....	76
4.5.2 Classes pour l'interface graphique.....	77
4.5.3 Classes permettant de lancer l'optimiseur.....	79
4.6 Apports de l'interface graphique.....	80
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS NUMÉRIQUES.....	81
5.1 Scénario de base.....	82
5.2 Résolution globale avec différentes réductions de capacité.....	86
5.3 Influences des longueurs des intervalles de temps.....	89
5.4 Résolution séquentielle vis-à-vis de la résolution globale.....	93
5.5 Optimisations partielles vis-à-vis de l'optimisation globale.....	96
5.6 Conclusion.....	98

CONCLUSION.....	99
------------------------	-----------

RÉFÉRENCES.....	101
------------------------	------------

Liste des Tableaux

Tableau 4.1 : Modifications manuelles qui seront faites lors de la simulation.....	63
Tableau 4.2 : Périodes de réduction envisagées lors de la simulation.....	64
Tableau 5.1 : Vols perturbés et critiques.....	83
Tableau 5.2 : Résultats avec différentes réductions de capacité.....	88
Tableau 5.3 : Résultats avec différents intervalles de temps.....	90
Tableau 5.4 : Résultats partiels de la résolution séquentielle.....	94
Tableau 5.5 : Résultats de la résolution séquentielle et de la résolution globale	95
Tableau 5.6 : Résultats des optimisations partielles et de l'optimisation intégrée...	96

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Processus de planification en transport aérien.....	3
Figure 2.1 : Sources d'irrégularités.....	1
Figure 3.1 Pourcentage du nombre de passagers pouvant effectuer une connexion en fonction du temps imparti pour le faire.....	31
Figure 3.2 : Réseau pour les avions sans "arc d'attente"	45
Figure 3.3 : Réseau pour les avions avec les arcs de type $g_{i,l+1}^j$	46
Figure 3.4 : Réseau pour les équipages sans "arc d'attente"	47
Figure 3.5 : Réseau pour les équipages avec les arcs de type $s_{k,k+1}^i$ et $m_{k,k+1}^{di}$	48
Figure 3.6 : Réseau pour les passagers.....	50
Figure 4.1 Fenêtre de référence utilisée pour montrer la structure générale des fenêtres.....	55
Figure 4.2 Exemple de "bandeau de tête"	56
Figure 4.3 Diagramme de Gantt avant la reduction de la période observée.....	56
Figure 4.4 Valeurs entrées par l'utilisateur.....	56

Figure 4.5 Diagramme de Gantt après la réduction de la période observée.....	57
Figure 4.6 Exemple d'options possibles.....	57
Figure 4.7 Fenêtre utilisée pour présenter la signification des couleurs.....	57
Figure 4.8 Exemple de diagramme de Gantt.....	58
Figure 4.9 Exemple de ligne verticale symbolisant l'heure actuelle et de bande verticale représentant la période de perturbation.....	59
Figure 4.10 Exemple de modification du numéro d'un avion.....	59
Figure 4.11 Exemple de données de base pour un vol.....	60
Figure 4.12 Exemple de données pour le départ d'un vol.....	60
Figure 4.13 Exemple de données pour un équipage actif sur un vol.....	61
Figure 4.14 Exemple de liste de vols qui vont être effectués par un équipage.....	61
Figure 4.15 Exemple de connexions initialement prévues à la suite d'un vol.....	62
Figure 4.16 Fenêtre qui permet d'indiquer le répertoire où se trouve les données..	64
Figure 4.17 Fenêtre initiale.....	65
Figure 4.18 Modification du vol 0857.....	66

Figure 4.19 Modification du vol 0116.....	66
Figure 4.20 Modification du vol 0159.....	66
Figure 4.21 Affichage lorsque les trois modifications ont été effectuées.....	67
Figure 4.22 Fenêtre pour les paramètres valides pour l'exemple.....	68
Figure 4.23 Fenêtre représentant les réductions de capacité par défaut de l'aéroport de Toronto.....	69
Figure 4.24 Fenêtre permettant de modifier la première ligne qui concerne la réduction de capacité.....	71
Figure 4.25 Fenêtre permettant une modification de la réduction de capacité pour un intervalle de temps donné.....	71
Figure 4.26 Fenêtre avant l'enregistrement des données pour la fenêtre <i>Capacity Reduction</i>.....	72
Figure 4.27 Fenêtre permettant de visualiser les modifications et/ou l'horaire final.....	73
Figure 4.28 Fenêtre présentant les modifications proposées par le logiciel.....	74
Figure 4.29 Fenêtre présentant l'horaire final proposé par le logiciel.....	75
Figure 5.1 Vols perturbés et critiques.....	83

Figure 5.2 Répartition des vols à l'aéroport de Toronto d'après la planification...87

Figure 5.3 Répartition des vols avec des intervalles de 5 minutes 91

Figure 5.4 Répartition des vols avec des intervalles de 10 minutes.....91

Figure 5.5 Répartition des vols avec des intervalles de 15 minutes.....92

INTRODUCTION

La gestion d'horaire des vols est un problème primordial pour une compagnie aérienne. En effet, on doit à la fois fabriquer les horaires des vols, les itinéraires des avions et les horaires des équipages d'une flotte hétérogène de façon à maximiser les profits. La décision doit être prise en tenant compte des coûts d'opération des avions, d'entretien, du carburant, des équipages et d'utilisation des aéroports desservis. Pour avoir un bon ratio revenu/coût, les gestionnaires doivent atteindre un pourcentage important d'occupation des sièges ainsi qu'une utilisation intensive des appareils.

La planification des horaires des vols, des équipages et des itinéraires des avions se fait à l'avance. Elle est couramment appelée dans la littérature "planification", cette dénomination sera également utilisée dans ce mémoire.

Lorsque des irrégularités surviennent en cours d'opération, l'horaire planifié des vols peut devenir non réalisable pour les équipage et/ou pour les avions. Nous limiterons notre champ de recherche à ce problème spécifique de prise de décision pour le jour d'opération. Le problème opérationnel est fort complexe car il survient dans un contexte extrêmement difficile à prévoir et doit être résolu dans un temps très bref. Bien qu'il n'existe que peu de recherches sur le sujet à l'heure actuelle, une solution optimale ou même seulement "bonne" peut mener à la réalisation d'importants profits et positionner la compagnie aérienne dans une situation favorable dans un marché très concurrentiel.

Dans la littérature, ce type de problèmes apparaît sous différents noms, tels que la "fabrication d'horaire au jour le jour" (*day-to-day scheduling*), la "fabrication dynamique d'horaire" (*dynamic scheduling*), ou encore la "fabrication d'horaire pour le jour des opérations" (*day-of-operations scheduling*).

Le terme *DAYOPS* est très employé dans l'industrie aérienne où l'anglais prédomine, ce mot vient de *DAY of Operations Schedule* et les systèmes utilisés pour résoudre ce type de problèmes : "systèmes *DAYOPS*". Le mot système est ici employé pour mettre en évidence le fait qu'il contient un ensemble de modules intégrés. Le système *DAYOPS* est en quelque sorte un Système d'Aide à la Décision (SAD). Un SAD peut être défini comme un ensemble d'instruments informatiques utilisés pour assister le responsable des décisions dans sa tâche. Le SAD permet donc d'évaluer différents scénarios et également de suggérer des solutions en utilisant des modules d'optimisation exacts ou des méthodes heuristiques. Toutefois, il est à noter que la décision finale appartient toujours au gestionnaire.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une brève revue de littérature sur le problème global de création d'horaires. Dans un deuxième chapitre, plusieurs modèles déjà proposés pour résoudre les irrégularités en cours d'opération seront présentés. Dans une troisième partie, un nouveau modèle pour le problème de réaffectation pendant le jour d'opération sera introduit. Ce modèle permet à la fois de retarder ou d'annuler des vols qui se déroulent, de modifier les itinéraires des avions et de réaffecter les équipages pendant la période de perturbations, tout en tenant compte des passagers.

Une interface graphique, communément appelé *GUI* (terminologie qui provient de l'anglais *Graphical User Interface*) sera présentée dans le quatrième chapitre. Cette interface permet à l'utilisateur de visualiser les horaires planifiés, de modifier manuellement les horaires, de valider les modifications manuelles proposées et de visualiser les modifications proposées par l'optimiseur. Le cinquième chapitre fera l'objet de l'évaluation du modèle mathématique présenté dans ce mémoire ainsi que de son implantation informatique sur différents scénarios. Finalement, le dernier chapitre de ce mémoire tire quelques conclusions sur la recherche présentée dans cet ouvrage.

CHAPITRE 1 : PLANIFICATION EN TRANSPORT AÉRIEN

Les travaux pertinents sur le processus de planification en transport aérien remontent au début des années 1960. Certains articles font une synthèse des connaissances actuelles dans ce domaine comme ceux de Simpson (1968) ou de Etschmaier et Mathaisel (1984, 1985) ou plus récemment l'ouvrage de Yu (1998).

Les étapes suivantes s'inspirent du processus de planification présenté par Cordeau et *al.* (2001) :

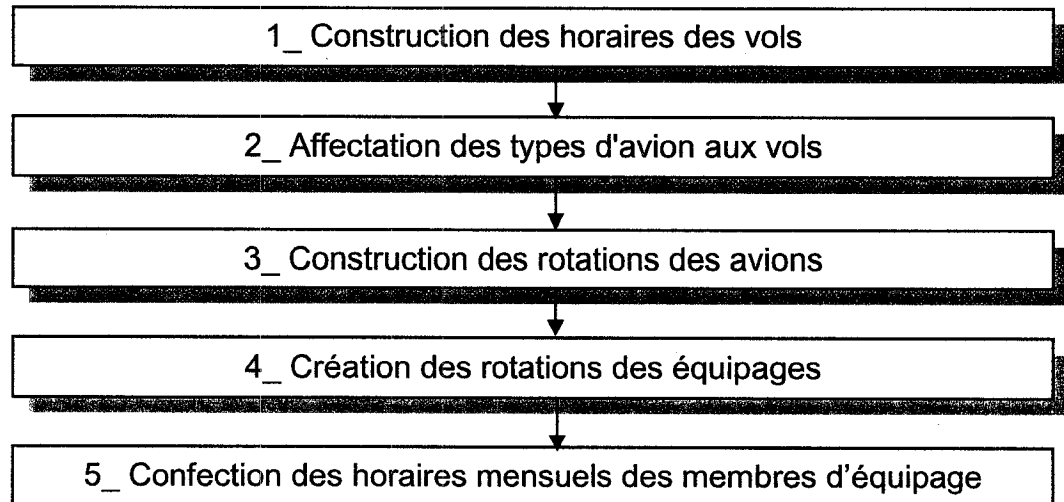


Figure 1.1 : Processus de planification en transport aérien

La résolution du problème de planification en transport aérien est décomposée en plusieurs problèmes car il est très difficile de trouver de bons modèles qui puissent englober toutes ces décisions. Il faut aussi tenir compte de la capacité de calcul et de la

mémoire limitée des ordinateurs pour pouvoir faire tourner les algorithmes dans un délai raisonnable.

Ces problèmes sont dans la plupart des cas traités l'un après l'autre, cependant certaines approches proposent de regrouper plusieurs problèmes pour augmenter l'efficacité. Nous proposons dans un premier temps un survol des différentes méthodes présentées dans la littérature pour résoudre les problèmes de planification.

1.1 Construction des horaires des vols (flight scheduling problem)

Il existe peu de modèles sur la production des horaires des vols et il semble que dans la pratique les compagnies construisent ces horaires de façon manuelle. Etschmaier et Mathaisel (1985) font une revue de la littérature jusqu'en 1985. La démarche présentée par les auteurs nécessite une solution de départ qui va être améliorée itérativement. Nikulainen (1992) propose une méthode qui construit l'horaire des vols en fonction de la courbe de la demande des passagers pour chaque paire origine-destination. De plus l'auteur suppose que la capacité des avions est suffisante pour satisfaire la demande pour chaque vol.

Dobson et Lederer (1993) proposent une approche heuristique permettant de trouver un horaire des vols en prenant en compte les horaires des concurrents. Dans ce modèle, il existe aussi un module qui modélise la réaction des concurrents vis-à-vis du nouvel horaire.

1.2 Affectation des types d'avion aux vols (fleet assignment problem)

Il existe deux types d'affectation des types d'avions. La première catégorie d'affectation, généralement appelée *warm start*, sert à modifier un horaire déjà existant. Ceci permet

de modifier rapidement une affectation s'il survient des changements au niveau des données comme par exemple des variations dans la demande des passagers ou un changement dans la disponibilité des avions. Klineciewicz et Rosenwein (1995) proposent un modèle qui permet d'affecter les avions en tenant compte de la particularité de chaque jour, par exemple les jours de *week-end* sont généralement les plus achalandés. Pour avoir un résultat rapide, Talluri (1996) soumet une méthode d'échange.

La seconde catégorie sert à construire une solution initiale, communément appelée *cold start*. Gu et *al.* (1994) ont démontré que le problème d'affectation des types d'avion aux vols avec horaire fixe est NP-complet dès lors qu'il y a plus que deux types d'avions à considérer. La plupart des formulations proposées sont des modèles linéaires en nombres entiers résolus de façon heuristique.

Abara (1989) et Rushmeier et Kontogiorgis (1997) proposent un type de modèle qui explicite les connexions entre les segments de vols. Ce modèle a l'avantage de pouvoir tenir compte du temps minimum entre deux types de vols pour un type d'avion précis. L'inconvénient de cette modélisation est le grand nombre de variables du réseau et de contraintes générées par le modèle car ceux-ci augmentent de façon quadratique avec le nombre de segments de vols. Pour pouvoir utiliser ce modèle dans des cas réels, on doit limiter le nombre de connexions possible, ce qui rend la résolution heuristique. Rexing et *al.* (2000) proposent un réseau de type multi-commodité. Chaque vol est modélisé par plusieurs arcs pour pouvoir tenir compte du type d'avion et de l'heure de départ envisagé. Cette implémentation permet de résoudre des problèmes réels de l'industrie aérienne mais est moins performante que d'autres implémentations comme celle beaucoup plus ancienne de Levin (1971).

Desaulniers et *al.* (1998) proposent un modèle général basé sur une structure de réseau pour résoudre des problèmes d'horaire et de tournées de véhicules. Le modèle est

une formulation non linéaire en nombres entiers où on applique une extension du principe de décomposition de Dantzig-Wolfe pour les programmes linéaires (Dantzig et Wolfe, 1960). Le problème-maître est un programme linéaire alors que les sous-problèmes sont des problèmes de plus court chemin. Le problème est résolu par la méthode de génération de colonnes intégrée dans un arbre de branchement. Ce modèle a l'avantage de formuler de façon exacte le problème d'affectation des types d'avion aux vols avec flexibilité d'horaire.

1.3 Construction des rotations des avions (aircraft routing problem)

Clarke et *al.* (1997) proposent une procédure heuristique basée sur une relaxation lagrangienne pour construire des itinéraires respectant les contraintes tout en maximisant le nombre de connexions directes. Nous retrouvons dans Gopalan et Talluri (1998) et Talluri (1998) des procédures heuristiques pour la construction des itinéraires de façon à assurer un entretien périodique tous les 3-4 jours. Plus récemment, Jarrah et Strehler (2002) considèrent le problème qui consiste à optimiser le choix des connexions directes.

Cordeau et *al.* (2001) proposent quant à eux une décomposition de Benders (1962) pour résoudre simultanément le problème de construction des rotations des avions et des horaires des équipages. Le problème maître sert à créer l'itinéraire des avions alors que les sous-problèmes résolvent les problèmes en rapport avec les horaires des équipages. Dans une première phase, la relaxation linéaire du problème est résolue de façon optimale par une décomposition de Benders et par la méthode de génération de colonnes. Puis par la suite, l'ensemble des solutions réalisables est réduit par l'ajout de coupes. Dans la troisième phase, les contraintes d'intégralité sont réintroduites dans les sous-problèmes par une technique de branchement. Les résultats sur des cas concrets ont permis de montrer la diminution du temps de calcul ainsi qu'une amélioration du coût

des équipages. Les auteurs ont bon espoir d'améliorer leur modèle pour pouvoir intégrer une certaine flexibilité en ce qui concerne l'heure de départ des vols.

1.4 Création des rotations des équipages (crew scheduling problem)

Une rotation d'équipage est une suite de jours de travail (*duty* en anglais) et de jours de repos. Généralement, les rotations sont faites sur une période de 2 à 5 jours. Le nombre de rotations réalisables rend impossible la création d'une liste exhaustive de celles-ci. L'idée principalement retenue est de décomposer la résolution en deux parties, la première partie sera un problème de génération d'ensemble de rotations et la seconde sera un problème de partitionnement d'ensemble. Le premier problème génère un certain nombre de rotations valides prometteuses; alors que le second problème fait une sélection parmi les rotations générées par le premier problème de façon à couvrir tous les vols tout en minimisant le coût. Ce dernier problème peut être résolu de façon optimale ou heuristique.

Graves et *al.* (1993) et Chu et *al.* (1997) ont proposé une procédure heuristique d'amélioration de la solution obtenue pour le problème de partitionnement d'ensemble. Cependant, on peut considérer implicitement toutes les rotations possibles à l'aide de la méthode de génération de colonnes, intégrée dans une procédure de séparation et d'évaluation progressive (*branch-and-bound*). Pour plus de précision sur cette approche, on peut se référer à l'article de Desaulniers et *al.* (1997).

Barnhart et Shenoï (1998) présentent dans leurs travaux un modèle approximatif qui est une relaxation du véritable problème à résoudre. Leur modèle peut être représenté comme un problème de circulation dans un réseau "espace-temps" avec contraintes linéaire. Ce modèle peut être résolu efficacement. L'optimum du modèle permet d'avoir une borne inférieure de la valeur optimale du problème réel à résoudre.

1.5 Confection des horaires mensuels des membres d'équipage

Les horaires du personnel navigant se font suivant leurs qualifications; par exemple les pilotes ne sont généralement aptes à piloter qu'un seul type d'avion. Cette particularité permet de réduire la taille du problème à résoudre. Pour la construction personnelle des horaires des employés, les approches proposées peuvent être rassemblées en trois catégories : les méthodes qui ne tiennent compte ni des activités pré-assignées ni de l'ancienneté des employés (*bidline problem*); celles qui tiennent compte des activités pré-assignées pour chaque employé (*rostering problem*); et celles qui, en plus de prendre en compte les activités pré-assignées des employés, prennent en considérations leurs préférences (*preferential bidding problem*).

Pour le premier type de problème (*bidline problem*), les horaires sont générés sans tenir compte des préférences des employés et ensuite les employés choisissent séquentiellement, i.e du plus ancien au plus jeune, les horaires qui leurs conviennent le mieux.

La plupart des autres méthodes proposées pour résoudre le problème d'affectation d'horaires des employés avec des contraintes en ce qui concerne des activités pré-assignées sont des méthodes heuristiques. Glaner (1984) construit les horaires des employés en assignant une plus grande priorité aux activités des employés les plus anciens. Ryan (1992), propose quant à lui une autre méthode heuristique qui génère plus de 2 000 horaires mensuels possibles pour chaque employé. Pour ce faire, dans un premier temps l'algorithme résout une relaxation linéaire du problème et fait ensuite appel à une procédure de séparation et d'évaluation progressive.

Parmi les méthodes heuristiques, celle de Ryan (1992) semble la plus prometteuse. À la différence des autres méthodes proposées, le programme a une "vision globale"

du problème considéré, mais a le désavantage de créer un très grand nombre d'horaires potentiels sans pouvoir prendre en considération leurs bien-fondés.

Gamache et Soumis (1998) proposent une méthode de résolution basée sur la méthode de génération de colonnes pour résoudre le problème de construction des horaires des employés en tenant compte de leurs activités pré-assignées. Pour accélérer le processus de résolution, les auteurs utilisent un processus de générations de colonnes disjointes, i.e. des colonnes qui n'ont pas ou peu d'activités communes. La méthode de résolution présentée donne une solution optimale.

La troisième approche, nommée *preferential bidding*, permet de faire attention aux préférences de chaque employé (jours de congé, heures de travail, destinations, ...) lors de la construction des horaires. C'est le problème le plus difficile à résoudre parmi les approches proposées. Généralement, les aspirations des employés les plus anciens sont mieux satisfaites que celles des plus récemment arrivés dans l'entreprise. Byrne (1988) et Moore et al. (1978) ont proposés des algorithmes heuristiques gloutons; alors que Gamache et al. (1998) proposent une approche quasi-optimale qui fait aussi appel à une décomposition par génération de colonnes dans laquelle les sous-problèmes sont des problèmes de plus court chemin avec ressource. Plus récemment, Fahle et al. (2002) ont proposés une approche de génération de colonnes dans laquelle les sous-problèmes sont résolus à l'aide d'une technique de programmation par contraintes.

Pour plus de précisions sur les avantages et les inconvénients de chaque approche en ce qui concerne la confection des horaires mensuels pour les membres d'équipage, on peut se référer à la revue de littérature de Gamache et Soumis (1998).

CHAPITRE 2 : REVUE DE

LITTERATURE POUR LA GESTION DES

HORAIRES DURANT LE JOUR

D'OPÉRATION

Lors du jour d'opération, les gestionnaires doivent modifier les horaires des vols, des équipages et les itinéraires des avions lorsque survient des perturbations.

Comme le soulignent Stojković et *al.* (1998), il existe plusieurs différences entre le problème de planification et le problème d'opération. Premièrement, pour le problème de planification on doit traiter une longue période, alors que pour le problème opérationnel on doit se concentrer sur la partie du système touchée par les perturbations. Deuxièmement, pour le problème de planification le temps de résolution est une donnée secondaire alors que le problème de réaffectation doit être résolu dans un laps de temps très court; c'est pour cela que ce dernier est très souvent résolu de façon heuristique et non optimale. Finalement, lors de la planification l'objectif est de minimiser les coûts alors que durant les perturbations les gestionnaires doivent aussi réduire le plus possible le nombre de modifications aux plans initialement prévus et leurs influences sur les passagers. Actuellement, l'intuition et l'expérience des gestionnaires sont couramment utilisées pour faire face aux modifications dont doit faire face les compagnies aériennes.

2.1 Principales causes des perturbations

Comme le présente Stojković (1999) dans sa thèse de doctorat, il existe plusieurs facteurs à l'origine des perturbations dans les grilles horaires des compagnies aériennes. Ces facteurs peuvent être classifiés selon leurs origines tels que présentés à la Figure 2.1 :

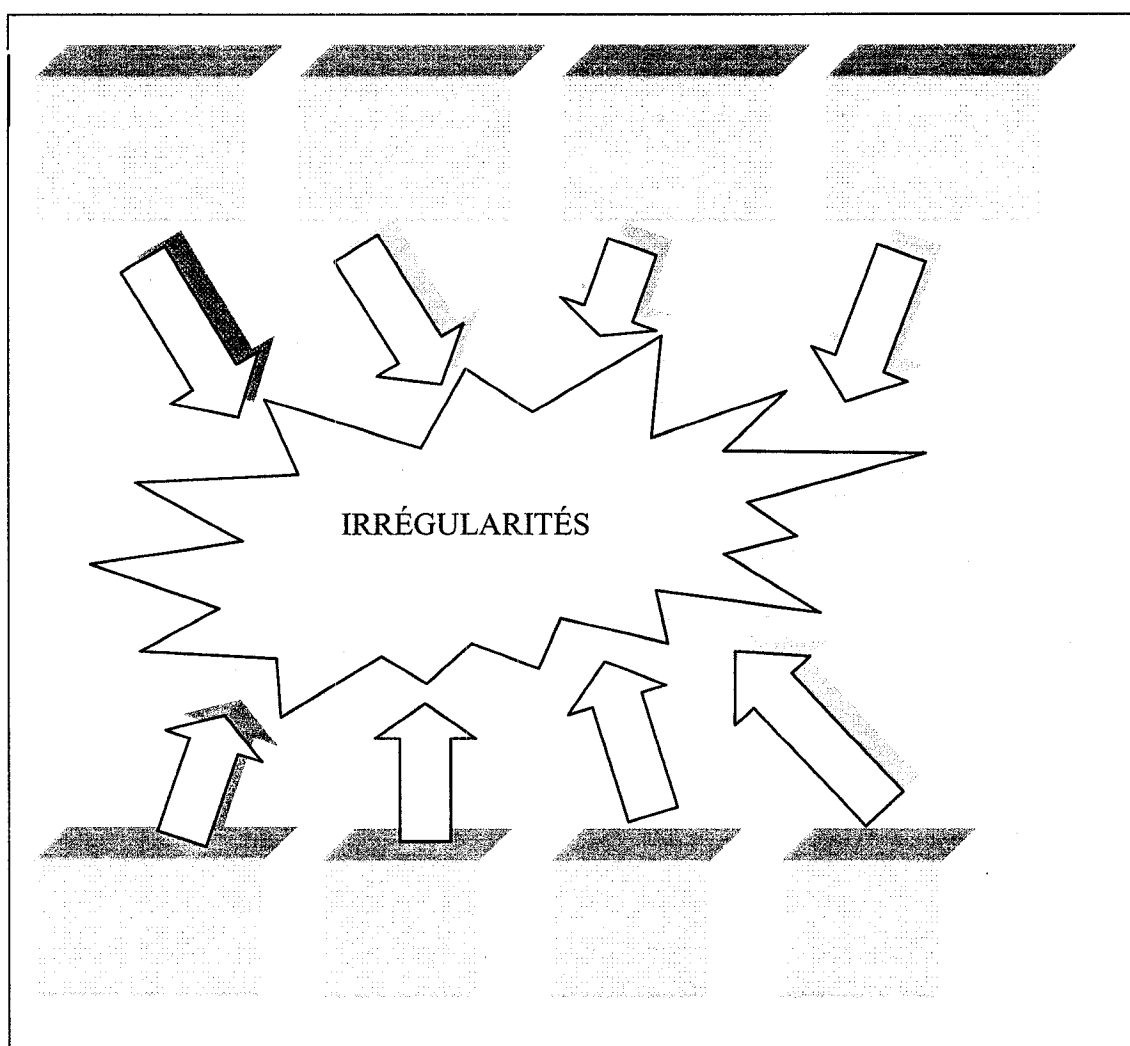


Figure 2.1 : Sources d'irrégularités

Comme le montre la Figure 2.1, les irrégularités les plus fréquemment rencontrées sont :

- Problèmes commerciaux, annoncés généralement par le département commercial, tel que :
 - Des passagers retardataires en correspondance;
 - Des vols nolisés ou additionnels;
 - Des problèmes de restauration (traiteur);
 - Des problèmes de réservation d'hôtel.
- Problèmes techniques, annoncés par le département technique, tel que :
 - Un avion ayant un problème technique mineur comme un composant électrique ou hydraulique qui ne fonctionne plus;
 - Un avion maintenu hors service pour une longue période en raison de problèmes de moteur ou structurels;
 - Des contrôles techniques non prévus exigés par le constructeur.
- Problèmes provenant de la planification et des opérations des journées précédentes, annoncés par le département de la planification des horaires, tel que :
 - La durée de travail de certains équipages dépasse le quota autorisé;
 - La durée de vol de certains avions est au-dessus de la limite autorisée;
 - Des vols non couverts.
- Problèmes de personnel, annoncés par le département de gestion des équipages, tel que :
 - Un équipage en retard;
 - Des absences non planifiées;
 - Un entraînement d'équipage non planifié.

- Problèmes d'aéroport, annoncés par les représentants de l'aéroport desservi par la compagnie aérienne, tel que :
 - Certains équipements de l'aéroport hors service;
 - Un retard pour le service d'un avion;

Une heure de pointe, c'est-à-dire une saturation des capacités de l'aéroport.

- Problèmes de l'*Air Traffic Control* (ATC), annoncés par les représentants de l'ATC, tel que :
 - Une saturation de l'espace aérien;
 - Une fermeture d'une partie de l'espace aérien en raison d'un problème dans l'équipement de radionavigation;
 - Une interdiction de survol d'une partie de l'espace aérien pendant une certaine durée, décision le plus souvent prise par la sécurité nationale.
- Problèmes météorologiques, annoncés par les stations météorologiques, tel que :
 - De mauvaises conditions météorologiques à plus ou moins long terme;
 - Des vents importants qui modifient la durée de vol.
- Autres types de problèmes, soit des difficultés qui rentrent dans plusieurs des catégories précédemment citées soit des problèmes qui ne peuvent pas être inclus dans les catégories énumérées ci-dessus, tel que :
 - Une grève;
 - Un acte terroriste;
 - Etc.

2.2 Impératifs à respecter lors de la modification des horaires

Lors de la réaffectation des équipages et des avions lorsque survient une perturbation, la personne chargée de la gestion des vols doit créer des nouveaux horaires qui satisfassent plusieurs contraintes, dont les plus importantes sont décrites par Luo et Yu (1998) :

- Un vol est impossible à effectuer sans un avion et un équipage qualifiés;
- Un vol est impossible si celui-ci arrive à un aéroport après son couvre-feu;
- Les avions doivent arriver à certains aéroports à certaines heures pour leurs maintenances;
- Un pilote n'est qualifié que pour un certain type d'avion;
- Aucun membre d'équipage ne peut travailler au-delà d'un certain nombre d'heures par jour;
- Un membre d'équipage doit avoir un minimum d'heures de repos entre deux jours consécutifs de travail;
- Les équipages doivent retourner à leurs bases à la fin d'une rotation.

Lors de la réaffectation, on ne doit pas perdre de vue que le surcoût engendré doit être le plus faible possible et que le temps pour "revenir" à l'horaire initialement prévu doit être le plus bref possible.

2.3 Modèles présentés dans la littérature pour résoudre le problème de réaffectation

2.3.1. Objectifs possibles

Plusieurs objectifs sont légitimes dans le contexte de gestion des perturbations des horaires d'une compagnie aérienne. Quelques objectifs possibles sont listés ci-après avec de brefs commentaires sur leurs avantages et inconvénients respectifs.

Une description plus précise est présentée dans le chapitre écrit par Luo et Yu (1998).

- Minimiser le nombre de vols annulés :

Étant donné les perturbations qu'engendre un vol annulé (obligation de replacer les passagers sur un autre vol, connections devenues caduques, etc.), il est primordial pour les compagnies aériennes de rendre le nombre de vols annulés le plus bas possible.

- Minimiser le nombre de vols retardés :

Un vol en retard est un vol qui a plus de 15 minutes de retard par rapport à son horaire d'arrivée initialement prévu (critère de la *Federal Aviation Administration* américaine). Il faut noter, que dans ce cas, les vols annulés ne sont pas considérés.

- Minimiser le délai le plus important :

Ce qui permet de s'assurer qu'aucun vol n'aura un temps de retard déraisonnable.

- Minimiser le retard total des passagers :

Cet objectif permet de minimiser l'impact total sur l'ensemble des passagers causé par la perturbation des horaires.

- Minimiser le coût total des retards :

Cet objectif est similaire au précédent à la différence près qu'au lieu de seulement tenir compte des retard engendrés pour les passagers, on tient compte du coût total des perturbations. Ce coût est dans la plupart des cas

une fonction non linéaire dont les principales variables sont souvent le temps de retard des vols et des passagers.

On peut facilement imaginer d'autres fonctions qui reprennent simultanément plusieurs des idées présentées ci-dessus.

2.3.2. Modèles présentés dans la littérature

Comme le soulignent Stojković et Soumis (2001), le problème de réaffectation est souvent résolu séquentiellement. Dans un premier temps, les horaires des vols sont modifiés pour tenir compte des vols retardés et/ou annulés et les itinéraires des avions sont changés. Dans un deuxième temps, les horaires des équipages sont reconstruits pour que chaque vol soit effectué par un personnel compétent.

- **Modèles pour les avions :**

La réaffectation des avions est le problème le plus étudié et le plus commenté dans la littérature. Vasquez-Marquez (1991) crée un modèle qui permet de reporter un vol à un horaire ultérieur si celui-ci a été annulé dans un programme de réaffectation. Le problème est formulé comme un problème de voyageur de commerce. Le système implanté chez *American Airlines* a permis en 1989 de réduire le temps de retard des passagers d'environ 345 000 minutes. Ce qui représente une économie d'environ 5,2 millions de dollars américains.

Teodorović et Stojković (1990) construisent un modèle lorsque survient une réduction du nombre d'avions. Le programme proposé a pour objectif de minimiser le nombre de vols annulés. S'il existe plusieurs solutions avec le même nombre de vols annulés, alors la solution avec le plus petit temps de

retard pour les passagers sera retenue. Le principal inconvénient de ce modèle est que les horaires des équipages ne sont pas incorporés dans le modèle. Teodorović et Guberinić (1984) présentèrent une procédure de séparation et d'évaluation progressive pour minimiser le temps de retard quand un ou plusieurs avions ne sont plus opérationnels; cependant les auteurs ne proposent aucun résultat de cette implémentation sur un cas concret.

Gershkoff (1987) propose aussi un modèle lorsque survient une réduction des ressources. Pour cela, l'auteur propose l'utilisation successive d'algorithmes de plus courts chemins. Le désavantage de ce modèle est qu'il ne tient pas compte des vols importants, i.e. tous les vols ont la même importance "aux yeux" du programme.

Jarrah et *al.* (1993) présentent deux modèles de réseau pour résoudre le problème de perturbations lorsque survient une diminution des ressources. Les modèles sélectionnent les solutions optimales qui minimisent le nombre de vols annulés ou retardés mais pas les deux à la fois. Puis ils absorbent les perturbations en permettant d'échanger des avions et/ou en utilisant des avions en réserve. Malheureusement, aucun modèle de résolution n'est proposé dans leur article pour avoir une résolution en temps polynomial. Un système de décision en temps réel a été développé par Rakshit et *al.* (1996), ce système est basé sur la structure présentée par Jarrah et *al.* (1993). Les impacts de ce système sur des cas réels sont commentés dans cette même publication. Les effectifs permettent de montrer le réel gain de leur approche pour la compagnie United Airlines : pour une période de 6 mois, 27 000 minutes de retard pour les passagers ont pu être résorbés ce qui se chiffre par une économie d'environ 540 000 \$. Cao et Kanafani (1997) s'inspirent aussi

de ce modèle pour créer un modèle qui permet à la fois de retarder et d'annuler des vols, mais aussi de faire des échanges entre les horaires des avions. Le problème est formulé comme un problème quadratique en nombre entier 0-1, mais le modèle ne tient pas compte des équipages et des périodes de maintenance.

Yan et Young (1996) présentèrent pour la première fois dans la littérature un modèle qui tienne à la fois compte des vols annulés et de ceux qui sont retardés pour la réaffectation des avions.

- Modèles pour les équipages :

Lettofský et *al.* (1997) présentent une approche originale pour recouvrir les vols par les équipages lorsque survient des perturbations. Ce modèle a la particularité de traiter un équipage comme une entité insécable. Le modèle est un problème en nombres entiers qui fonctionne pour les problèmes de petite et de moyenne taille. Les auteurs utilisent tout d'abord une méthode primale-duale du simplexe pour résoudre la relaxation linéaire puis emploient un arbre de branchement spécifique pour obtenir rapidement une solution avec le coût le plus faible possible.

Stojković et *al.* (1998), proposent un modèle qui permet de réaffecter de façon optimale les équipages lorsque survient une perturbation. Ce modèle permet de modifier l'horaire de chaque membre d'équipage. Le modèle mathématique est un problème de partitionnement d'ensemble. Pour la résolution, les auteurs utilisent une méthode de génération de colonne imbriquée avec une procédure de séparation et d'évaluation progressive. Le principal avantage de cette approche est d'éviter de faire une énumération exhaustive des solutions réalisables. De plus le temps de résolution est

suffisamment court pour permettre d'essayer plusieurs scénarios avant de prendre une décision définitive.

- Modèles intégrés :

Dans sa thèse de doctorat, Lettovský (1997) présente une nouvelle approche. Le modèle est composé d'un problème maître où les vols sont pris en compte, c'est-à-dire s'il doivent être retardés ou annulés. Les sous-problèmes peuvent être regroupés en 3 catégories, i.e. le problème de recouvrement pour les équipages, un autre problème de recouvrement pour les avions et un problème de flot qui permet d'avoir un nouvel itinéraire pour tous les passagers qui subissent un chamboulement dans leurs parcours. Pour résoudre le problème, l'auteur préconise d'utiliser une décomposition de Benders, mais aucun résultat numérique n'est présenté.

Stojković et Soumis (2001), proposent un modèle qui permet de modifier à la fois l'horaire des vols et des pilotes. Le modèle est basé sur un réseau multi-commodités avec des fenêtres de temps et des contraintes supplémentaires. Pour la résolution, les auteurs utilisent une décomposition de Dantzig-Wolfe avec une méthode de séparation et d'évaluation. Le problème maître contient les contraintes de couverture des vols, tandis que les sous problèmes sont des problèmes de plus court chemin avec contraintes de temps.

En général, les modèles présentés ne résolvent pas en totalité le problème opérationnel car ils ne tiennent pas compte des désagréments éventuellement créés pour les passagers.

Cette constatation a motivé la rédaction et plus particulièrement la création du modèle mathématique présenté au chapitre 3 de ce mémoire de ce mémoire. Car il semble logique d'avoir une meilleure productivité si on arrive à avoir un modèle

qui réussisse à prendre en considération toutes ces données et qui puisse être résolu dans un temps raisonnable. Le modèle qui sera présenté dans le prochain chapitre de ce mémoire tient compte à la fois des contraintes et des surcoûts engendrés par la modification des horaires des vols, des avions, et des équipages. De plus, ce modèle incorpore aussi l'aspect stochastique du désagrément engendré pour les passagers lorsqu'une connexion est modifiée.

CHAPITRE 3 : MODÈLE

MATHÉMATIQUE

Une première version de ce modèle mathématique a été présentée par Stojković (2003). Le modèle présenté ici contient les améliorations apportées au cours de ma maîtrise. Ces améliorations sont discutées au chapitre 3.5 de ce mémoire.

Ce modèle est conçu pour résoudre les perturbations à un aéroport donné où la capacité n'est pas modifiée mais les opérations planifiées sont changées, ou bien la capacité est restreinte et les horaires des vols ont été possiblement modifiés. Les modifications sur les horaires des avions s'effectuent sur l'ensemble de la flotte pendant une période de temps de quelques heures, appelée "période de perturbation".

Ce modèle permet de faire des modifications simultanément tel que :

- Retarder le départ d'un vol (*ground holding delay*);
- Retarder l'arrivée d'un vol (*landing delay*);
- Annuler un vol (*canceled flight*);
- Modifier les itinéraires des avions en effectuant des échanges d'une partie des horaires planifiés (*swapping aircraft itineraries*);
- Modifier les horaires des équipages (*swapping crew itineraries*).

Ces modifications sont faites de telle sorte à minimiser les surcoûts engendrés et le nombre de passagers non servis. Par la suite, les différentes contraintes dont il faut tenir compte seront dévoilées. En dernier lieu, la fonction objectif sera présentée.

3.1 Notations utilisées

I : Ensemble des arrivées i .

Cet ensemble comprend les avions au sol, les arrivées déjà en route ainsi que toutes les arrivées prévues pendant la période de perturbation. Pour qu'un avion originellement affecté à un vol partant de l'aéroport en question appartienne à l'ensemble I , il faut que son départ planifié soit situé dans la période considérée.

J : Ensemble des départs j .

Cet ensemble contient tous les vols dont le départ prévu appartient à la période considérée.

d_i : Constante représentant le retard maximal, donné en minutes, du vol $i \in I$.

d_j : Constante représentant le retard maximal, donné en minutes, du vol $j \in J$.

Δt : Unité de retard, exprimée en minutes.

K_i : Ensemble des copies k du vol $i \in I$.

$$|K_i| = \frac{d_i}{\Delta t} + 1$$

Chaque copie correspond à une arrivée possible du vol i .

L_j : Ensemble des copies l du vol $j \in J$.

$$|L_j| = \frac{d_j}{\Delta t} + 1$$

Chaque copie correspond à un départ possible du vol j .

t_k : Heure d'arrivée de la copie $k \in K_i$.

L'heure d'arrivée de la première copie correspond à l'heure d'arrivée planifiée du vol i . La différence des heures d'arrivée de deux copies consécutives du vol $i \in I$ est de Δt unités de temps.

t_l : Heure de départ de la copie $l \in L_j$.

L'heure de départ de la première copie correspond à l'heure de départ prévue pour le vol j . La différence des heures de départ de deux copies consécutives du vol $j \in J$ est de Δt unités de temps.

k_i^a : Copie additionnelle du vol $i \in I$ qui représente l'annulation de celui-ci.

l_j^a : Copie additionnelle du vol $j \in J$ qui représente l'annulation de celui-ci.

E : Ensemble des groupes e des équipages en réserve.

Un groupe est constitué des équipages qualifiés pour un même type d'avion.

K_e : Ensemble des copies k du groupe $e \in E$.

Une copie correspond à un équipage particulier du groupe disponible à l'heure t_k^e .

SA_j : Suite des vols composée du vol j et de ses successeurs selon l'itinéraire de l'avion planifié pour le jour considéré.

SE_j : Suite des vols composée du vol j et de ses successeurs selon la planification de l'équipage initialement prévue pour le jour considéré.

F_a : Ensemble des types d'avions admissibles pour le vol $a \in SA_j$.

FSA_j : Ensemble des types d'avions f_j admissibles pour la suite SA_j , i.e.

$$FSA_j = F_j \cap \dots F_{j+|SA_j|-1}.$$

f_i : Type d'avion arrivant avec le vol $i \in I$.

f_j^p : Type d'avion planifié pour le vol $j \in J$.

D_i : Ensemble des équipages non opérationnels (en *deadhead*) pour le vol $i \in I$.

D_j : Ensemble des équipages non opérationnels (en *deadhead*) pour le vol $j \in J$.

β_i : Constante représentant le nombre d'équipages (équipage opérationnel et ceux en *deadhead*) prévus pour le vol $i \in I$, $\beta_i = |D_i| + 1$.

β_j : Constante représentant le nombre d'équipages (équipage opérationnel et ceux en *deadhead*) prévus pour le vol $j \in J$, $\beta_j = |D_j| + 1$.

T : Ensemble des tranches de temps t contenues dans la période pendant laquelle la restriction de capacité s'applique.

S_t : Constante représentant la capacité maximale de la tranche de temps $t \in T$.

d'_{ik} : Coefficient binaire défini comme suit :

$$d'_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si l'heure d'arrivée } t_k \text{ du vol } i \in I \text{ appartient à la tranche de temps } t \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

d_{jt}^t : Coefficient binaire définit comme suit :

$$d_{jt}^t = \begin{cases} 1, & \text{si l'heure de départ } t_j \text{ du vol } j \in J \text{ appartient à la tranche de temps } t \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

3.2 Variables

Les variables utilisées seront présentées dans ce paragraphe. Les variables sont réunies de telle façon à regrouper celles qui concernent les vols, les avions, les équipages et les passagers.

3.2.1 Variables pour les vols

Il existe deux types de variables pour les vols, le premier type est pour les vols arrivants à l'aéroport donné alors que le second type est pour les vols partants de celui-ci :

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{si la copie } k \in K_i \text{ du vol arrivant } i \in I \text{ est sélectionnée} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$x_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{si la copie } l \in L_j \text{ du vol partant } j \in J \text{ est sélectionnée} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

3.2.2 Variables pour les avions

Les variables en rapport avec les avions permettent d'affecter ceux-ci aux vols partant de l'aéroport considéré de telle façon à ce que chaque départ soit effectué par un avion adéquat.

$$a_{ikjl} = \begin{cases} 1, & \text{si l'avion arrivant avec le vol } i \in I \text{ à l'heure } t_k \\ & \text{repart avec le vol } j \in J \text{ à l'heure } t_l \text{ ou plus tard} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Au plus une variable de type a_{ikjl} est définie entre chaque copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et l'ensemble de toutes les copies du départ $j \in J$.

Pour que la variable a_{ikjl} soit définie, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- Le type d'avion arrivant avec le vol i doit appartenir à l'ensemble des types d'avions permis pour le vol j ainsi que pour ses successeurs. En d'autres termes $f_i \in FSA_j$;
- La copie $l \in L_j$ doit être la première des copies du vol $j \in J$ qui est suffisamment tardive pour respecter le temps minimum de connexion prescrit pour les avions du type f_i . Ce temps varie en fonction des types des vols i et j .

Pour permettre à l'avion arrivant avec le vol $i \in I$ à l'heure t_k de partir après l'heure t_l , les variables de suivi $g_{l,l+1}^j$ sont définies entre toutes les copies consécutives $l, l+1 \in J$:

$$g_{l,l+1}^j = \begin{cases} 1, & \text{si l'avion pouvant repartir avec le vol } j \in J \text{ à l'heure } t_l \\ & \text{reste au sol jusqu'au temps } t_{l+1} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

De cette façon, le nombre total de variables en rapport avec les avions (a_{ikjl} et $g_{l,l+1}^j$) est beaucoup plus petit que le cas où seulement les variables a_{ikjl} existeraient. Dans ce dernier cas, les variables a_{ikjl} seraient définies entre chaque copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et chaque copie $l \in L_j$ du vol $j \in J$ respectant le temps minimum de connexion prescrit pour les avions de type f_i et les types des vols correspondant à l'arrivée i et au départ j .

3.2.3 Variables pour les équipages

Les variables en rapport avec les équipages permettent d'affecter ceux-ci aux vols partant de l'aéroport considéré de telle façon à ce que chaque départ soit effectué par un équipage compétant.

$$e_{ikjl} = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage opérationnel sur le vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \text{ ou plus tôt} \\ & \text{effectue par la suite le vol } j \in J \text{ partant à l'heure } t_l \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Au plus une variable e_{ikjl} est définie entre l'ensemble K_i de toutes les copies de l'arrivée $i \in I$ et chaque copie l du vol $j \in J$. Pour que la variable e_{ikjl} soit définie, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- L'équipage opérationnel pour le vol $i \in I$ est qualifié pour au moins un des types d'avion de l'ensemble FSA_j ;
- La durée résiduelle de la journée de travail de l'équipage arrivant avec le vol i à l'heure t_k , mesurée par rapport à la durée maximale permise, doit être supérieure ou égale à la somme des durées des éléments suivants :
 - Durée de la connexion entre l'arrivée réelle du vol i et de l'heure du départ de la copie l du vol $j \in J$;
 - Durée du vol $j \in J$;
 - Durée du débriefing (période qui termine une journée de travail).
 En d'autres termes, l'équipage en question doit être légal pour compléter le vol j au moins.
- L'heure d'arrivée t_k de la copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ est la dernière heure d'arrivée permettant de respecter le temps minimum de connexion prescrit pour les équipages. Ce temps varie en fonction des types des vols i et j .

La variable e_{ikjl}^c , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ permet d'affecter l'équipage opérationnel sur l'arrivée $i \in I$ à un départ $j \in J$ qui sera effectué par le même avion.

$$e_{ikjl}^c = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage opérationnel arrivant avec l'avion affecté au vol } i \in I \\ & \text{arrivant à l'heure } t_k \text{ continue sur le vol } j \in J \\ & \text{partant à l'heure } t_l \text{ sur le même avion} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable e_{ikjl}^c , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ existe si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Il existe une variable a_{ikjl} tel que $t_{k'} \leq t_l$;
- Le temps minimum de connexion entre l'arrivée du vol i à l'heure t_k et le départ j à l'heure t_l n'est pas respecté pour l'équipage considéré;
- L'équipage arrivant avec le vol i à l'heure t_k est légal pour le vol j partant à l'heure t_l .

Pour permettre à un équipage arrivant avant l'heure t_{k+1} de partir avec le vol j à l'heure t_l , les variables $s_{k,k+1}^i$ sont définies entre toutes les copies consécutives $k, k+1 \in K_i$:

$$s_{k,k+1}^i = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage opérationnel sur le vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \\ & \text{attend jusqu'à l'heure } t_{k+1} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

De cette façon, le nombre total de variables en rapport avec les équipages (e_{ikjl} , e_{ikjl}^c et $s_{k,k+1}^i$) est beaucoup plus petit que le cas où seulement les variables e_{ikjl} et e_{ikjl}^c existeraient. Dans ce dernier cas, les variables e_{ikjl} et e_{ikjl}^c seraient définies entre chaque copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et chaque copie $l \in L_j$ du vol $j \in J$ respectant le temps minimum de connexion prescrit pour les équipages entre l'arrivée i et le départ j .

La variable e_{ikjl} , $i \in E$, permet d'affecter un équipage en réserve $k \in K_e$ sur un départ $j \in J$:

$$e_{ikjl} = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage en réserve } i \in E \text{ effectue le vol } j \in J \text{ partant à l'heure } t_l \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour que la variable e_{ikjl} soit définie pour un équipage en réserve $k \in K_e$, les conditions suivantes doivent être satisfaites :

- L'équipage en réserve $k \in K_e$ est qualifié pour au moins un des types d'avions de l'ensemble FSA_j .
- L'heure de départ du vol j doit être égale ou postérieure à l'heure de disponibilité de l'équipage k .

La variable e_{ikjl}^d , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ permet d'affecter un équipage qui était en *deadhead* sur une arrivée $i \in I$ sur un départ $j \in J$:

$$e_{ikjl}^d = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage } d \text{ en } \textit{deadhead} \text{ pour le vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \text{ ou plus tôt} \\ & \text{est affecté au vol } j \in J \text{ partant à l'heure } t_l \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable e_{ikjl}^d , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ existe si les conditions suivantes sont satisfaites :

- L'équipage en *deadhead* sur le vol $i \in I$ est qualifié pour au moins un des types d'avion de l'ensemble FSA_j ;
- D'autres conditions sont identiques à celles pour les variables e_{ikjl} , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$.

La variable e_{ijkl}^{dc} , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ permet d'affecter un équipage qui était en *deadhead* sur une arrivée $i \in I$ sur un départ $j \in J$, ces deux vols étant faits par le même avion :

$$e_{ijkl}^{dc} = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage } d \text{ en } \textit{deadhead} \text{ arrivant avec l'avion affecté au vol } i \in I \\ & \text{à l'heure } t_k \\ & \text{continue sur le vol } j \in J \text{ partant à l'heure } t_l \text{ avec le même avion} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable e_{ijkl}^{dc} , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ existe si les conditions d'existence pour la variable e_{ijkl}^c , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ sont respectées.

Pour permettre à un équipage d en *deadhead* arrivant à l'heure t_{k+1} ou plus tôt de partir avec le vol j à l'heure t_l , les variables $m_{k,k+1}^{di}$ sont définies entre toutes les copies consécutives $k, k+1 \in K_i$:

$$m_{k,k+1}^{di} = \begin{cases} 1, & \text{si l'équipage } d \text{ en } \textit{deadhead} \text{ sur le vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \\ & \text{attend jusqu'à l'heure } t_{k+1} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour des raisons similaires à l'ajout des variables $s_{k,k+1}^i$, l'adjonction des variables $m_{k,k+1}^{di}$ permet de réduire le nombre total de variables.

3.2.4 Variables pour les passagers

Tout d'abord, les notions de durée minimale pour qu'une partie ou que la totalité des passagers qui doivent effectuer un transfert puisse le faire vont être introduites :

$T_2^c(i, j)$: Durée minimale pour que tous les passagers qui doivent effectuer la connexion entre le vol $i \in I$ et le vol $j \in J$ puissent la faire.

$T_1^c(i, j)$: Durée en dessous de laquelle aucun passager ne peut effectuer la connexion entre le vol $i \in I$ et le vol $j \in J$.

Les valeurs des T_1^c et T_2^c sont déterminées en fonction des types des vols i et j .

f_{ijkl}^r : Pourcentage des passagers qui réussissent la connexion entre les vols $i \in I$ et $j \in J$.

$$f_{ijkl}^r = \begin{cases} 100, & \text{si } t_l - t_k \geq T_2^c(i, j) \\ f(t_l - t_k - T_2^c(i, j)), & \text{si } T_1^c(i, j) \leq t_l - t_k < T_2^c(i, j) \\ 0, & \text{autrement} \end{cases}$$

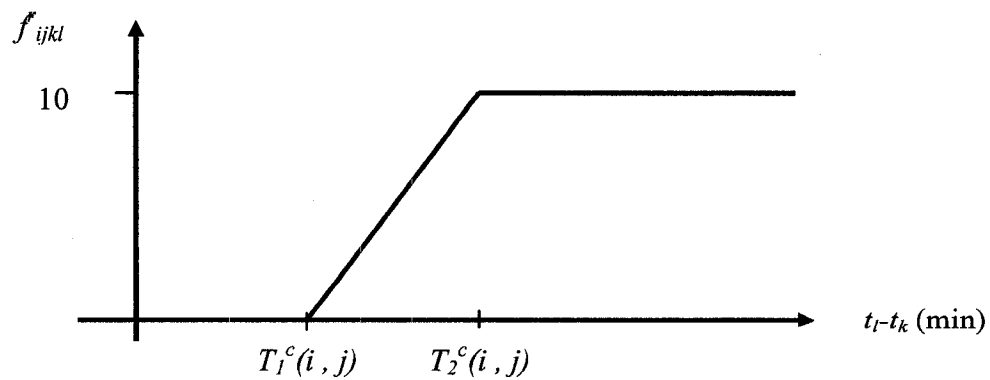


Figure 3.1 : Pourcentage du nombre de passagers pouvant effectuer une connexion en fonction du temps imparti pour le faire

Les variables en rapport avec les passagers sont de deux types. Le premier type représente les passagers qui doivent changer d'avion pour effectuer leurs transferts alors que le second type sert à représenter les passagers qui n'ont pas besoin de changer d'avion pour continuer leurs voyages.

$$p_{ijkl} = \begin{cases} 1, & \text{si les passagers du vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \text{ peuvent} \\ & \text{faire la connexion pour le vol } j \in J \text{ à l'heure } t_l \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable p_{ijkl} , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ existe si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Il existe un nombre important de passagers qui font la connexion entre le vol i et le vol j d'après la planification;
- Le temps de connexion entre la copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et la copie $l \in L_j$ du vol $j \in J$ est suffisante, c'est-à-dire $T_1^c(i, j) < t_l - t_k$.

$$p_{ijkl}^c = \begin{cases} 1, & \text{si les passagers du vol } i \in I \text{ arrivant à l'heure } t_k \text{ continuent} \\ & \text{sur le vol } j \in J \text{ partant à l'heure } t_l \text{ sur le même avion} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La variable p_{ijkl}^c , $i \in I$, $k \in K_i$, $j \in J$, $l \in L_j$ existe si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Il existe une variable a_{ijkl}^* tel que $t_{l^*} \leq t_l$;
- La connexion entre le vol i et le vol j est importante;
- Le temps de connexion entre la copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et la copie $l \in L_j$ du vol $j \in J$ est insuffisante pour que tous les passagers puissent faire la connexion, c'est-à-dire $t_l - t_k < T_2^c(i, j)$.

3.3 Contraintes

Pour une meilleure lisibilité, les contraintes ont été regroupées en fonction de leurs origines, c'est-à-dire vis-à-vis des vols, de l'aéroport où survient la perturbation, des avions, des équipages et des passagers.

3.3.1 Contraintes liées aux vols

Les contraintes pour les vols sont que chaque vol doit être exécuté une seule fois ou être annulé.

- Chaque arrivée doit être couverte ou annulée :

$$\sum_{k \in K_i \cup \{k_i^a\}} x_{ik} = 1, \forall i \in I \quad (1)$$

- Chaque départ doit être couvert ou annulé :

$$\sum_{l \in L_j \cup \{l_j^a\}} x_{jl} = 1, \forall j \in J \quad (2)$$

3.3.2 Contraintes liées à l'aéroport considéré

La capacité de l'aéroport pour toute tranche de temps $t \in T$ doit être respectée. Le nombre de vols arrivants et de ceux partants doit être inférieur ou égal à la capacité maximale de l'aéroport en tout temps :

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} d_{ik}^t x_{ik} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} d_{jl}^t x_{jl} \leq S_t, \forall t \in T \quad (3)$$

3.3.3 Contraintes liées aux avions

Les contraintes liées aux avions permettent de lier les variables correspondantes aux avions et aux vols.

- Après avoir effectué un vol $i \in I$, un avion peut rester inactif pendant le reste de la période considérée ou peut être affecté à un départ $j \in J$:

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} a_{ikjl} \leq x_{ik}, \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (4)$$

- Un avion doit être affecté à chaque départ opérationnel :

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} a_{ikjl} + g_{l-1,l}^j = x_{jl} + g_{l,l+1}^j, \forall j \in J, \forall l \in L_j \quad (5)$$

3.3.4 Contraintes liées aux équipages

L'affectation d'un équipage (arrivant avec un vol $i \in I$ ou en réserve) à un départ $j \in J$ est faisable si les deux vols sont opérationnels et si cet équipage est qualifié pour le type d'avion affecté au départ $j \in J$.

- Au moins un et au plus β_j équipages doivent être affectés à chaque départ opérationnel :

$$x_{jl} \leq \sum_{i \in I \cup E} \sum_{k \in K_i} e_{ikjl} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} e_{ikjl}^c + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{d \in D_i} e_{ikjl}^d + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{d \in D_i} e_{ikjl}^{dc} \leq \beta_j \cdot x_{jl}, \forall j \in J, \forall l \in L_j \quad (6)$$

- L'équipage arrivant sur un vol comme étant l'équipage opérationnel peut être affecté à un départ ou rester inactif pendant le reste de la période considérée :

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (e_{ijkl} + e_{ijkl}^c) + s_{k,k+1}^i \leq x_{ik} + s_{k-1,k}^i, \forall i \in I, \forall k \in K_i \quad (7)$$

- L'équipage arrivant sur un vol comme un équipage en *deadhead* peut être affecté à un départ ou rester inactif pendant le reste de la période considérée :

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (e_{ijkl}^d + e_{ijkl}^{dc}) + m_{k,k+1}^{di} \leq x_{ik} + m_{k-1,k}^{di}, \forall i \in I, \forall k \in K_i, \forall d \in D_i \quad (8)$$

- Un équipage en réserve peut être affecté à un départ ou rester inactif :

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} e_{ijkl} \leq 1, \forall i \in E, \forall k \in K_i \quad (9)$$

- Au moins un des équipages affectés à un départ doit être qualifié pour le type d'avion affecté à ce départ :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} a_{ijkl} &\leq \sum_{i \in I \cup E: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} e_{ijkl} + \sum_{i \in I: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} e_{ijkl}^c + \sum_{i \in I: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} \sum_{d \in D_i} e_{ijkl}^d + \sum_{i \in I: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} \sum_{d \in D_i} e_{ijkl}^{dc} \\ &\leq \beta_j \cdot \sum_{i \in I: f_i = f_j} \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} a_{ijkl}, \forall j \in J, \forall f_j \in FSA_j \end{aligned} \quad (10)$$

- L'équipage opérationnel ou les équipage *deadhead* peuvent suivre l'avion sur lequel il sont arrivés :

$$\sum_{l \in L_j} e_{ikjl}^c + \sum_{d \in D_i} \sum_{l \in L_j} e_{ikjl}^{dc} \leq \sum_{l \in L_j} a_{ikjl}, \forall i \in I, \forall k \in K_i, \forall j \in J \quad (11)$$

3.3.5 Contraintes liées aux passagers

La connexion des passagers entre deux vols est faisable seulement si ces deux vols sont opérationnels.

- Les connexions des passagers d'une arrivée possible à l'heure t_k du vol $i \in I$ avec le départ $j \in J$ ne sont faisables que si le vol $i \in I$ arrive effectivement à l'heure t_k :

$$\sum_{l \in L_j} (p_{ikjl} + p_{ikjl}^c) \leq x_{ik}, \forall i \in I, \forall k \in K_i, \forall j \in J \quad (12)$$

- Les connexions des passagers du vol $i \in I$ au départ possible à l'heure t_l du vol $j \in J$ ne sont faisables que si le vol $j \in J$ part effectivement à l'heure t_l :

$$\sum_{k \in K_i} (p_{ikjl} + p_{ikjl}^c) \leq x_{jl}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall l \in L_j \quad (13)$$

- Les passagers arrivants avec le vol $i \in I$ peuvent continuer sur le vol $j \in J$ sur le même avion si ces deux vols sont effectivement effectués par le même avion :

$$\sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} p_{ikjl}^c \leq \sum_{k \in K_i} \sum_{l \in L_j} a_{ikjl}, \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

Il faut savoir que seulement si le vol $i \in I$ et le vol $j \in J$ sont opérationnels un certain pourcentage des passagers planifiés sur cette connexion pourra effectuer celle-ci. Ce pourcentage varie en fonction du laps de temps entre l'arrivée réelle du vol $i \in I$ et le départ réel du vol $j \in J$. Pour plus de détails sur le calcul de ce pourcentage, on peut se référer à la Figure 3.1 au chapitre 3.2.4 de ce mémoire. Si l'arrivée $i \in I$ et le départ $j \in J$ se font par le même avion, alors tous les passagers qui doivent effectuer la connexion entre ces deux vols peuvent la faire.

3.4 Fonction objectif

Lorsque survient une perturbation, en plus de minimiser les inconvénients pour les passagers et les équipages, la compagnie aérienne souhaite minimiser les pertes éventuelles. Minimiser les pertes revient à :

- Minimiser le coût d'opérations moins le revenu récupéré pour l'aéroport considéré;
- Minimiser les pertes ultérieures.

Pour une plus grande clarté, la fonction objectif sera décomposée en plusieurs parties, chaque partie faisant référence aux coûts engendrés par les vols, les avions, les passages et les équipages.

3.4.1 Coûts vis-à-vis des vols

Les coûts vis-à-vis des vols sont les coûts associés aux variables qui définissent l'heure d'arrivée d'un vol $i \in I$ ou de départ d'un vol $j \in J$ ou aux variables qui définissent l'annulation de ceux-ci.

cv_{ik}^e : Coût d'un nouvel équipage qui doit remplacer l'équipage planifié pour le vol $i \in I$ arrivant à l'heure t_k . Ce changement d'équipage, qui a lieu à l'aéroport de départ du vol i , devient nécessaire lorsque la journée de travail de l'équipage prévu doit se terminer avant l'heure t_k .

f_{ik}^r : Pourcentage estimé du total des passagers sur le vol i qui décident de rester sur ce vol si son départ tardif est à l'heure t_k .

rv_{ik}^r : Revenu estimé associé aux passagers prévus qui décident de rester sur le vol i arrivant à l'heure t_k ,

$$rv_{ik}^r = \text{Nombre total des passagers sur le vol } i \bullet \frac{f_{ik}^r}{100} \bullet \text{Coût moyen d'un billet pour le vol } i.$$

f_{jl}^r : Pourcentage estimé du total des passagers locaux et ceux provenant des connexions peu importantes qui décident de rester sur le vol $j \in J$ si son départ tardif est à l'heure t_l .

rv_{jl}^r : Revenu estimé associé aux passagers prévus qui décident de rester sur le vol j partant à l'heure t_l ,

$$rv_{jl}^r = (\text{Nombre des passagers sur le vol } j - \text{Nombre des passagers des connexion importantes}) \bullet$$

$$\frac{f_{jl}^r}{100} \bullet \text{Coût moyen d'un billet pour le vol } j$$

$cv_{ik_l^a}^a$: Coût d'annulation du vol i égal au coût d'opération de l'avion planifié pour le vol $i \in I$, qui est récupéré suite à l'annulation de ce vol, moins le revenu associé au total des passagers prévus sur le vol $i \in I$.

$cv_{jl_l^a}^a$: Coût d'annulation du vol j égal au coût d'opération de l'avion planifié pour le vol $j \in J$, qui est récupéré suite à l'annulation de ce vol, moins le revenu associé au total des passagers prévus sur le vol $j \in J$.

La fonction à minimiser vis-à-vis des vols est :

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (-rv_{ik}^r \cdot x_{ik}) + \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (-rv_{jl}^r \cdot x_{jl}) + \sum_{i \in I} (-cv_{ik_l^a}^a \cdot x_{ik_l^a}) + \sum_{j \in J} (-cv_{jl_l^a}^a \cdot x_{jl_l^a})$$

3.4.2 Coûts vis-à-vis des avions

Les coûts vis-à-vis des avions sont les coûts associés aux variables qui définissent l'affectation des avions aux vols.

ca_{ikjl}^o : Différence entre le coût d'opération du type d'avion $f_j^a \in FSA_j$ affecté au départ $j \in J$ et le coût d'opération associé au type d'avion $f_j^p \in F_j$ planifié pour le départ $j \in J$. Valeur qui peut être positive, négative ou nulle.

ca_{ikjl}^t : Coût de remorquage d'avion entre le vol $i \in I$ et le vol $j \in J$. Valeur qui dépend du type d'avion.

$$ca_{ikjl}^t \begin{cases} = 0, \text{ si les vols } i \text{ et } j \text{ sont de même type} \\ \quad \text{(i.e. domestique, en transit ou international)} \\ > 0, \text{ autrement} \end{cases}$$

ca_{ikjl}^b : Bonus lorsque l'avion planifié ou un avion de même type prévu pour effectuer le vol $j \in J$, effectue celui-ci. Bonus dépendant du type d'avion.

$$ca_{ikjl}^b = \begin{cases} k_1 \bullet \text{Coût fixe du type } x, \\ \quad \text{si l'avion planifié va effectivement effectuer le vol } j \\ k_2 \bullet \text{Coût fixe du type } x, \\ \quad \text{si l'avion qui va effectuer le vol } j \text{ est du même type que l'avion planifié} \\ 0, \text{ autrement} \end{cases}$$

où k_1 et k_2 sont deux constantes tel que $0 < k_2 < k_1$

ra_{ikjl}^p : Revenu perdu associé aux passagers refusés à cause de la capacité insuffisante du type d'avion $f_j^a \in FSA_j$ affecté au départ du vol j .

$$ra_{ikjl}^p = \text{Max}\{0, \text{nombre de passagers prévus sur le vol } j - \text{capacité}(f_j^a)\} \bullet$$

Coût moyen d'un billet pour le vol j

La fonction à minimiser vis-à-vis des avions est :

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (ca_{ikjl}^o + ca_{ikjl}^t - ca_{ikjl}^b + ra_{ikjl}^p) \bullet a_{ikjl}$$

3.4.3 Coûts vis-à-vis des équipages

Le coût d'un équipage est fonction du nombre d'heures de travail. Une journée de travail commence par une période de préparation (*briefing*), s'achève par un débriefing, et se compose d'une succession de vols et de connexions.

$t_{j_{\text{dernier légale de } SE_j}}^{\text{arrivée planifiée}}$: Heure planifiée d'arrivée du dernier vol de la suite SE_j pour lequel l'équipage est légal.

$t_{j+|SE_j|-1}^{\text{arrivée planifiée}}$: Heure planifiée d'arrivée du dernier vol de la suite SE_j .

$t_j^{\text{départ planifié}}$: Heure planifiée de départ du vol j .

$t_{j_{\text{dernier légale de } SE_j}+1}^{\text{départ planifié}}$: Heure planifiée de départ du premier vol de la suite SE_j pour lequel l'équipage n'est pas légal.

Hr_{ik}^e : Nombre d'heures résiduelles de travail prévues pour l'équipage arrivant avec le vol i à l'heure t_k . C'est la journée résiduelle de travail prévue après le vol $i \in I$.

ce_{ikjl}^s : Coût supplémentaire de l'équipage arrivant avec le vol $i \in I$ à l'heure t_k et partant avec le vol $j \in J$ à l'heure t_l .

$$ce_{ikjl}^s = \text{Max} \{ 0, (t_{j_{\text{dernier légale de } SE_j}}^{\text{arrivée planifiée}} + \text{débriefing} - t_j^{\text{départ planifié}}) - Hr_{ik}^e \} \bullet \text{Coût unitaire d'équipage}$$

ce_{ikjl}^n : Coût d'un nouvel équipage pour les vols résiduels $j_{\text{dernier légale de } SE_j} + 1, \dots, j + |SE_j| - 1$.

$$ce_{ikjl}^n = \text{Max} (c, t_{j+|SE_j|-1}^{\text{arrivée planifiée}} - t_{j_{\text{dernier légale de } SE_j}+1}^{\text{départ planifié}} + \text{briefing} + \text{débriefing}) \bullet$$

Coût unitaire d'un équipage

où c : Constante positive dont la valeur est souvent de 4 heures, et qui est payée aux équipages dont la journée de travail est inférieure à 4 heures.

ce_{ikjl} : Coût supplémentaire si l'équipage opérationnel arrivant avec le vol $i \in I$ à l'heure t_k est affecté au départ $j \in J$ à l'heure t_l .

$$ce_{ikjl} = ce_{ikjl}^s + ce_{ikjl}^n$$

ce_{ikjl}^d : Coût supplémentaire si l'équipage d en *deadhead* sur le vol $i \in I$ arrivant à l'heure t_k est affecté au départ $j \in J$ à l'heure t_l . Ce coût est calculé de la même façon que le coût d'un équipage opérationnel.

ce_{ikjl}^b : Bonus pour avoir préserver la connexion pour l'équipage planifiée entre les vols $i \in I$ et $j \in J$.

ce_{ikjl}^{db} : Bonus pour préserver la connexion de l'équipage d en *deadhead* planifiée entre les vols $i \in I$ et $j \in J$.

$$ce_{ikjl}^{db} = ce_{ikjl}^b$$

ce_{ikjl}^r : Coût d'utilisation d'un équipage en réserve qualifié pour le vol $j \in J$ et disponible à l'heure t_k .

Notons que tous les équipages appartenant à un même groupe $e \in E$ ont le même coût d'utilisation.

La fonction à minimiser vis-à-vis des équipages est :

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J: \beta_j=1} \sum_{l \in L_j} (ce_{ikjl} - ce_{ikjl}^b) \cdot (e_{ikjl} + e_{ikjl}^c) + \\ \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J: \beta_j=1} \sum_{l \in L_j} \sum_{d \in D_i} (ce_{ikjl}^d - ce_{ikjl}^{db}) \cdot (e_{ikjl}^d + e_{ikjl}^{dc}) + \sum_{i \in E} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (ce_{ikjl}^r \cdot e_{ikjl}) \end{aligned}$$

3.4.4 Coûts vis-à-vis des passagers

Les coûts vis-à-vis des passagers proviennent des gains lorsqu'un vol est conservé et/ou une connexion est conservée ou de la perte de revenue lorsqu'un vol est annulé.

rp_{ijkl} : Revenu récupéré associé aux passagers qui réussissent la connexion importante entre l'arrivée i à l'heure t_k et le départ j à l'heure t_l .

P_{ijkl}^r : Fraction du nombre total des passagers qui réussissent la connexion.

$$P_{ijkl}^r = \begin{cases} 1, & \text{si la connexion } (i, j) \text{ est faite par un même avion} \\ \frac{f_{ijkl}^r}{100}, & \text{sinon} \end{cases}$$

La fonction à minimiser vis-à-vis des passagers est :

$$\text{Min} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (-rp_{ijkl} \cdot p_{ijkl}) + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \sum_{j \in J} \sum_{l \in L_j} (-rp_{ijkl}^c \cdot p_{ijkl}^c)$$

3.5 Améliorations

Suite à l'utilisation de l'interface graphique qui sera présentée au chapitre 4 de ce mémoire, certaines améliorations du modèle mathématique ainsi que de son implantation informatique ont été faites.

L'utilisation de l'interface graphique a aussi permis de débusquer un certain nombre d'erreurs dans l'implantation informatique de ce modèle mathématique. Ceci a été rendu possible grâce au grand nombre de scénarios qui ont été créés à l'aide de l'interface graphique. Par exemple, on a pu se rendre compte que la procédure de séparation et d'évaluation (*branch-and-bound*) utilisée pouvait être grandement améliorée, ce qui fut fait.

Une des contributions du travail fait dans le cadre de cette maîtrise à propos du modèle mathématique est une réduction du nombre de variables du modèle, ce qui sera présenté dans la section 3.5.1, ainsi que des modifications en ce qui concerne la fonction objectif (sections 3.5.2 et 3.5.3).

3.5.1 Utilisations d'arcs d'attente

Dans cette partie du propos, il sera présenté les améliorations apportées en ce qui concerne le réseau pour les avions et le réseau pour les équipages. Il sera aussi question des contraintes qui ont rendu impossible la modification du réseau qui concerne les passagers.

- Réseau pour les avions

Comme il a été mentionné dans la partie 3.2.2. de ce mémoire, l'ajout des variables $g_{l,l+1}^j$, appelés "arcs d'attente" lorsque le modèle est représenté sous forme de réseau, a permis de réduire le nombre de variables du type a_{ikjl} .

Comme on peut le voir sur la figure 3.2 ci-dessous, sans les arcs de type $g_{l,l+1}^j$, le nombre d'arcs du réseau est quadratique par rapport au nombre de vols arrivants et de vols partants. Par contre avec les arcs de type $g_{l,l+1}^j$, le nombre d'arcs devient linéaire par rapport au nombre de vols concernés, comme le montre fort bien la figure 3.3 ci-dessous.

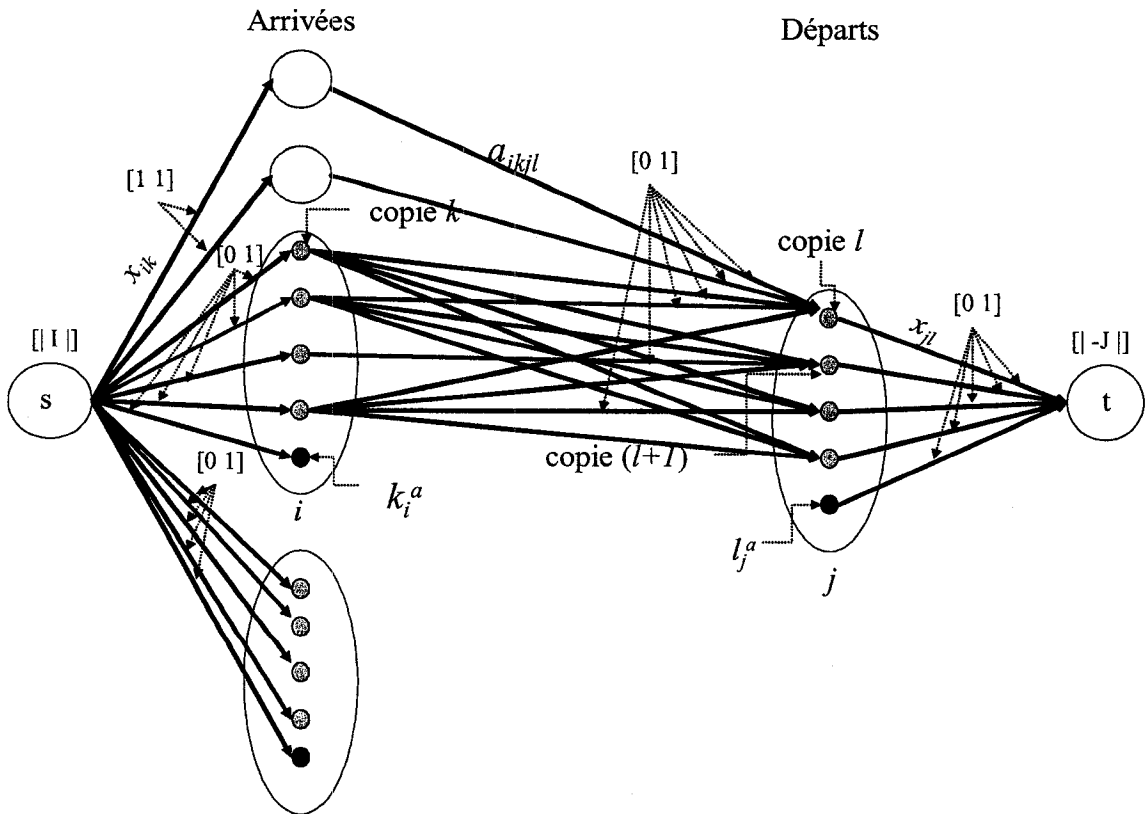


Figure 3.2 : Réseau pour les avions sans "arc d'attente"

- Réseau pour les équipages

Comme il a été mentionné dans la partie 3.2.2. de ce mémoire, l'ajout des variables $s_{k,k+1}^i$ et $m_{k,k+1}^{di}$, appelés "arcs d'attente" lorsque le modèle est représenté sous forme de réseau, a permis de réduire le nombre de variables du type e_{ikjl} , e_{ikjl}^c , e_{ikjl}^d et e_{ikjl}^{dc} .

Comme on peut le voir sur la figure 3.4 ci-dessous, sans les arcs de type $s_{k,k+1}^i$ ou de type $m_{k,k+1}^{di}$, le nombre d'arcs du réseau est quadratique par rapport au nombre de vols arrivants et de vols partants. Par contre avec les arcs de type $s_{k,k+1}^i$ ou de type $m_{k,k+1}^{di}$, le nombre d'arcs devient linéaire par rapport au nombre de vols concernés, comme le montre fort bien la figure 3.5 ci-dessous.

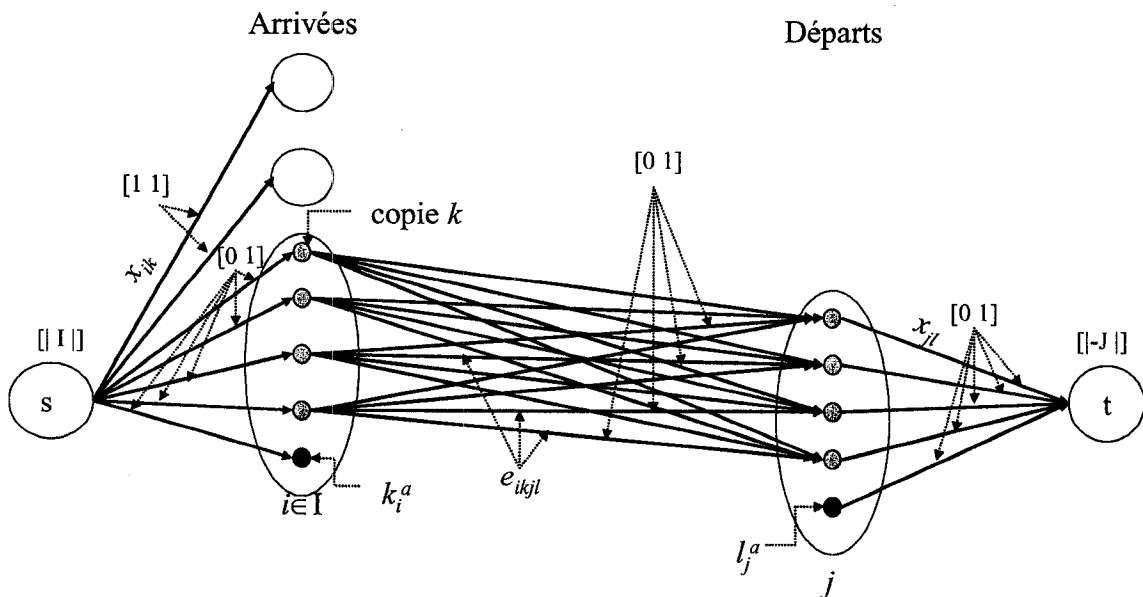


Figure 3.4 : Réseau pour les équipages sans "arc d'attente"

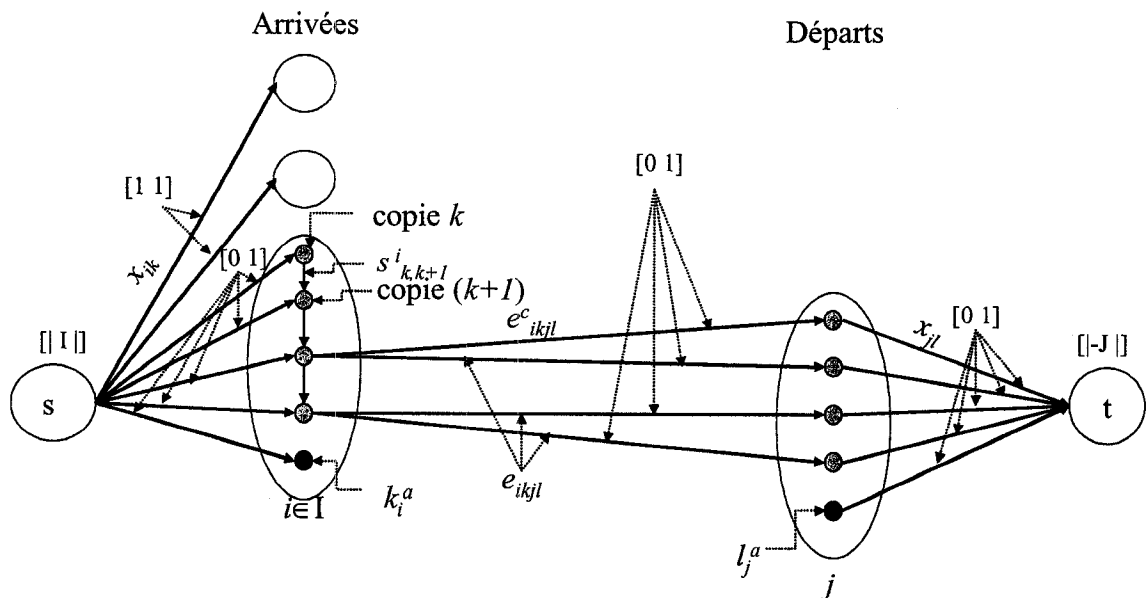


Figure 3.5 : Réseau pour les équipages avec les arcs de type $s_{k,k+1}^i$ et $m_{k,k+1}^{di}$

De cette façon, le nombre total d'arcs en rapport avec les équipages ($e_{ikjl}, e_{ikjl}^c, e_{ikjl}^d, e_{ikjl}^{dc}, s_{k,k+1}^i$ et $m_{k,k+1}^{di}$) est beaucoup plus petit que le cas où seulement les arcs $e_{ikjl}, e_{ikjl}^c, e_{ikjl}^d$ et e_{ikjl}^{dc} existeraient. Dans ce dernier cas, les arcs $e_{ikjl}, e_{ikjl}^c, e_{ikjl}^d$ et e_{ikjl}^{dc} seraient définies entre chaque copie $k \in K_i$ du vol $i \in I$ et chaque copie $l \in L_j$ du vol $j \in J$ respectant le temps minimum de connexion prescrit pour les équipages entre l'arrivée i et le départ j .

- Gains pour les réseaux concernant les avions et les équipages sur un exemple

Prenons comme hypothèse que 100 vols arrivent, que 100 vols partent de l'aéroport concerné pendant la période de réduction et que chaque vol à 6 horaires possibles pour atterrir ou decoller suivant le cas. De plus, 100 équipages sont considérés dans cet exemple.

Sans "arc d'attente", on aurait alors au maximum $6 \times 6 \times 100 \times 100 = 360\,000$ arcs de type a_{ijkl} . Car dans le cas où les avions peuvent effectuer toutes les connexions, il existe un arc a_{ijkl} entre chaque copie k du vol i et chaque copie l du vol j . De même, il y aurait également $6 \times 6 \times 100 \times 100 = 360\,000$ arcs de type e_{ijkl} . Alors qu'avec les "arcs d'attente", on a au maximum $6 \times 100 \times 100 = 60\,000$ arcs de type a_{ijkl} et aussi $6 \times 100 \times 100 = 60\,000$ arcs de type e_{ijkl} . De plus, on aurait $5 \times 100 = 500$ "arcs d'attente" pour les avions et aussi $5 \times 100 = 500$ "arcs d'attente" pour les équipages. Dans ce cas ci, l'ajout des "arcs d'attente" a permis de passer de 720 000 arcs pour les avions et les équipage à 121 000, ce qui représente un gain important.

- Réseau pour les passagers

Pour les passagers, il n'est pas possible de créer des "arcs d'attente" car le nombre de passagers pouvant effectuer une connexion entre une arrivée i et un départ j n'est pas linéaire par rapport au temps comme il a été mentionné dans la partie 3.2.4. de ce mémoire. C'est pour cela que le réseau en ce qui concerne les passagers n'a pas été modifié par rapport au réseau initialement créé. On peut voir ce réseau sur la Figure 3.6. Toutes les connexions possibles pour les passagers sont explicitement exprimées par les variables p_{ikjl} et les variables p_{ikjl}^c .

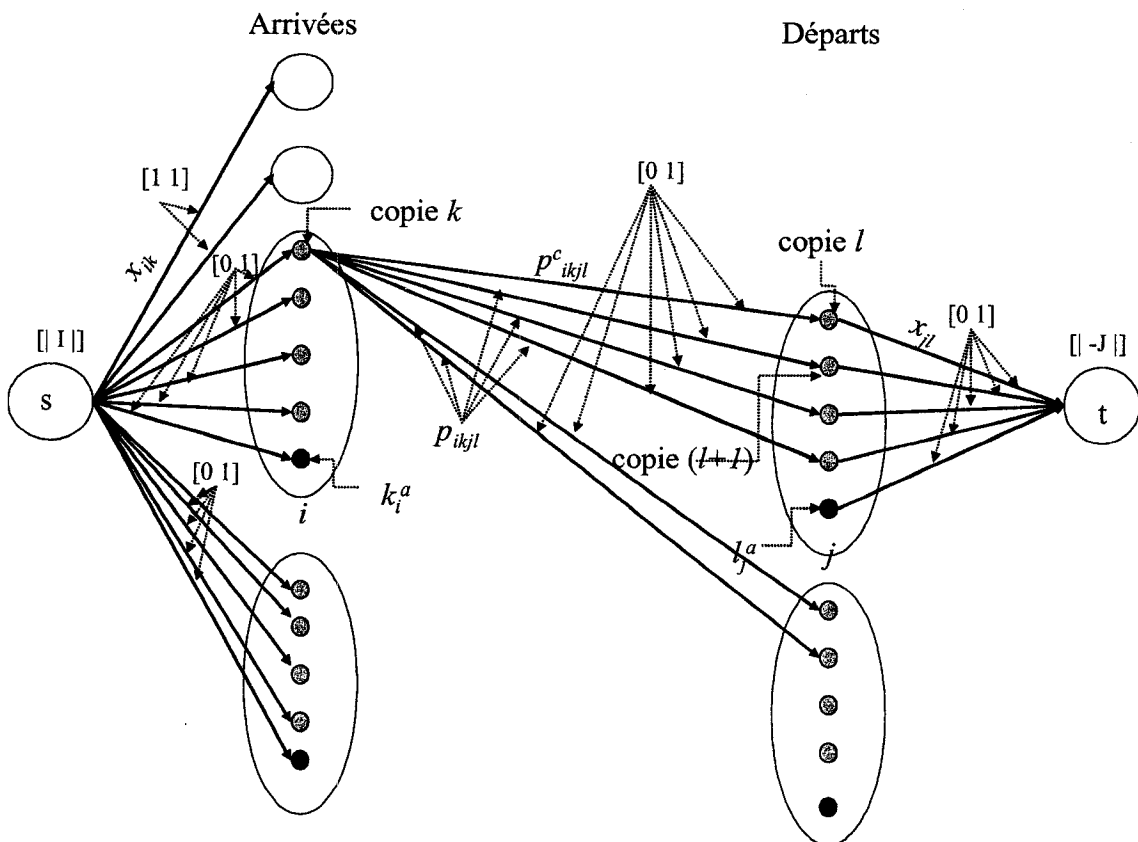


Figure 3.6 : Réseau pour les passagers

3.5.2 Raffinement des coûts vis-à-vis des avions

Lors des tests effectués, je me suis rendu compte que l'optimiseur faisait des permutations inappropriées d'affectation pour les avions.

Initialement, le paramètre ca_{ijkl}^b présenté à la partie 3.4.2. de ce mémoire ne prenait que deux valeurs possibles :

$$ca_{ijkl}^b = \begin{cases} k_2 \bullet \text{Coût fixe du type } x, \\ \quad \text{si l'avion qui va effectuer le vol } j \text{ est du même type que l'avion planifié} \\ 0, \text{ autrement} \end{cases} .$$

Ceci avait pour conséquence que l'optimiseur effectuait parfois des permutations entre deux avions de même type si l'un pouvait effectuer les vols de l'autre et vice-versa. Ces changements n'apportent aucun gain en ce qui concerne la solution trouvée, mais au contraire ajoutent des modifications inutiles aux horaires planifiés. C'est pour cela que le paramètre ca_{ijkl}^b a été modifié pour être égal à :

$$ca_{ijkl}^b = \begin{cases} k_1 \bullet \text{Coût fixe du type } x, \\ \quad \text{si l'avion planifié va effectivement effectuer le vol } j \\ k_2 \bullet \text{Coût fixe du type } x, \\ \quad \text{si l'avion qui va effectuer le vol } j \text{ est du même type que l'avion planifié} \\ 0, \text{ autrement} \end{cases} .$$

De cette façon, on préserve le plus possible les itinéraires initialement prévus pour les avions. Ce raffinement permet aussi de distinguer les solutions réalisables qui n'apportent pas de changements inutiles aux affectations des avions initialement prévues et celles qui en apportent en faisant une distinction entre ces dernières. Ces distinctions concernent le fait que l'avion qui va effectuer le vol j est de même type ou pas que l'avion qui été planifié pour le faire.

3.5.3 Raffinement des coûts vis-à-vis équipages

Lors des analyses des tests effectués, j'ai remarqué que l'optimiseur faisait des permutations inutiles pour les affectation pour les équipages.

Initialement, il n'y avait aucun moyen à ce que l'optimiseur intègre le fait qu'il était important de modifier le moins possible les affectations des équipages. Cette absence avait pour conséquence d'avoir un nombre important de changements d'affectation des équipages sans que cela apporte une quelconque amélioration sur la qualité de la solution. Les raisons étant les mêmes que celles présentées pour les avions (c.f. 3.5.2)

C'est pour cela que les bonus ce_{ijkl}^b et ce_{ijkl}^{db} présentés au chapitre 3.4.3. de ce mémoire ont été ajoutés. Cet ajout a permis de réduire de façon non négligeable le nombre de changements des équipages sans augmenter le temps de résolution.

CHAPITRE 4 : INTERFACE GRAPHIQUE

Dans le cadre de cette recherche, une interface graphique a été développée. Cette interface permet notamment de :

- Visualiser l'horaire planifié;
- Retarder un vol manuellement;
- Annuler un vol manuellement;
- Visualiser les problèmes éventuels comme un temps de connexion trop court entre deux vols;
- Modifier la période de perturbation;
- Visualiser les modifications proposées par l'optimiseur;
- Etc.

L'interface graphique qui sera exposée a été développée en java. Tout d'abord un rapide historique de ce langage informatique sera fait au chapitre 4.1. Par la suite, on présentera l'interface graphique aux chapitres 4.2, 4.3 et 4.4. Le chapitre 4.5 fera l'objet d'une analyse organique de l'interface graphique ainsi qu'une présentation succincte des classes informatiques développées pour l'interface graphique.

4.1 Historique du langage informatique java

Le langage java a été conçu en 1991 par *Sun MicroSystem* dans le but initial de développer des logiciels embarqués pour contrôler des appareils électroniques et leurs permettre de communiquer entre eux. Les développeurs voulurent un langage peu encombrant qui permette de créer des applications sûres, c'est-à-dire qui ne peuvent pas faire de dommages sur la machine exécutrice.

Dérivé du C++, le langage java en perd les inconvénients qui sont à l'origine des principales erreurs. Cela comprend :

- La suppression des pointeurs;
- L'abandon de la surcharge des opérateurs;
- L'abandon de l'héritage multiple;
- La libération de mémoire est transparente pour l'utilisateur (il n'est plus nécessaire de créer de destructeur);
- Une meilleure gestion des erreurs;
- Les chaînes et les tableaux sont désormais des objets qui font partie intégrante du langage.

Toutefois, java est beaucoup moins rapide que le langage C++, il perd en rapidité ce qu'il gagne en compatibilité. Java est un langage à la fois compilé et interprété. La compilation du langage java produit un fichier dans un langage intermédiaire entre le binaire (langage machine) et le code saisi (langage dans lequel le programmeur développe). Ce *ByteCode* généré sera ensuite interprété par une machine virtuelle, fonctionnant elle, dans un environnement particulier (par exemple : *Windows*, *MacOs*, *Linux*, ...).

4.2 Présentation générale de l'interface graphique

L'interface graphique se compose de quatre fenêtres :

- Une fenêtre qui présente l'horaire initialement planifié (fenêtre *Initial Schedule*);
- Une fenêtre qui permet de retarder ou d'annuler un vol ainsi que de lancer l'optimiseur (fenêtre *Manual Changing*);
- Une fenêtre qui présente les modifications proposées par l'optimiseur (fenêtre *Modifications*);

- Une fenêtre qui présente l'horaire "final" qui incorpore les modifications proposées par l'optimiseur (fenêtre *Final Schedule*).

4.3 Caractéristiques communes à toutes les fenêtres de l'interface graphique

L'interface graphique se compose de plusieurs fenêtres qui sont faites sur le même canevas. Pour décrire cette structure générale la fenêtre ci-dessous sera utilisée.

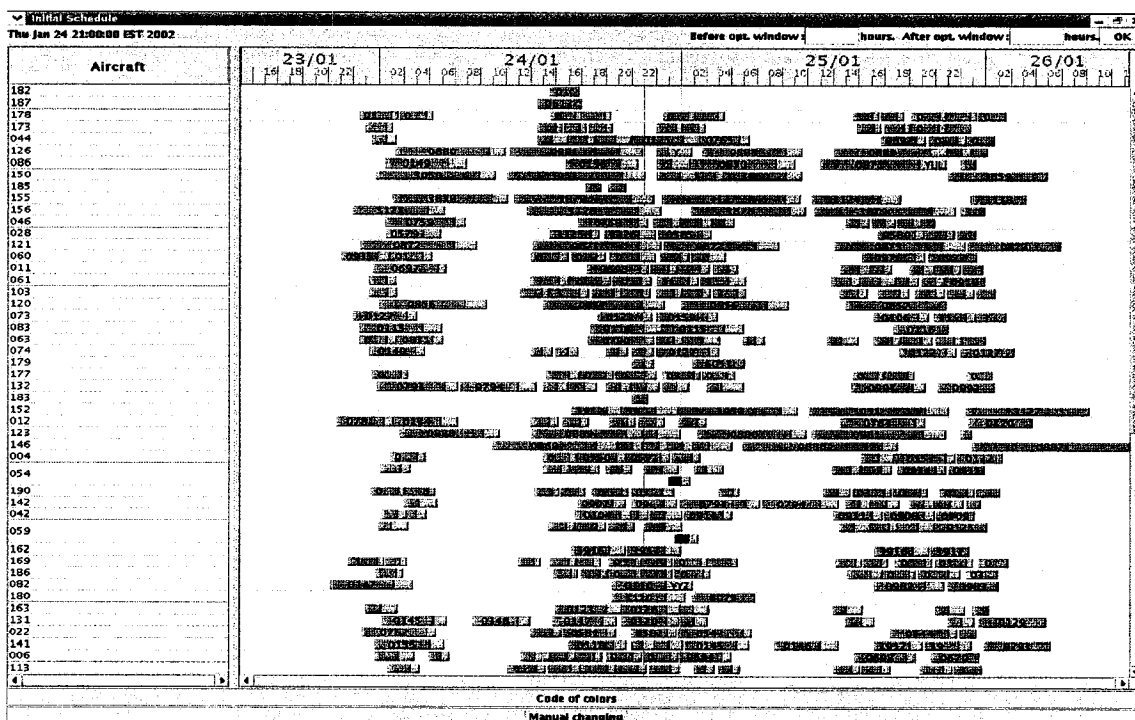


**Figure 4.1 : Fenêtre de référence utilisée pour montrer
la structure générale des fenêtres**

Chaque fenêtre peut être décomposée en 3 parties :

- Un "bandeau de tête";
- Une liste des options possibles;
- Un diagramme de Gantt.

4.3.1 Description du "bandeau de tête"

Ce bandeau est composé de plusieurs parties distinctes :

- Sur la première ligne, le nom générique de la fenêtre est indiqué. Dans notre exemple ce titre est *Initial Schedule*;
- Au début de la deuxième ligne, on retrouve la date et l'heure actuelles. Dans notre exemple, c'est le 24 janvier 2002 à 21 :00;
- A la fin de la deuxième ligne, il y a deux champs qui permettent de visualiser les horaires des avions à partir d'un certain nombre d'heures avant la période de perturbation jusqu'à un certain nombre d'heures après cette période.



Figure 4.2 : Exemple de "bandeau de tête"

Le "bandeau de tête" permet de modifier le laps de temps qui est visualisée. La manière la plus simple de réduire la période de temps du diagramme de Gantt est d'utiliser les deux champs créés à cet effet. Dans l'exemple ci-dessous l'utilisateur ne souhaite visualiser seulement la période qui commence 3 heures avant la période de perturbation et qui se termine 4 heures après celle-ci.

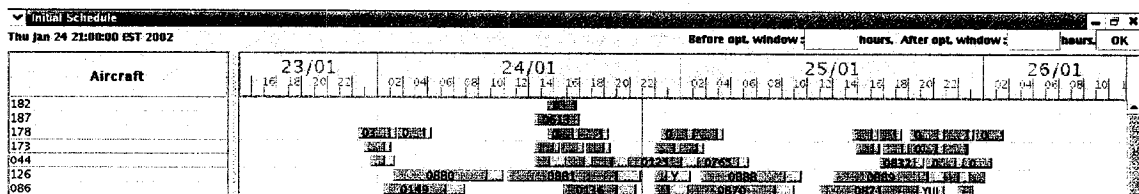


Figure 4.3 : Diagramme de Gantt avant la réduction de la période observée

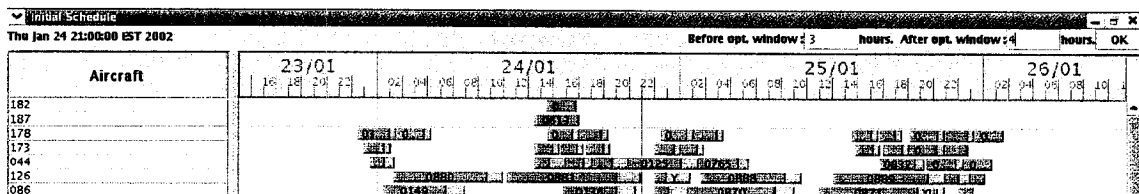


Figure 4.4 : Valeurs entrées par l'utilisateur

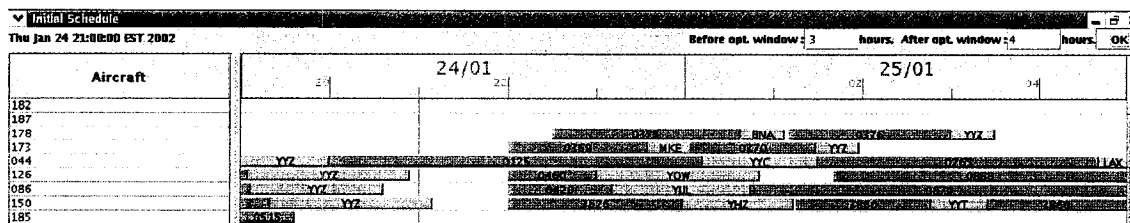


Figure 4.5 : Diagramme de Gantt après la réduction de la période observée

Remarque : Les nombres entrés doivent être des entiers positifs ou nuls.

4.3.2 Description de la liste des options

Le nombre des options possibles varie suivant le type de fenêtre. Cette liste se trouve au bas de chaque fenêtre. Pour utiliser une option, il suffit de cliquer dessus avec la souris. Dans l'exemple ci-dessous, le système permet de visualiser les couleurs (*Code of colors*) ou de "charger" la fenêtre *Manual Changing*.



Figure 4.6 : Exemple d'options possibles

En bas de chaque fenêtre, le bouton *Code of colors* permet d'afficher une fenêtre qui expose la signification de chaque couleur utilisée :

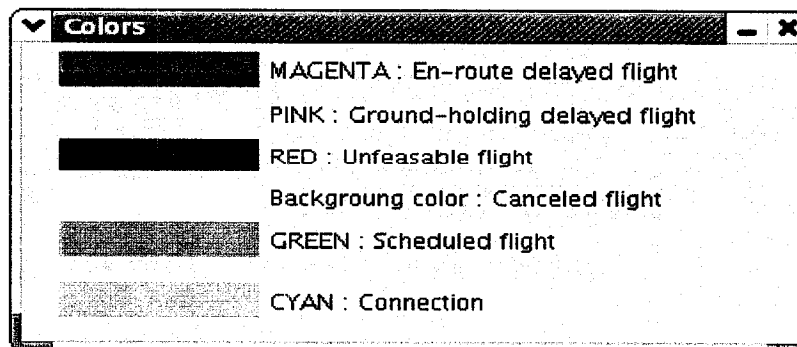


Figure 4.7 : Fenêtre utilisée pour présenter la signification des couleurs

4.3.3 Description du diagramme de Gantt¹

Un diagramme de Gantt permet de représenter les besoins d'un projet en ressources en fonction du temps par l'intermédiaire d'une liste de tâches représentées par des barres horizontales. Ce genre de diagramme est très classique dans les logiciels de gestion de projet.

Ce diagramme se décompose en 2 parties :

- La colonne de gauche contient les numéros des avions (*Aircraft*);
- La colonne de droite présente les horaires des avions dont les numéros sont en vis-à-vis.

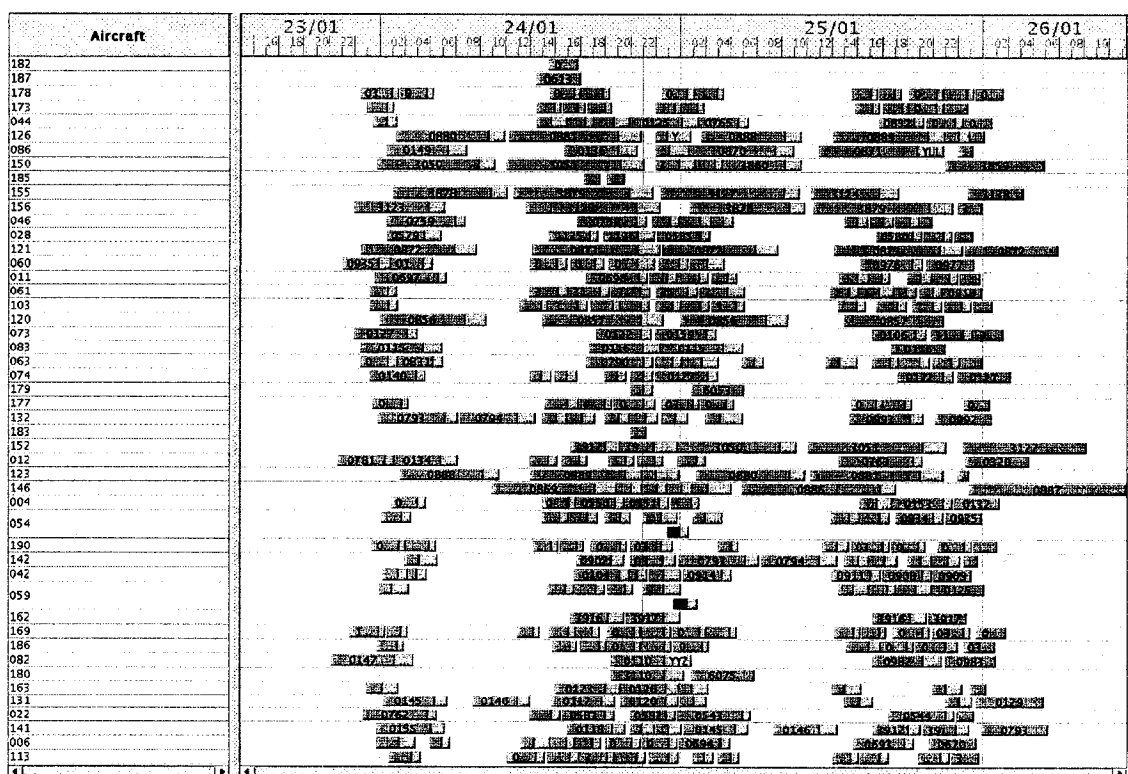


Figure 4.8 : Exemple de diagramme de Gantt

¹ Henry Laurence Gantt (Calvert County, USA, 1861 – Pine Island, USA, 1919) : Ingénieur américain, il prolongea l'action de Taylor en développant l'aspect social de l'organisation sociale du travail.

Dans le diagramme de Gantt, une ligne verticale matérialise l'heure actuelle et une bande verticale symbolise la période de perturbation d'après les données d'entrée par défaut.

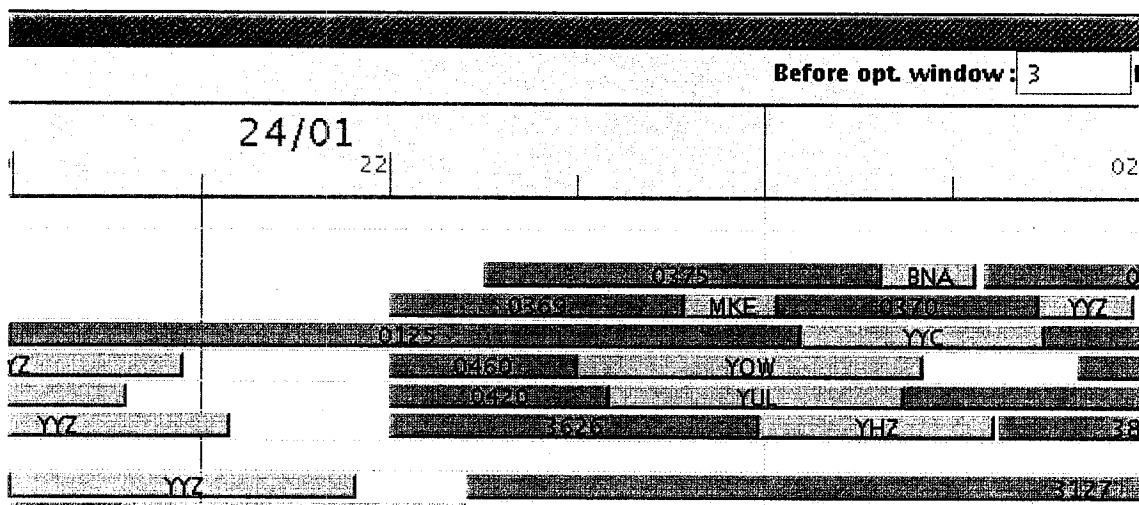


Figure 4.9 : Exemple de ligne verticale symbolisant l'heure actuelle et de bande verticale représentant la période de perturbation

L'utilisateur a aussi la possibilité de modifier le numéro de l'avion par un court texte en faisant simplement un "double-clic" à l'aide de la souris puis en écrivant le texte désiré à l'aide du clavier le texte désiré :

028	028	028
121	121	121
060	060	Modification possible
011	011	011
061	061	061

Figure 4.10 : Exemple de modification du numéro d'un avion

Remarque : Le texte écrit n'est présent que dans la fenêtre où il a été écrit. En d'autres termes, le logiciel ne tient pas compte de cette modification pour les autres fenêtres.

4.3.4 Données présentées pour chaque vol communes à toutes les fenêtres

Lorsqu'un utilisateur clique sur un vol, un certain nombre de données apparaît. Les données présentées pour chaque vol sont :

- Le numéro de vol (*flightId*);
- Le type de vol (*domestic*, *transborder* ou *international*);
- Le coût d'un billet (*ticket cost*);
- L'horaire initialement prévu du vol (*initial flight schedule*).

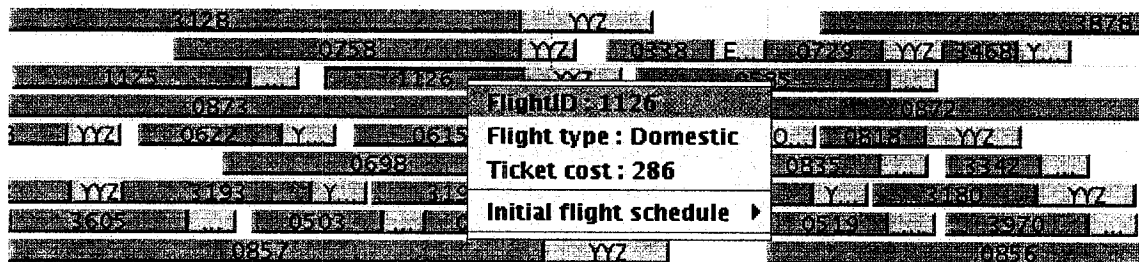


Figure 4.11 : Exemple de données de base pour un vol

Pour chaque vol, l'horaire initialement prévu contient les heures ainsi que les aéroports de départ et d'arrivée.

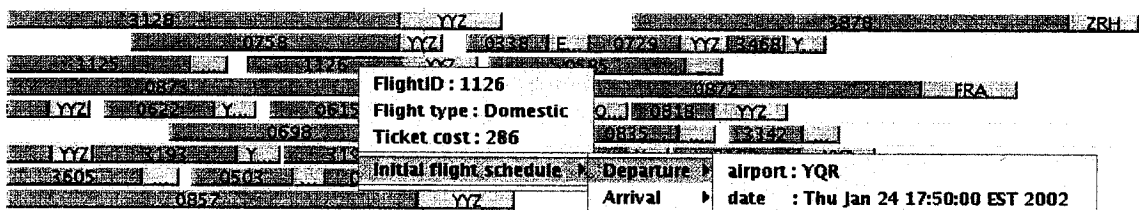


Figure 4.12 : Exemple de données pour le départ d'un vol

Les données pour l'arrivée d'un vol ont le même format que pour un départ.

- Le numéro de l'équipage (*CrewId*);

- Pour chaque type d'avion, le nombre maximum de passagers (*Passenger*

La liste des vols planifiés pour l'équipage (*Active flights*);

Figure 4.13 : Exemple de données pour un équipage actif sur un vol

Figure 4.14 : Exemple de liste de vols qui vont être effectués par un équipage

La liste des vols en *deadhead* pour un équipage a la même structure que la liste des vols actifs. L'affichage pour un équipage en *deadhead* est identique à celui d'un équipage actif.

L'utilisateur peut visualiser le nombre de passagers qui vont effectuer une connexion après un vol en cliquant sur la rubrique *initial pax connection to*.

FlightID	Flight type	Ticket cost	Initial flight schedule	Initial pax connections to
0345	Transborder	221		0145_YYZ_20020125, 1.0 passengers.
				0149_YYZ_20020125, 2.0 passengers.
				0856_YYZ_20020125, 1.0 passengers.

**Figure 4.15 : Exemple de connexions initialement prévues
à la suite d'un vol**

Par exemple, la ligne "0145_YYZ_20020125, 1.0 passengers" se lit comme suit :

A partir du vol 0345, 1 passager va continuer sur le vol 0146 qui décolle de l'aéroport de Toronto (code YYZ) le 25 janvier 2002.

4.4 Utilisation de l'interface graphique sur un exemple

Dans cet exemple, un horaire de départ va être chargé à partir des fichiers présents dans le dossier *data*. Puis on va simuler le retard de deux vols ainsi que l'annulation d'un vol pour l'aéroport de Toronto dont le code est *YYZ*.

Tableau 4.1 : Modifications manuelles qui seront faites lors de la simulation

Numéro de l'avion prévu pour effectuer le vol	Numéro de vol	Type de modifications et durée du retard éventuel
120	0857	Retard au décollage de 40 minutes
83	0116	Retard en vol de 45 minutes
179	0159	Vol annulé

Les paramètres qui seront retenus seront les suivants :

- Intégrer les équipages au modèle (*integrate crews*);
- Intégrer les passagers au modèle (*integrate passengers*);
- Un vol ne peut pas avoir un retard de plus de 20 minutes lorsqu'il est dans les airs par rapport à l'horaire planifié (*maximum landing delay : 20 minutes*);
- Ne pas modifier l'horaire d'un vol quand la capacité de l'aéroport n'est pas réduite (*freeze flights when capacity is not reduced :yes*);
- L'optimiseur peut modifier l'arrivée d'un vol (*freeze arrival flights : no*);
- L'optimiseur peut modifier le départ d'un vol (*freeze departure flights : no*);

Les périodes de réduction de capacité de l'aéroport de Toronto pour la simulation sont regroupés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Périodes de réduction envisagées lors de la simulation

Jour du début de la perturbation	Heure du début de la perturbation	Jour de la fin de la perturbation	Heure de la fin de la perturbation	Nombre maximum d'avions qui peuvent décoller ou atterrir pendant cette période
2002-01-24	22:00	2002-01-24	22:04	1
2002-01-24	22:05	2002-01-24	22:09	2
2002-01-24	22:10	2002-01-24	22:14	1
2002-01-24	22:15	2002-01-24	22:19	2
2002-01-24	22:20	2002-01-24	22:24	1
2002-01-24	22:25	2002-01-24	22:29	2
2002-01-24	22:30	2002-01-24	22:34	1
2002-01-24	22:35	2002-01-24	22:39	2
2002-01-24	22:40	2002-01-24	22:44	1

4.4.1 Fenêtre initiale

Quand le logiciel s'exécute, la première chose qui apparaît est une fenêtre qui permet d'indiquer le répertoire où se trouvent les données d'entrées.

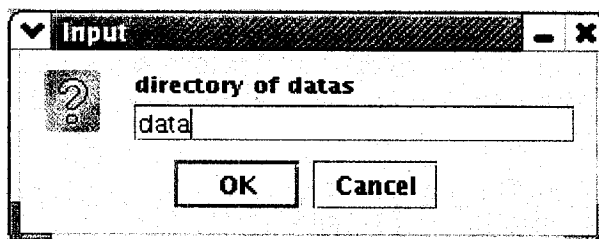
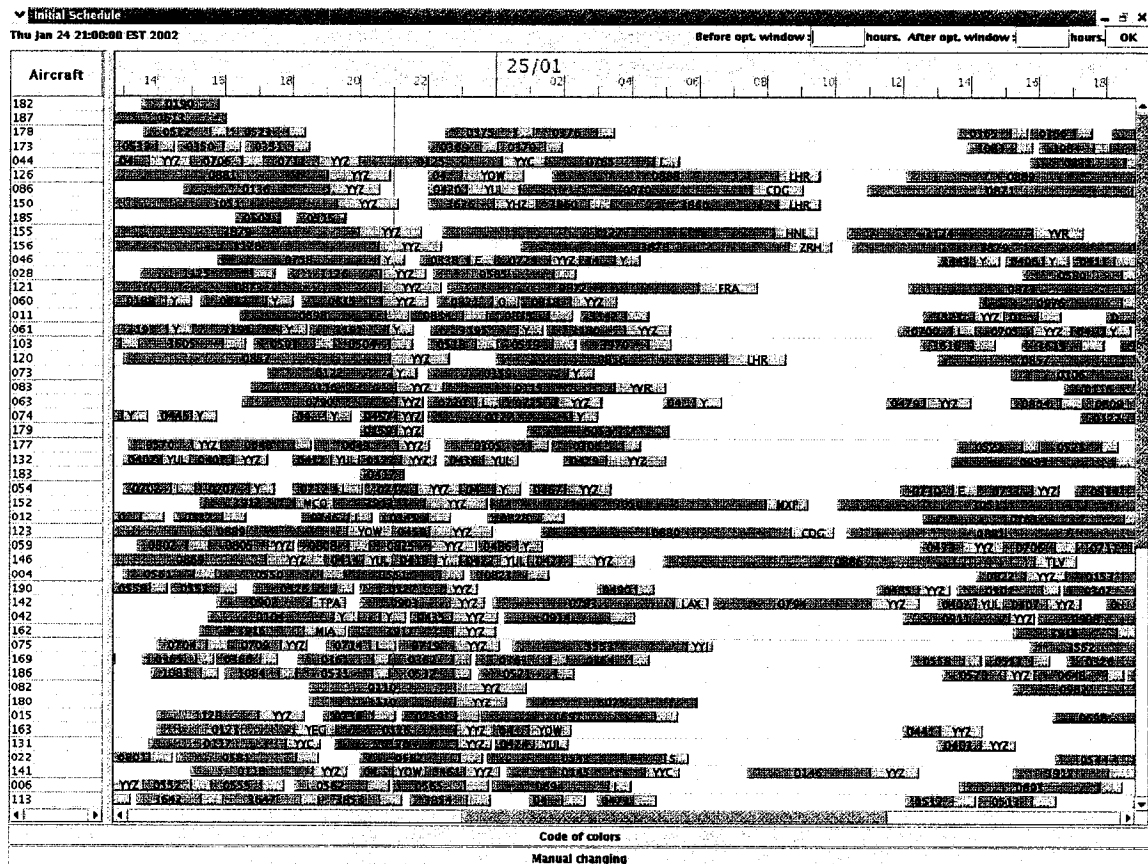


Figure 4.16 : Fenêtre qui permet d'indiquer le répertoire où se trouve les données

Après avoir entré le nom du répertoire où se trouvent les données, l'horaire initialement prévu est affiché dans une fenêtre dénommée *Initial Schedule*.



4.17 : Fenêtre initiale Figure

En cliquant sur le bouton *Manual Changing*, l'utilisateur voit apparaître une nouvelle fenêtre qui ressemble très fortement à celle qui a été présentée précédemment.

4.4.2 Utilisation de la fenêtre appropriée pour les changements manuels des vols

La particularité de cette fenêtre est que l'utilisateur peut modifier les horaires des vols suivant les informations qu'il possède. Nous allons faire les modifications sur les deux vols retardés et sur le vol annulé à l'aide de cette fenêtre.

Dans la fenêtre *Manual Changing*, l'utilisateur peut modifier l'horaire par rapport à celui initialement prévu. Les possibilités offertes sont les suivantes :

- Retarder l'heure de départ d'un vol (*Ground holding delay*);
- Retarder l'heure d'arrivée d'un vol alors qu'il est dans les airs (*En route delay*);
- Annuler un vol (*Cancelled*).

Les modifications successives des trois vols sont représentées par les Figures 4.18, 4.19 et 4.20 :

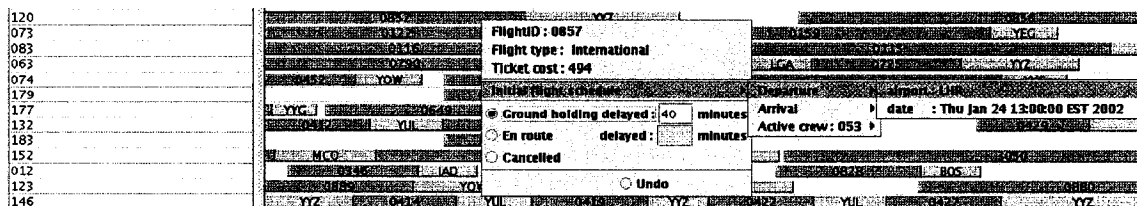


Figure 4.18 : Modification du vol 0857

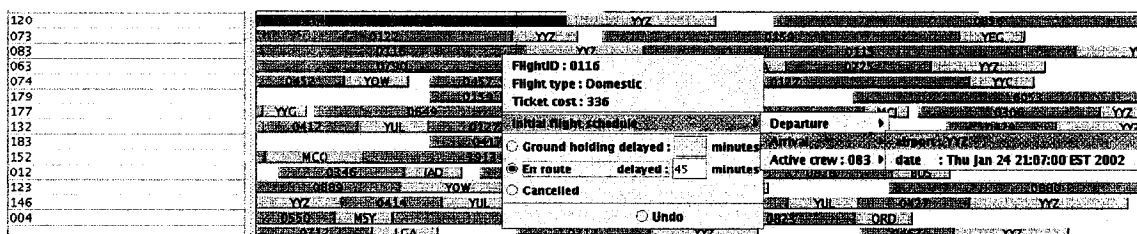


Figure 4.19 : Modification du vol 0116

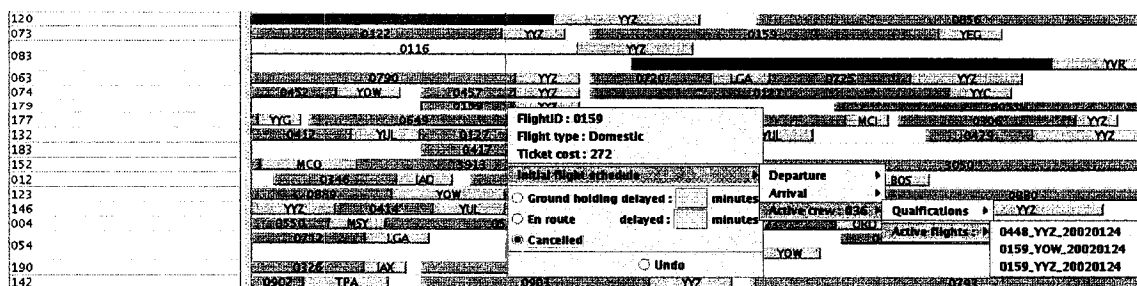


Figure 4.20 : Annulation du vol 0159

Après les modifications faites manuellement, la fenêtre *Manual Changing* est représentée à la Figure 4.21 :

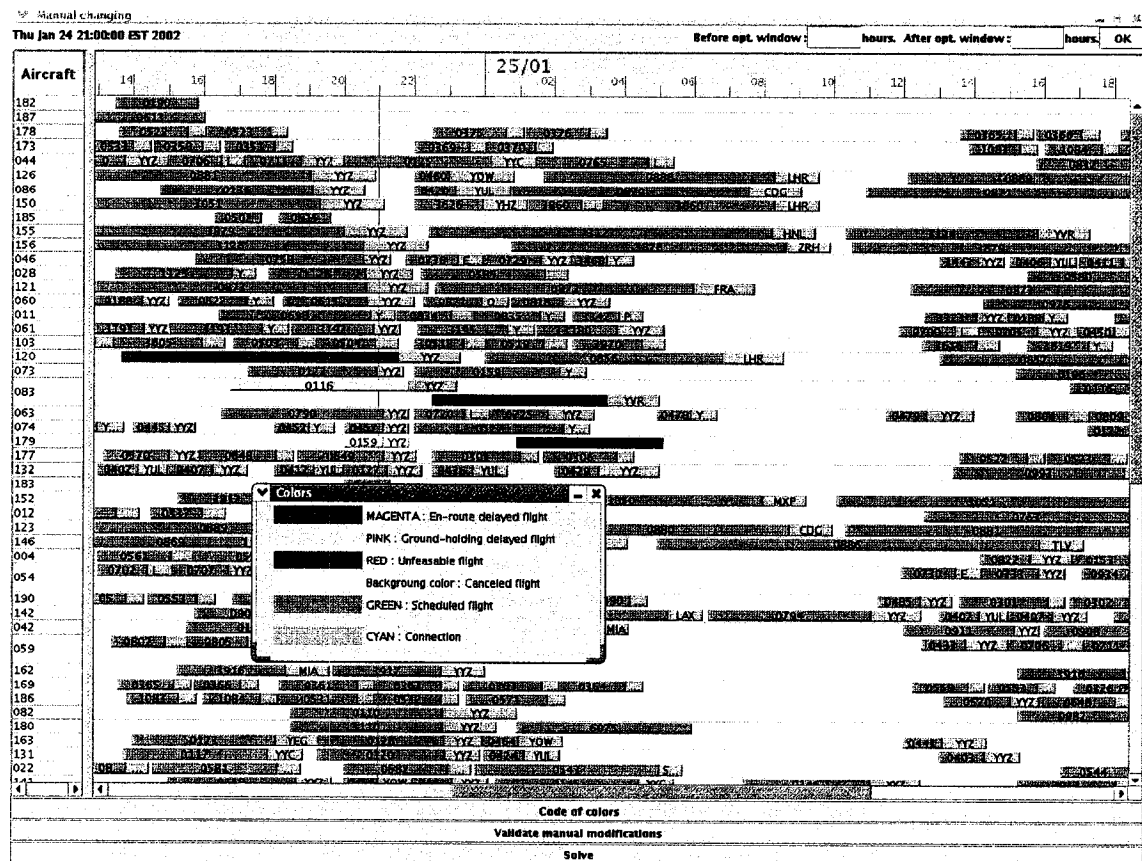


Figure 4.21 : Affichage lorsque les trois modifications ont été effectuées

Pour que les modifications soient affichées à l'écran et que le logiciel en tienne compte, il faut cliquer sur le bouton *Validate manual modifications* avant de lancer l'optimisation.

Pour faire démarrer l'optimiseur intégré au logiciel, il suffit de cliquer sur le bouton *Solve* de la fenêtre *Manual Changing*.

4.4.3 Paramètres et capacités de réduction

Avant le lancement proprement dit de l'optimiseur, l'utilisateur doit rentrer un certain nombre de paramètres et les périodes de capacité de réduction.

Pour rentrer et valider les paramètres, il suffit d'utiliser la fenêtre *Parameters* qui est représentée par la Figure 4.22 :

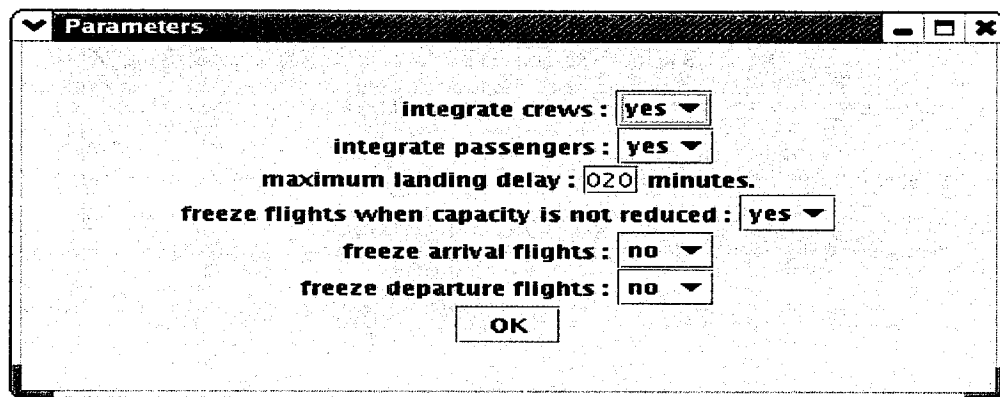


Figure 4.22 : Fenêtre pour les paramètres valides pour l'exemple

La fenêtre *Parameters* permet d'assigner la présence ou l'absence de certaines contraintes lors de l'optimisation. Ces contraintes modifiables par l'utilisateur sont :

- Intégrer ou non les équipages (*integrate crews*);
- Intégrer ou non les passagers (*integrate passengers*);
- Modifier le temps supplémentaire maximal pendant lequel un avion peut rester dans les airs avant d'atterrir (*maximum landing delay*);
- "Geler" les vols lorsqu'il n'y a pas de réduction de capacité (*freeze flights when capacity is not reduced*);
- Aucune arrivée ne peut être annulée ou retardée (*freeze arrival flights*);
- Aucun départ ne peut être annulé ou retardé (*freeze departure flights*).

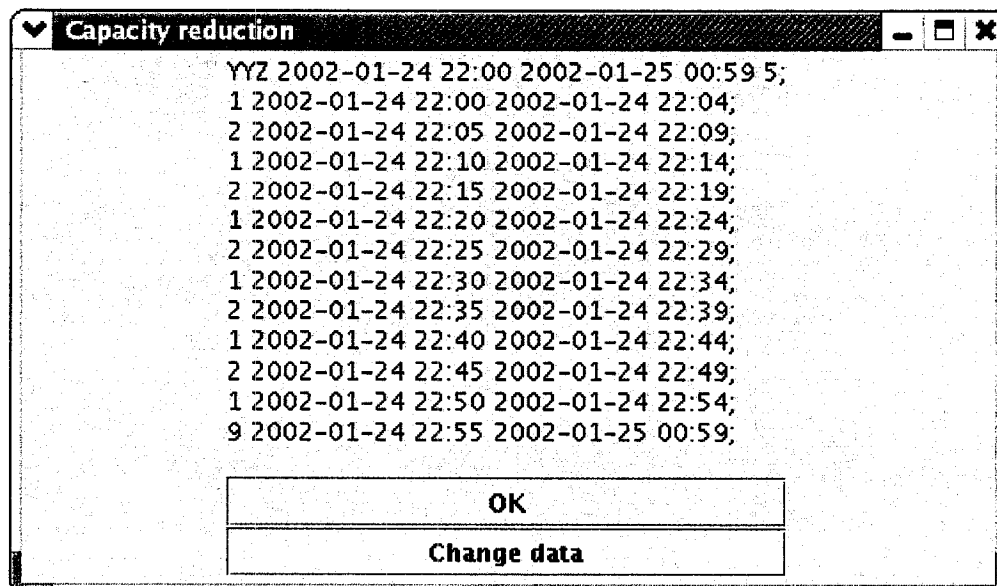


Figure 4.23 : Fenêtre représentant les réductions de capacité par défaut de l'aéroport de Toronto

La Figure 4.23 représente les données par défaut à propos des périodes de réduction.

La première ligne donne les informations suivantes :

Aéroport DateDépart HeureDépart DateArrivée HeureArrivée Pas; où

Aéroport : Nom de l'aéroport où s'applique la capacité de réduction.

DateDépart/HeureDépart: Date et heure de début de la période de perturbation. Cela représente le début de la période de perturbation considérée par l'optimiseur.

DateArrivée/HeureArrivée : Date et heure de fin de la période de perturbation. Cela représente la fin de la période de perturbation considérée par l'optimiseur.

Pas : Longueur en minutes d'une tranche de temps. Le pas correspond à la longueur de toutes les tranches de temps $t \in T$ du modèle mathématique.

Les lignes subséquentes indiquent la capacité de réduction pour chaque intervalle de temps. Chaque ligne donne les informations suivantes :

ValeurCapacitéRéduction DateDébut HeureDébut DateFin HeureFin; où :

ValeurCapacitéRéduction : Valeur de la réduction de capacité. Si la valeur est un réel compris entre 0.0 (inclus) et 1.0 (exclu), elle est interprétée comme étant un facteur de réduction de la capacité. Si la valeur est entière, elle est interprétée comme une capacité maximale, c'est-à-dire le nombre maximal d'avions qui peuvent décoller ou atterrir dans cette tranche de temps. Cela correspond à la constante S_t qui représente la capacité maximale de la tranche de temps $t \in T$ pour le modèle mathématique.

DateDébut/HeureDébut : Date et heure de début de l'intervalle de temps où la réduction de capacité donnée par ***ValeurCapacitéRéduction*** s'applique. Cela correspond au début de la tranche de temps $t \in T$ pour le modèle mathématique.

DateFin/HeureFin : Date et heure de fin de l'intervalle de temps où la réduction de capacité donnée par ***ValeurCapacitéRéduction*** s'applique. Cela correspond à la fin de la tranche de temps $t \in T$ pour le modèle mathématique.

Si les données par défaut conviennent à l'utilisateur, il lui suffit de cliquer sur le bouton *OK*, sinon il peut modifier les données en cliquant sur le bouton *Change data*.

Dans notre exemple, les données par défaut sont inexactes. En cliquant sur *Change data*, on a la possibilité de modifier les données ligne par ligne en commençant par la première.

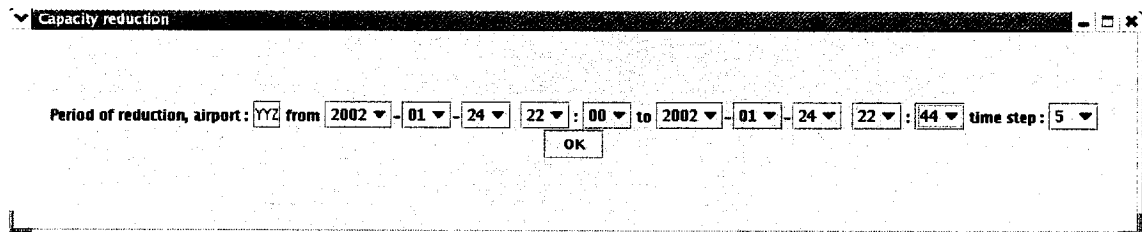


Figure 4.24 : Fenêtre permettant de modifier la première ligne qui concerne la réduction de capacité

Par la suite, le programme va afficher une par une les lignes entrées par défaut pour que l'utilisateur puisse faire les modifications nécessaires.

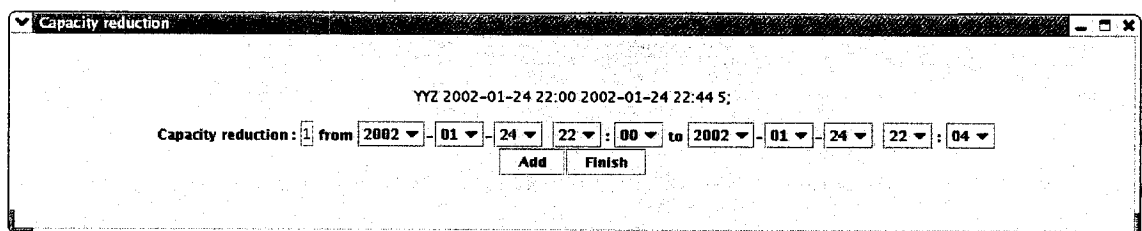


Figure 4.25 : Fenêtre permettant une modification de réduction de capacité pour un intervalle de temps donné

L'utilisateur a juste à cliquer sur le bouton *Add* lorsqu'il veut valider la ligne qu'il vient de modifier.

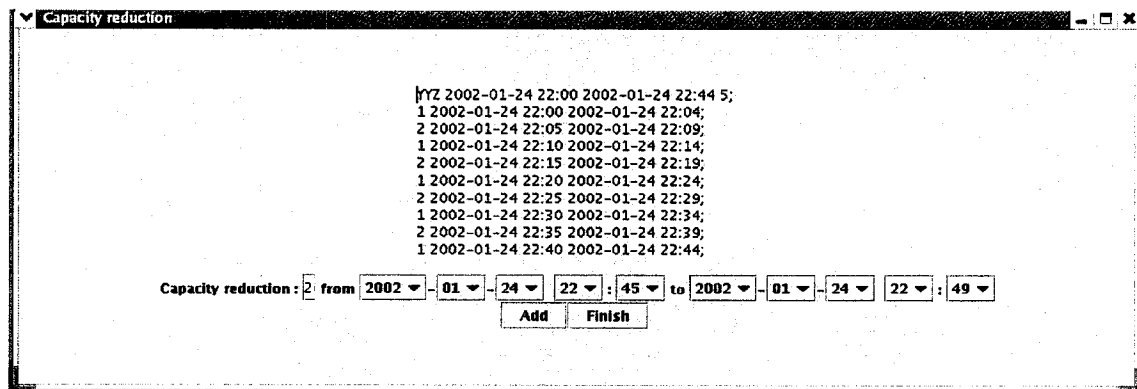


**Figure 4.26 : Fenêtre avant l'enregistrement des données
pour la fenêtre *Capacity Reduction***

Par exemple, si l'utilisateur clique sur *finish* sur la fenêtre présentée par l'image 4.26, les données utilisées par l'optimiseur seraient :

```

YYZ 2002-01-24 22 :00 2002-01-24 22 :44 5;
1 2002-01-24 22 :00 2002-01-24 22 :04;
1 2002-01-24 22 :05 2002-01-24 22 :09;
1 2002-01-24 22 :10 2002-01-24 22 :14;
1 2002-01-24 22 :15 2002-01-24 22 :19;
1 2002-01-24 22 :20 2002-01-24 22 :24;
1 2002-01-24 22 :25 2002-01-24 22 :29;
1 2002-01-24 22 :30 2002-01-24 22 :34;
1 2002-01-24 22 :35 2002-01-24 22 :39;
1 2002-01-24 22 :40 2002-01-24 22 :44;
  
```

Si le programme a réussi à trouver une solution réalisable, une nouvelle fenêtre apparaît.

Cette fenêtre permet de :

- Visualiser les modifications proposées par l'optimiseur grâce à la fenêtre *Swaps*;
- Visualiser l'horaire "final" avec les modifications proposées par l'optimiseur grâce à la fenêtre *Final Schedule*.

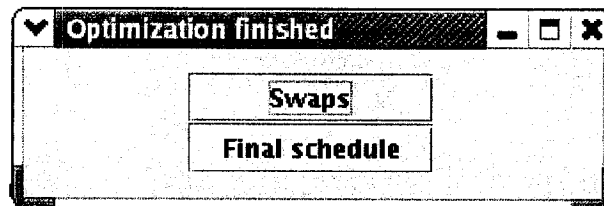


**Figure 4.27 : Fenêtre permettant de visualiser les modifications
et/ou l'horaire final**

Si l'utilisateur clique sur le bouton *Swaps* de la fenêtre représentée par la Figure 4.27, alors une fenêtre dénommée *Modifications* apparaît. Les particularités de cette fenêtre seront décrites dans le chapitre 4.4.4.

Par contre, si l'utilisateur clique sur le bouton *Final schedule* de la fenêtre représentée par la Figure 4.27, alors une fenêtre dénommée *Final Schedule* apparaît. Les particularités de cette fenêtre seront décrites dans le chapitre 4.4.5.

4.4.4 Fenêtre présentant les modifications proposées par l'optimiseur

La fenêtre *Modifications* permet de visualiser les modifications proposées par l'optimiseur pour les itinéraires des avions. La Figure 4.28 montre toutes les modifications proposées par l'optimiseur sur notre exemple. Par exemple, l'avion 182 (premier avion dans la liste) a son itinéraire modifié : au lieu de terminer par le vol 0190, cet avion va continuer son itinéraire en continuant par le vol 0462 et tous les vols suivants qui devaient être effectués par l'avion initialement prévu.

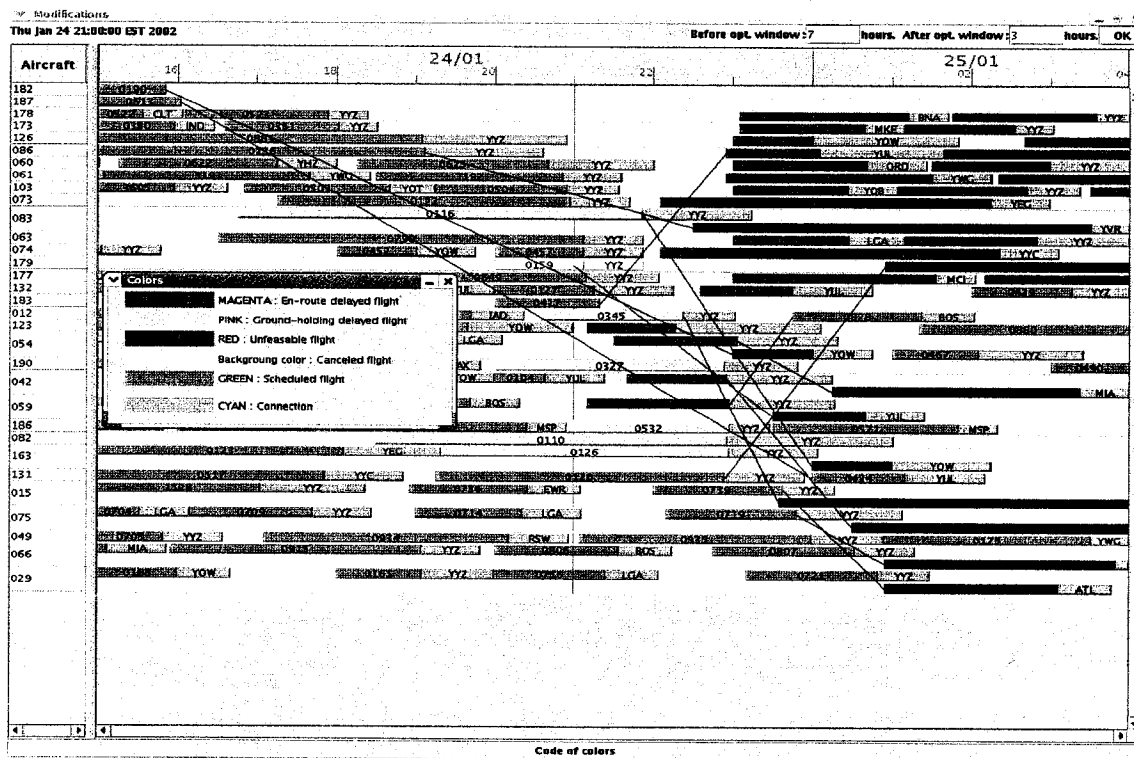


Figure 4.28 : Fenêtre présentant les modifications proposées par le logiciel

4.4.5 Fenêtre présentant l'horaire final

La fenêtre *Final Schedule* permet de visualiser l'horaire final. Cette fenêtre incorpore les modifications proposées par l'optimiseur. Pour notre exemple, l'horaire final est représenté par la Figure 4.29.

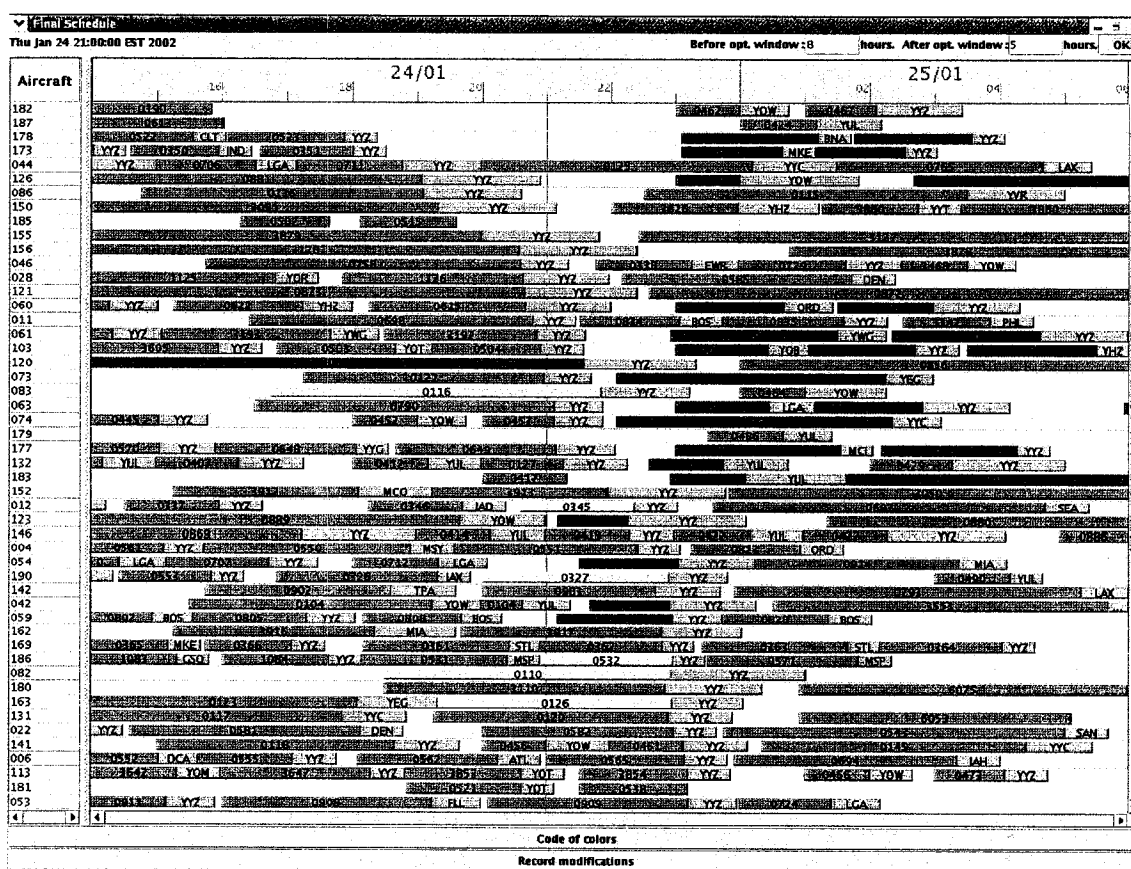


Figure 4.29 : Fenêtre présentant l'horaire final proposé par le logiciel

Le bouton *Record Modifications* permet d'enregistrer ces nouvelles données dans un format compatible pour l'interface graphique et pour l'optimiseur intégré pour pouvoir être ainsi réutilisées plus tard.

4.5 Analyse organique et classes informatiques

Les classes informatiques développées en java pour l'interface graphique peuvent être regroupées en trois catégories :

- Classes qui servent à contenir les différentes données sur les vols, les avions, les équipages, les passagers, les connexions, etc.
- Classes qui servent à proprement parler à créer l'interface graphique.
- Classes celles qui servent à créer les fichiers de données adéquates pour l'optimiseur et qui permettent de "lancer" celui-ci.

Dans la suite du propos, seulement les classes les plus importantes et leurs principales fonctionnalités seront présentées.

4.5.1 Classes contenant les données

Les principales classes qui permettent de contenir les différentes données sont les suivantes :

- La classe *Airport* permet de connaître tous les temps de connexion suivant le type d'avion ainsi que les types de vols arrivant et partant pour un aéroport donné.
- La classe *Crew* permet de connaître les différentes données au sujet des équipages. Cette classe contient entre autres le nom de l'équipage concerné, la liste des types d'avions pour lesquels celui-ci est qualifié, la durée maximale de travail et une liste des avions auxquels l'équipage est affecté.

La classe ***Flight*** permet de connaître toutes les données liées à un vol. Comme données on peut citer le numéro de vol, le type du vol (*domestic*, *international* ou *transborder*), les heures et les aéroports de départ et d'arrivée planifiés, le prix du ticket, l'équipage actif (élément de type ***Crew***) sur ce vol et le nombre de passagers. Cette classe permet aussi d'accéder aux données concernant la durée du retard éventuel et du type de ce dernier (au décollage ou "en route").

- La classe ***Aircraft*** permet de connaître les différentes données sur un avion, telles que le numéro de l'avion, le type de celui-ci et une liste des vols (éléments de type de ***Flight***) qui sont effectués par celui-ci.

On peut voir que les trois dernières classes sont imbriquées les unes dans les autres. Cette décomposition permet une meilleure lisibilité aussi bien en ce qui concerne la conception que lors d'ajout/suppression des éléments d'une classe, mais aussi lors de la correction du code-source. Un élément de type ***Aircraft*** correspond à une ligne du *Gantt chart*. Chaque vol est représenté par deux blocs dans ce dernier : un bloc pour le vol proprement dit et un autre pour la connexion.

4.5.2 Classes pour l'interface graphique

Ces classes ont été en partie inspirées de certaines de certaines classes développées par l'entreprise Ad Opt Technologies spécifiquement pour leurs produits. Parmi ces différentes classes, on peut citer les classes suivantes :

- La classe ***AircraftGantt*** contient les différents éléments des fenêtres de l'interface graphique. Elle renferme notamment les éléments qui composent le "bandeau de tête", le *gant chart* et la liste des options.

- La classe **GanttObject** étant une classe générique qui gère la représentation de chaque vol ou de chaque connexion et qui permet également d'afficher le *pop-up menu*. Ce *pop-up menu* affiche les données spécifiques de l'élément concerné. Cette classe est dérivée pour répondre aux différentes exigences vis-à-vis de la représentation graphique.

La classe **ConnectionGanttObject**, dérivée de la classe **GanttObject** permet spécifiquement d'afficher une connexion dans le *gant chart*. Cette classe est utilisée dans toutes les fenêtres qui ont à représenter des connexions.

La classe **FlightGanttObject**, dérivée de la classe **GanttObject**, sert à afficher les caractéristiques d'un vol qui ne peuvent pas être modifiées par l'utilisateur. Cette classe est utilisée pour les fenêtres *Initial Schedule*, *Modifications* et *Final Schedule*.

La classe **FlightGanttObjectChangeable**, dérivée de la classe **FlightGanttObject** permet à l'utilisateur de retarder un vol d'annuler celui-ci. Cette classe est utilisée pour la fenêtre *Manual Changing*.

L'utilisation de l'héritage a été utilisé pour permettre un meilleur entretien du code-source et pour aussi réduire la taille de la mémoire pour faire fonctionner le logiciel. Car les relations d'héritage permettent que les nouvelles classes d'objets absorbent certaines caractéristiques de classes existantes tout en possédant des caractéristiques propres.

- La classe **Gantt** est la classe qui gère à proprement parlé le *gant chart*. Elle permet notamment de modifier la période visualisée et contient une liste des avions. Cette classe gère aussi tout ce qui concerne le graphisme vis-à-vis du *gant chart* et régit également tous les éléments de type **GanttObject**.

4.5.3 Classes permettant de lancer l'optimiseur

Plusieurs classes ont été créées pour pouvoir construire les fichiers appropriés pour pouvoir être utilisées par l'optimiseur, pour afficher la fenêtre *Parameters* (Figure 4.22) ou la fenêtre *Capacity Reduction* (Figure 4.23). Pour ne pas alourdir inutilement le propos, la seule classe qui sera présentée est celle qui permet de lancer l'optimiseur :

- La classe **Launcher** permet de lancer l'optimiseur intégré à l'interface graphique. Cette classe détecte d'abord sur quel système d'exploitation s'exécute le programme. Ceci est nécessaire car le lancement de l'optimiseur se fera différemment suivant qu'on est sur un ordinateur compatible *MS-DOS* ou *Linux*. Par la suite, cette classe crée un *script* qui permet de lancer l'optimiseur et se charge en même temps de vérifier si la mémoire tampon spécifique au programme java n'est pas saturée pour ne pas aboutir à une erreur du programme lors de l'exécution de l'optimiseur. Finalement, la classe **Launcher** se charge de supprimer le *script* créé, de vider la mémoire tampon spécifique au logiciel java, et de faire appel au collecteur d'ordure (*garbage collector*) du système d'exploitation pour libérer la mémoire de l'ordinateur qui a été utilisée lors de l'utilisation de l'optimiseur.

4.6 Apports de l'interface graphique

À l'heure actuelle, peu ou pas d'interfaces graphiques sont utilisées par les gestionnaires qui doivent trouver des réaffectations valides pour les avions, les équipages et les passagers lorsque surviennent des perturbations dans une compagnie aérienne. De plus, il faut savoir qu'ils ont généralement très peu de temps alloué et qu'ils doivent tenir compte d'une multitude de paramètres. C'est pour cela qu'une interface graphique et un net apport en se qui concerne la qualité du travail de ces gestionnaires.

L'interface qui fut présentée dans ce mémoire permet une amélioration du travail des gestionnaires en terme de qualité et de rapidité. Celle-ci permet à la fois de visualiser les horaires initialement planifiés de pouvoir visualiser les problèmes éventuels. Cette interface a aussi la particularité d'être très facilement utilisable. Le travail du gestionnaire est aussi facilité par le fait qu'il peut voir les solutions proposées par l'optimiseur.

CHAPITRE 5 : RÉSULTATS

NUMÉRIQUES

Nous avons présenté dans le chapitre 3 de ce mémoire un modèle mathématique qui permet de faire face à des perturbations pendant le jour d'opération. Nous devons maintenant effectuer des tests afin de vérifier si l'implantation informatique de ce modèle est applicable aux problèmes opérationnels pratiques.

Au chapitre 5.1, les données d'entrée seront présentées et les hypothèses de travail générales posées. Dans la section 5.2, on fera une série de tests en ne modifiant que la capacité de l'aéroport considéré. A la section 5.3, on étudiera l'influence de la longueur des intervalles de temps (ce qui correspond aux tranches de temps $t \in T$ du modèle mathématique) sur lesquels les contraintes de capacité maximum s'appliquent (équations (3) du modèle mathématique). La période considérée (composée de la période de réduction de capacité et celle de stabilisation) est divisée en intervalles de 5, 10 ou 15 minutes. Les variations des intervalles de temps servent à observer leurs influences sur la qualité des solutions et sur le temps de calcul. La partie 5.4 sera consacrée à une comparaison entre deux approches différentes, celles-ci sont la résolution séquentielle qui correspond à l'approche traditionnelle et la résolution globale utilisée dans notre approche. Dans la partie 5.5, on étudiera la qualité de la solution lorsqu'on ne tient compte de seulement une partie des ressources (avions, passagers et équipages) lors de la réoptimisation suite à des perturbations durant le jour d'opération. La comparaison sera faite avec l'approche intégrée où on tient compte de toutes les ressources en même temps. La section 5.6 fera l'objet d'une brève conclusion sur les résultats numériques trouvés.

5.1 Scénario de base

Le scénario envisagé pour valider notre modèle mathématique et son implantation informatique est le suivant :

- Une tempête de neige dans la période de pointe le 24 janvier 2002 en après-midi a retardé 6 vols venants du nord-est des États-unis d'Amérique et atterrissants à l'aéroport international de Toronto (code *YYZ*). Ces vols perturbés proviennent des aéroports de Boston (code *BOS*) et de New York (codes *LGA* et *EWB*). Le tableau 5.1 ci-dessous regroupe les données sur les vols concernés. La première colonne présente les numéros des vols perturbés, la deuxième l'aéroport d'où proviennent ces vols tandis que la troisième colonne montre le retard de ceux-ci en minutes. La quatrième colonne indique les heures réelles d'arrivée des vols perturbés. La cinquième colonne donne les numéros des vols critiques étant les vols qui ne pourront pas être effectués comme planifiés à cause des perturbations; alors que la sixième colonne indique les heures planifiées de départ de ceux-ci. La septième colonne indique le temps de connexion réel entre le vol retardé et le vol critique correspondant, alors que la dernière colonne présente le temps minimum nécessaire entre le vol perturbé et le vol critique. On peut voir grâce à la Figure 5.1 que les planifications de certains avions deviennent caduques.
- Le moment où les gestionnaires apprennent ces perturbations est le 24 janvier à 16 :00.
- La période de perturbation de l'aéroport *YYZ* commence le 24 janvier à 17 :00 et se termine à 19 :59. Cette période se compose d'une période de réduction de capacité d'une heure et demie (de 17 :00 à 18 :29) suivie d'une période de stabilisation de même durée (de 18 :30 à 19 :59).

Tableau 5.1 : Vols perturbés et critiques

Vol perturbé				Vol critique		Temps de connexion	
Numéro du vol	Aéroport de départ	Retard (min)	Heure d'arrivée réelle	Numéro du vol	Heure de départ planifiée	Réel (min)	Minimum (min)
717	LGA	50	17:34	462	18:00	26	76
825	BOS	40	17:48	486	18:30	42	80
739	EWR	45	18:38	697	18:35	-3	40
719	LGA	60	18:49	3553	19:30	41	80
807	BOS	30	19:33	922	19:55	22	45
721	LGA	60	19:50	568	19:55	5	40

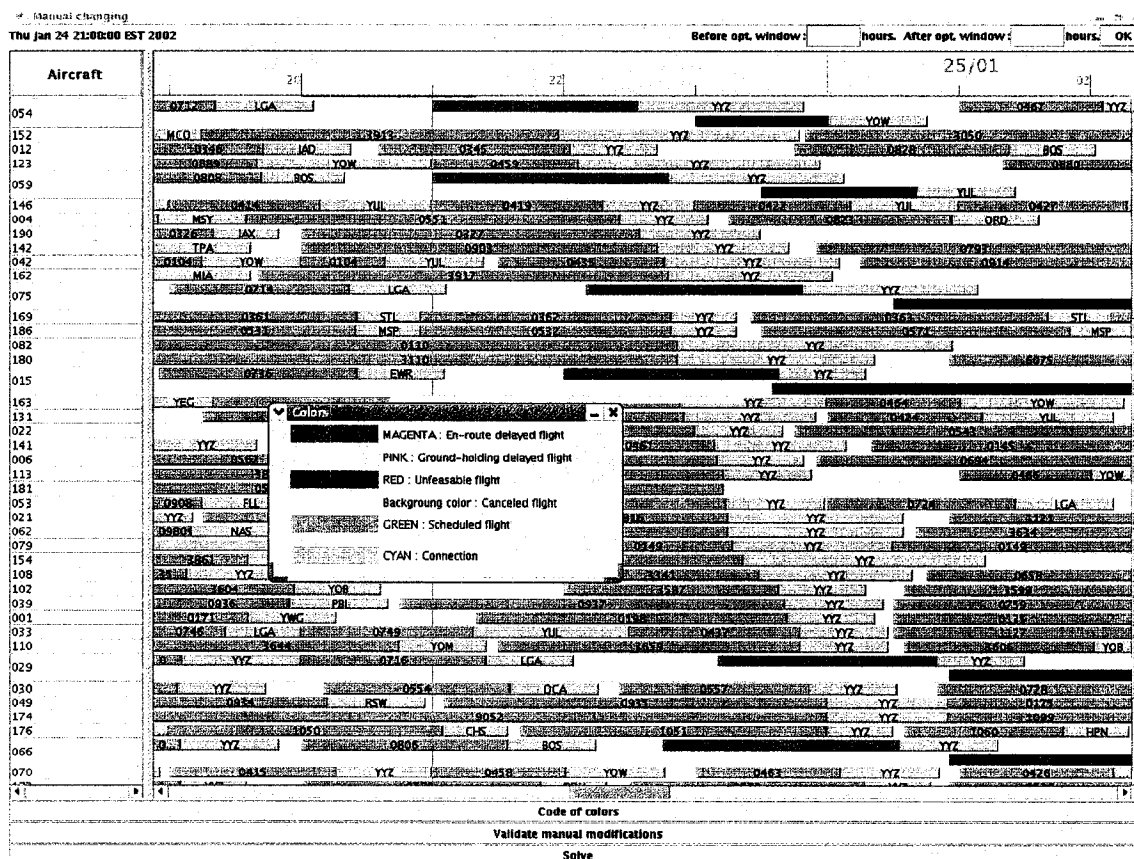


Figure 5.1 : Vols perturbés et critiques

Remarque : l'heure indiquée sur la Figure 5.1 est l'heure GMT (*Greenwich Mean Time*) alors que les horaires des vols donnés dans le tableau 5.1 sont suivant l'heure locale à l'aéroport YYZ, qui est égale à GMT - 5 heures.

La période de réduction est la période de temps où survient une réduction de capacité exprimée en nombre maximal de vols (arrivées et départs) qui peuvent être servis à l'aéroport considéré, la durée de cette période peut être nulle. Les arrivées et départs planifiés dans cette période peuvent être modifiés (retards ou annulations). Aucune modification ne peut être apportée aux vols dont l'arrivée est située dans la période de réduction de capacité si le départ du vol suivant planifié pour l'avion ou l'équipage en question est situé après la période de perturbation. Les vols planifiés hors de la période de réduction de capacité ne peuvent pas être modifiés par l'optimiseur.

La période de stabilisation est la période qui suit immédiatement la période de réduction de capacité de l'aéroport considéré et après laquelle le système revient à l'état planifié. La capacité de l'aéroport est de 100 % pendant la période de stabilisation. Les arrivées et les départs planifiés dans la période de stabilisation ne peuvent pas être modifiés. On peut y ajouter des vols retardés (arrivées et départs) provenant de la période de réduction de capacité en respectant la capacité maximale de 100 %.

Pour cette batterie de tests, le nombre d'avions concernés est de 79. Les vols arrivants à l'aéroport concerné ou partants de celui-ci pendant la période de perturbation sont 103. Les équipages concernés par ces perturbations sont au nombre de 101. Il y a 6 822 passagers arrivants et 5 152 passagers partants planifiés; 358 passagers doivent effectuer des connections importantes à l'aéroport donné pendant la période considérée.

Le retard maximal d'un vol est déterminé de la façon suivante :

- Si l'arrivée planifiée d'un vol est située dans la période de réduction de capacité, son arrivée révisée doit avoir lieu avant la fin de la période de stabilisation.

- Si le départ planifié d'un vol est situé dans la période de réduction de capacité, son départ révisé doit avoir lieu avant la fin de la période de stabilisation.

Lors de nos tests, plusieurs éventualités vont être envisagées :

- Permettre ou non de retarder des avions en vol;
- Permettre ou non de retarder des vols arrivants à l'aéroport considéré;
- Permettre ou non de retarder des vols partants de l'aéroport considéré;
- Permettre ou non de retarder des vols lorsqu'il n'y a pas de réduction de capacité à l'aéroport considéré;
- Intégrer ou non les équipages lors de l'optimisation;
- Intégrer ou non les passagers lors de l'optimisation.

Dans tous nos tests l'unité de retard, qui correspond au Δt du modèle mathématique, est de 5 minutes.

Les tests sont faits avec un ordinateur doté d'un processeur Pentium IV, cadencé à 1,8 GHz et doté d'une mémoire vive de 1 Go avec le système d'exploitation Linux.

Lors d'une comparaison entre deux scénarios, le résultat qui sera considéré le meilleur est celui qui aura la plus grande valeur pour l'objectif. Pour mesurer la qualité d'une solution par rapport à une autre, on tiendra notamment compte des vols retardés ou annulés ainsi que le nombre d'avions et équipages qui subissent un changement dans leurs itinéraires, car on souhaite avoir des solutions qui modifient le moins possible les horaires planifiés et qui reviennent le plus vite possible aux horaires planifiés.

Le temps supplémentaire de travail assigné pour les équipages sera aussi pris en compte. Cette surcharge d'ouvrage provient souvent du fait qu'un vol retardé occasionne du travail supplémentaire à l'équipage effectuant celui-ci.

L'autre raison est que lorsqu'un vol partant de l'aéroport considéré est retardé, celui-ci peut ne plus pouvoir être effectué par l'équipage planifié car ça aurait pour effet de dépasser le nombre d'heures de travail autorisé et c'est pour cela qu'il est nécessaire de trouver un autre équipage pour effectuer ce vol.

Il sera aussi particulièrement fait attention au pourcentage de passagers desservis suivant la solution proposée après l'optimisation.

Les temps de calcul qui seront présentés sont les temps de résolution de l'optimiseur et n'intègrent pas le temps négligeable nécessaire pour l'affichage par l'interface graphique.

5.2 Résolution globale avec différentes réductions de capacité

Les intervalles de temps sur lesquels les contraintes de capacité sont imposées sont de 5 minutes. Les avions déjà en vols peuvent être retardés au plus de 20 minutes, alors que les vols qui doivent atterrir à l'aéroport considéré et dont les avions qui doivent effectuer ces vols n'ont pas encore décollé peuvent être retardés à leurs aéroports de départ afin de rendre l'horaire de ces vols faisables. Les vols qui ont pour point de départ l'aéroport considéré peuvent être aussi retardés. Ces paramètres sont choisis par l'utilisateur du *GUI* (Chapitre 4, Figure 4.22 de ce mémoire). La réduction de capacité sera de 25 %, 44 % ou 63 %. A l'aide de la Figure 5.2, on peut voir la répartition des vols suivant la planification avant que surviennent les perturbations pendant la période de perturbation.

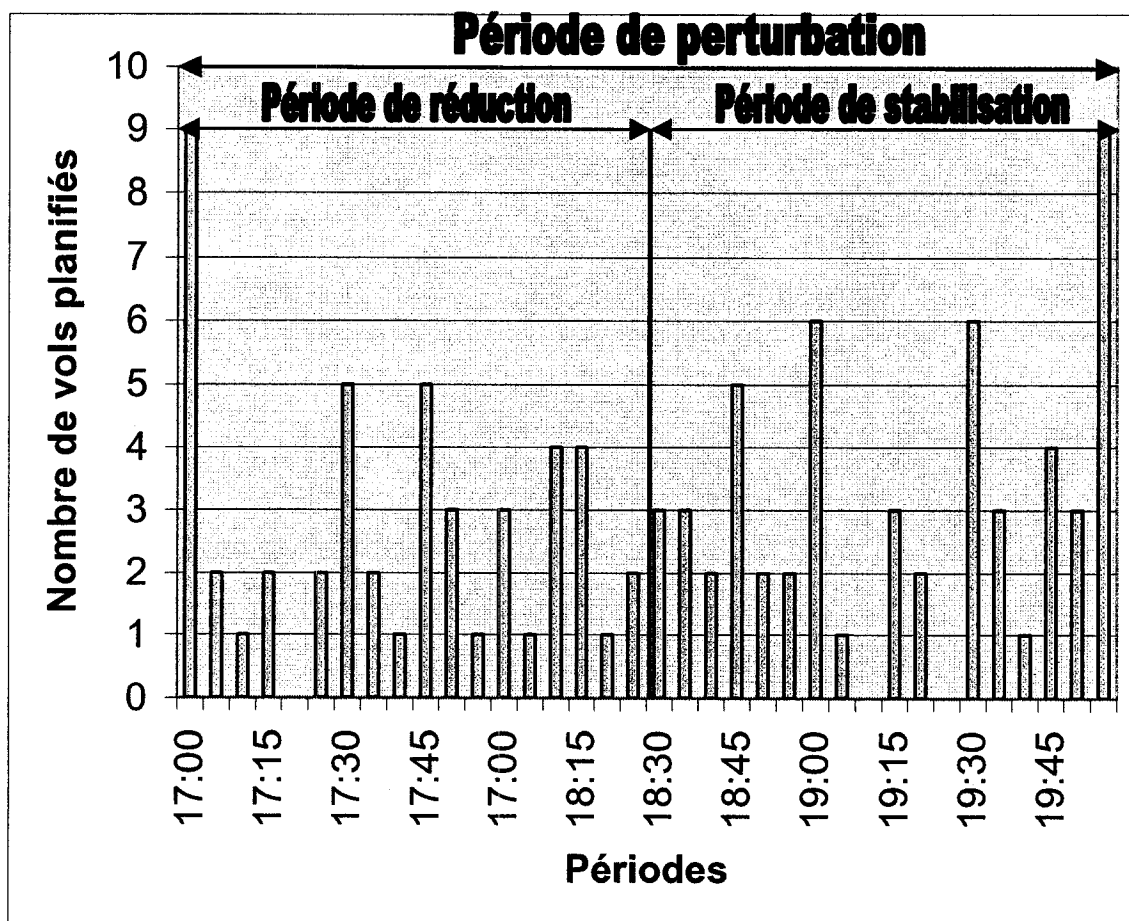


Figure 5.2 : Répartition des vols à l'aéroport de Toronto d'après la planification

La réduction de capacité de 25 % pendant la période de réduction de capacité de 1 heure et demie, se traduit par au maximum 2 vols par tranche de temps de 5 minutes. Ce qui correspond à une réduction moyenne. Pour avoir une réduction de capacité de 44 % pendant 1 heure et demie, il faut alterner les tranches de temps de 5 minutes avec au maximum 1 vol et 2 vols pendant la période de réduction de capacité, ce qui correspond à une réduction importante. Pour avoir une réduction de capacité de 63 % pendant 1 heure et demie, il faut, au maximum 1 vol par tranche de temps de 5 minutes pendant la période de réduction de capacité, ce qui correspond à une réduction très importante.

Les résultats pour cette première batterie de test sont regroupés dans le tableau 5.2 :

Tableau 5.2 : Résultats avec différentes réductions de capacité

	Intervalles de 5 minutes		
	Réduction de capacité (%)		
	25	44	63
Vols			
Vols annulés	0	0	0
Vols retardés	28	34	41
Retard total (min)	780	1 360	1 993
Retard moyen (min)	27.86	40	48.61
Avions			
Itinéraires changés	16	21	25
Équipages			
Itinéraires changés	7	12	15
Temps supplémentaire (min)	375	563	701
Passagers desservis (%)			
Arrivants	99.75	99.63	99.14
Partants	98.69	97.14	94.47
En connexion	97.86	97.31	87.51
Total	99.3	98.56	97.13
Solution			
Valeur de l'objectif	3 333 079	3 308 201	3 260 174
CPU (s)	83	73	44

A l'aide du tableau 5.2, on voit aisément que la qualité de la solution se détériore lorsque la réduction de capacité augmente. Évidemment, plus la réduction de capacité est importante, plus le nombre d'avions et d'équipages qui vont avoir leurs itinéraires modifiés augmente et le temps supplémentaire de travail pour les équipages concernés s'accroît également.

On peut remarquer aussi que le nombre de vols retardés ainsi que le total des retards et le délai moyen des vols retardé croissent avec le pourcentage de la réduction de capacité. Le nombre de passagers desservis diminue lorsque la réduction de capacité augmente. Cette observation se vérifie aussi bien pour les passagers qui arrivent que pour ceux qui partent ou encore ceux qui doivent effectuer une connexion à l'aéroport YYZ.

Ceci vient du fait qu'il y a plus de vols qui doivent être retardés; et donc, entre autres choses, moins de connexions qui peuvent être effectuées. Ce constat est également vérifié en observant la valeur de l'objectif qui décroît lorsque la réduction de capacité augmente.

Le temps de calcul (CPU) nécessaire pour trouver des solutions est tout à fait acceptable, ce qui montre que ce modèle est tout à fait applicable à des problèmes réels.

5.3 Influences des longueurs des intervalles de temps

Dans cette section, les intervalles de temps sur lesquels les contraintes de réduction de capacité sont imposées sont de 5, 10 ou 15 minutes. Les avions déjà en vols pourront être retardés au maximum de 20 minutes, alors que les vols qui doivent atterrir à l'aéroport considéré et dont les avions qui doivent effectuer ces vols n'ont pas encore décollé peuvent être retardés à leurs aéroports de départ. Les vols qui ont pour point de départ l'aéroport considéré peuvent être aussi retardés. Les vols planifiés hors de la période de réduction ne peuvent pas être modifiés par l'optimiseur. La réduction de capacité sera de 63 % pour tous les scénarios.

La comparaison entre les résultats avec les différents intervalles de temps peut être aisément fait grâce au tableau 5.3 ci-dessous.

Tableau 5.3 : Résultats avec différents intervalles de temps

	Réduction de capacité de 63 %		
	Intervalles (min)		
	5	10	15
Vols			
Vols annulés	0	0	0
Vols retardés	41	37	35
Retard total (min)	1 993	2 233	2 248
Retard moyen (min)	48.60	60.35	64.22
Avions			
Itinéraires changés	25	24	24
Équipages			
Itinéraires changés	15	18	17
Temps supplémentaire (min)	701	855	779
Passagers desservis (%)			
Arrivants	99.14	99.02	99.09
Partants	94.47	94.30	94.25
En connexion	87.52	90.16	91.53
Total	97.13	96.99	97.01
Solution			
Valeur de l'objectif	3 260 174	3 262 745	3 264 589
CPU (s)	44	51	35

En regardant, le tableau ci-dessus, on pourrait penser qu'il serait envisageable de préférer utiliser des intervalles de temps de 15 minutes au lieu de 5 minutes car ainsi on élève la qualité de la solution en utilisant moins de temps pour trouver la solution.

Comme les gestionnaires doivent trouver des solutions valides rapidement, cela semble une bonne alternative. Regardons un peu plus en détail comment se fait la répartition temporelle des vols pour l'aéroport considéré suivant les 3 scénarios présentés par le tableau 5.3. Ces différentes répartitions sont représentées par les Figures 5.3, 5.4 et 5.5 ci-dessous.

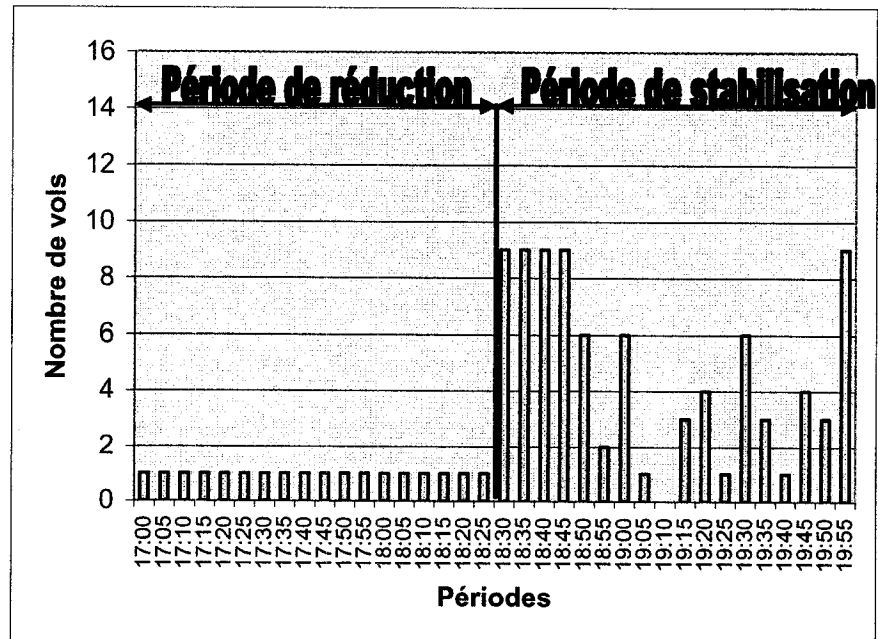


Figure 5.3 : Répartition des vols avec des intervalles de 5 minutes

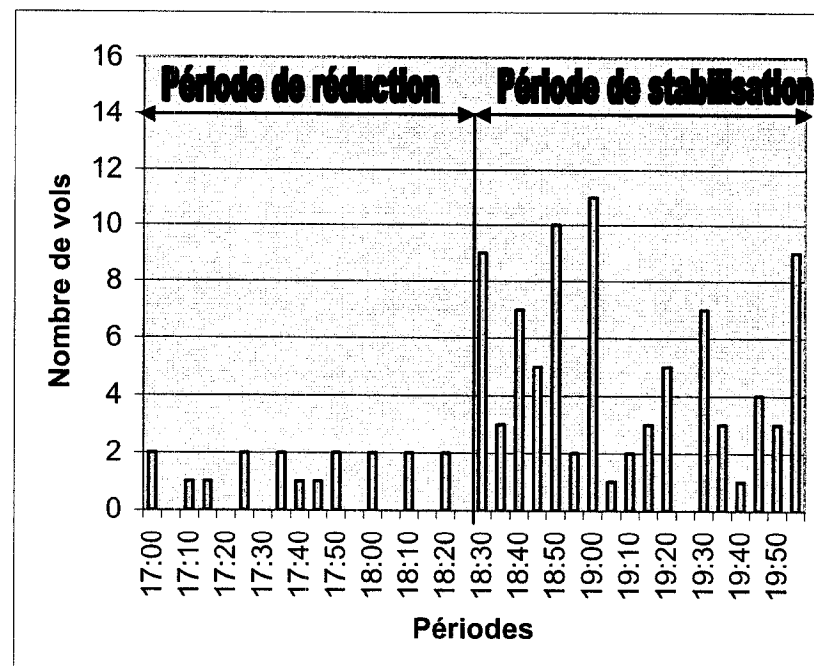


Figure 5.4 : Répartition des vols avec des intervalles de 10 minutes

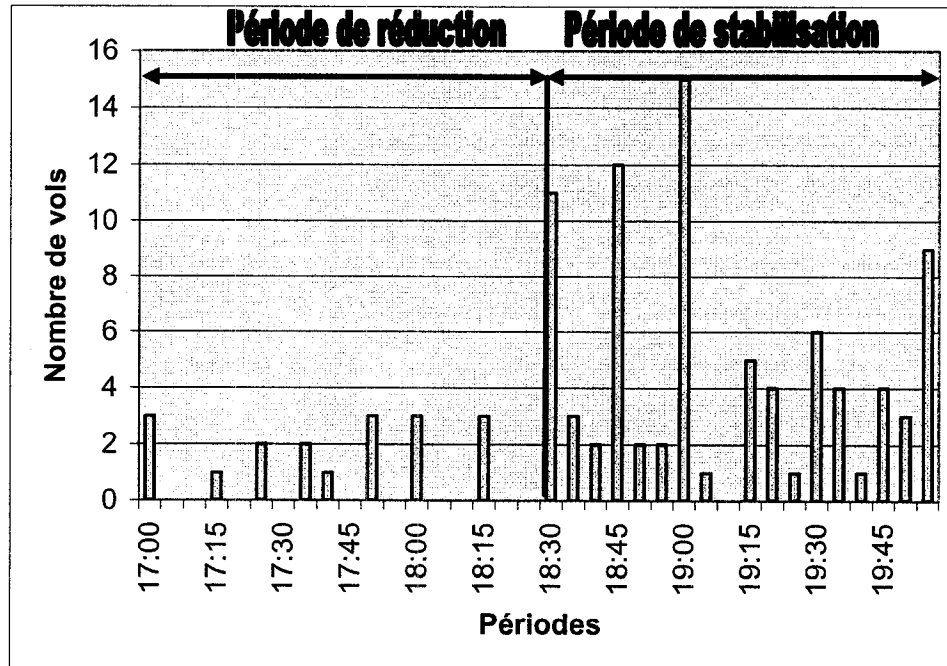


Figure 5.5 : Répartition des vols avec des intervalles de 15 minutes

Si on compare les deux cas extrêmes, c'est-à-dire avec des intervalles de 5 et 15 minutes, on voit que la répartition est beaucoup plus équilibrée lorsqu'on utilise des intervalles de 5 minutes aussi bien pendant la période de réduction que pendant la période de stabilisation. Cette différence s'explique facilement car dans le scénario avec des intervalles de 15 minutes, l'optimiseur a tendance à placer les vols au début des périodes de 15 minutes de telle façon à minimiser les surcoûts engendrés par les vols retardés.

Ce phénomène de "mauvaise" répartition, se voit facilement en observant l'intervalle [19 :00 19 :14] à la Figure 5.5. Nous pouvons remarquer que pendant les premières 5 minutes de l'intervalle, 15 vols sont programmés. Sachant que la capacité maximale de l'aéroport considéré pour une tranche de temps de 5 minutes est de 9 vols (voir Figure 5.3), la solution présentée à la Figure 5.5 n'est pas acceptable dans la réalité. La même tendance est observée dans la période de réduction où certaines tranches de temps de 5 minutes accommodent 3 vols alors que la capacité réduite maximale par tranche de 5 minute est de 1 vol (Figure 5.3).

C'est pour cela qu'on peut conclure qu'il est préférable d'utiliser des intervalles de 5 minutes dans le modèle mathématique. Dans la suite de notre exposé, il sera exclusivement fait usage d'intervalles de 5 minutes.

5.4 Résolution séquentielle vis-à-vis de la résolution globale

La résolution séquentielle se fait de la manière suivante : les perturbations créées par les 6 vols arrivants en retard seront résolues l'un après l'autre suivant l'ordre de départ des vols critiques présentés par le tableau 5.1. Lors de la résolution séquentielle, un avion ou un équipage qui subit des modifications dans son affectation ne pourra pas voir celle-ci modifiée après une résolution ultérieure. Ce type de résolution imite l'approche traditionnellement utilisée par les gestionnaires ayant peu ou pas de support informatique à leurs dispositions. Pour la résolution globale, les perturbations causées par les 6 vols retardés seront résolues simultanément.

Nous considérons le scénario avec aucune réduction de capacité pendant les 3 heures de la période de perturbation. Tous les vols arrivants à l'aéroport considéré ne peuvent pas être modifiés. Les vols qui ont pour point de départ l'aéroport considéré peuvent être retardés afin de rendre les horaires des vols faisables.

Les résultats trouvés pour la résolution séquentielle sont regroupés dans le tableau 5.4. La comparaison entre la résolution séquentielle et globale est faite à l'aide du tableau 5.5.

Tableau 5.4 : Résultats partiels de la résolution séquentielle

	Pas de réduction de capacité					
	Résolution séquentielle					
	1ère	2ème	3ème	4ème	5ème	6ème
Vols						
Vols annulés	0	0	0	0	0	1
Vols retardés	0	1	1	0	0	0
Retard total (min)	0	5	10	0	0	0
Retard moyen (min)	0	5.00	10.00	0	0	0
Avions						
Itinéraires changés	2	2	5	4	4	5
Équipages						
Itinéraires changés	0	0	0	0	2	5
Temps supplémentaire (min)	0	5	10	0	0	14
Passagers desservis (%)						
Arrivants	100	100	100	100	100	100
Partants	100	99.97	99.94	100	99.99	99.83
En connexion	100	99.82	99.30	100	99.92	99.75
Total	100	99.99	99.97	100	99.99	99.82
Solution						
CPU (s)	36	36	45	39	40	37

Tableau 5.5 : Résultats de la résolution séquentielle et de la résolution globale

	Pas de réduction de capacité	
	Après la résolution séquentielle	Après la résolution globale
Vols		
Vols annulés	1	0
Vols retardés	2	0
Retard total (min)	15	0
Retard moyen (min)	7.50	0
Avions		
Itinéraires changés	22	12
Équipages		
Itinéraires changés	7	2
Temps supplémentaire (min)	29	0
Passagers desservis (%)		
Arrivants	100	100
Partants	99.72	99.92
En connexion	98.79	98.80
Total	99.88	99.96
Solution		
CPU (s)	233	45

A l'aide du tableau 5.5, on voit aisément le gain d'une résolution globale vis-à-vis d'une résolution séquentielle aussi bien en terme de qualité de la solution qu'en temps de calcul. On peut voir qu'avec la résolution globale, aucun vol n'a été annulé ou retardé, que les équipages n'ont pas à effectuer de travail en temps supplémentaire, et qu'un plus grand nombre de passagers sont desservis. On peut remarquer aussi un gain notable pour les avions et les équipages : environ trois fois moins d'avions et d'équipages ont vu leurs itinéraires modifiés après la résolution globale par rapport à la résolution globale.

On peut conclure qu'il est nettement préférable de traiter toutes les perturbations qui surviennent en une seule fois plutôt que l'une après l'autre.

5.5 Optimisations partielles vis-à-vis de l'optimisation intégrée

Dans cette partie nous allons comparer 3 solutions où, lors de l'optimisation, on ne tient compte seulement des avions, des avions et des passagers ou des avions, des passagers et des équipages.

Les avions déjà en vols pourront être retardés au plus de 20 minutes, alors que les vols qui doivent atterrir à l'aéroport considéré et dont les avions qui doivent effectuer ces vols n'ont pas encore décollé peuvent être retardés sans limite pour la durée de leurs retards. Les vols qui ont pour point de départ l'aéroport considéré peuvent être aussi retardés. La réduction de capacité sera 63 %. Les résultats des différents scénarios envisagés sont regroupés dans le tableau 5.6 :

Tableau 5.6 : Résultats des optimisations partielles et de l'optimisation intégrée

	Réduction de capacité de 63 %		
	AVIONS	AVIONS + PASSAGERS	AVIONS + PASSAGERS + ÉQUIPAGES
Vols			
Vols annulés	0	0	0
Vols retardés	41	41	41
Retard total (min)	2 013	2 000	1 993
Retard moyen (min)	49.10	48.78	48.61
Avions			
Itinéraires changés	24	27	25
Équipages			
Temps supplémentaire (min)	3 032	3 421	701
Passagers desservis (%)			
Arrivants	99.07	99.28	99.14
Partants	94.43	94.37	94.47
En connexion	86.74	94.68	87.52
Total	97.03	97.12	97.13
Solution			
CPU (s)	3	3	45

Si on compare les deux premières colonnes de résultat du tableau 5.6, on peut voir qu'intégrer les passagers dans le modèle permet un gain de 8 % du nombre de passagers qui ont des connexions importantes et qui vont pouvoir les effectuer, sans augmenter le temps de calcul. Dans ces deux premiers cas, on voit que le temps supplémentaire de travail des équipages est très important car il n'est pas tenu compte des équipages lors de la résolution. Alors que dans le troisième cas, là où on tient compte des équipages lors de l'optimisation, le résultat permet de réduire cette surcharge de travail d'environ les $\frac{3}{4}$. Ce gain vis-à-vis des équipages se fait au détriment du temps de calcul, qui reste malgré tout fort acceptable et ne détériore pas trop la qualité de la solution au sujet des retards des vols et des passagers.

Si on tient compte de peu d'éléments lors de la résolution alors la qualité de la solution s'en trouve affectée, mais le temps de résolution est nettement réduit. L'élément qui fait nettement augmenter le temps de résolution est la présence ou non des équipages dans le modèle mathématique.

5.6 Conclusion

A la suite des différents tests effectués dans ce chapitre, nous pouvons prétendre que le modèle mathématique et son implantation informatique réagissent bien quel que soit le scénario envisagé.

L'avantage du modèle mathématique présenté dans ce mémoire réside dans le fait qu'il permet d'intégrer lors de la résolution les principaux éléments dont doit tenir compte le gestionnaire; i.e. la réduction de capacité ainsi que la période où celle-ci s'applique, les contraintes vis-à-vis des avions, des équipages, et des passagers, ... Ceci s'est vérifié avec les différents tests présentés dans ce chapitre 5. Effectivement, les réaffectations trouvées par l'optimiseur respectent les contraintes imposées par une compagnie aérienne si l'utilisateur fait usage de paramètres judicieusement choisis (c.f chapitre 5.3). Les solutions trouvées par cette approche intégrée et globale est nettement meilleure que si on se contente seulement d'une résolution séquentielle (c.f chapitre 5.4) qui se rapproche fort de ce qui se fait dans la réalité ou d'une résolution seulement partielle (c.f chapitre 5.5).

Les différentes solutions proposées par l'optimiseur sont de bonnes qualités et ont été trouvées dans un délai fort raisonnable. L'utilisation du programme présenté dans ce mémoire pourrait être faite par des compagnies aériennes soucieuses de résoudre promptement et efficacement les problèmes auxquels elles doivent faire face durant les jours d'opérations. Ce qui permettrait de réduire les surcoûts engendrés ainsi que d'augmenter le nombre de passagers pouvant effectuer leurs vols.

CONCLUSION

Nous voulions modéliser et résoudre le problème de réoptimisation lorsque survient des perturbations dans une compagnie aérienne. Dans le modèle intégré, nous devons respecter à la fois les contraintes liées aux vols proprement dits, mais aussi celles liées aux avions, aux équipages et aux passagers. D'autre part, le problème devait être résolu en temps réel afin que la solution puisse être appliquée.

Cette modélisation présente des avantages indéniables dans le contexte où ce projet a été défini, c'est-à-dire la création d'un système d'aide à la décision. En effet le modèle présenté permet aussi de tenir compte de la réduction de capacité de l'aéroport considéré. De plus, ce modèle prend en compte à la fois l'annulation ou le retard de plusieurs vols ce qui permet d'améliorer grandement la qualité de la solution mais aussi les contraintes spécifiques liées aux avions, aux équipages et aux passagers.

Les résultats numériques sont tout à fait en accord avec ceux escomptés, en d'autres termes les solutions trouvées sont valides et tout à fait adéquates aux attentes d'une compagnie aérienne. Les solutions proposées par le logiciel développé permettent effectivement un net gain de productivité, en outre elles sont faisables dans la réalité avec des paramètres judicieusement choisis. De plus, ces solutions ont été trouvées dans un délai raisonnable.

Les expérimentations faites à l'aide de mon interface graphique ont permis de corriger les erreurs de conceptions du modèle mathématique et d'ajouter différents paramètres au modèle. Par la suite, ce *GUI* a servi à valider le bien fondé de ce modèle ainsi que son implémentation informatique en vérifiant qu'ils répondaient effectivement aux exigences de départ concernant la qualité des solutions ainsi que le temps de résolution.

Les extensions possibles de ce travail peuvent prendre deux directions différentes : la première concerne l'amélioration du modèle mathématique, alors que l'autre voie d'amélioration concerne le *GUI*. Du point de vue du modèle, une extension possible serait de tenir compte de plusieurs aéroports à la fois lors de la résolution du problème. De cette manière, un progrès pour la vision globale du problème à traiter serait fait. Une extension possible pour l'interface graphique serait d'avoir au moins une fenêtre entièrement dédiée aux équipages et une autre consacrée aux passagers pour permettre une meilleure visualisation des problèmes à traiter et des solutions proposées.

RÉFÉRENCES

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

Air Transport Association of America. Juillet 1992. *Anatomy of a Delay*, n° 30.

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

BENDERS, J.F. 1962. Partitioning Procedures for Solving Mixed Variables Programming Problems, *Numerische Mathematics* 4, 238-252.

BYRNE, J. 1988. A Preferential Biddings System for Technical Aircrew, AGIFORS *Symposium Proceedings* 28, 87-99.

CAO, J.M. et KANAFANI, A. 1997. Real Decision Support for Integration of Airline Flight Cancellations and Delays, *Transportation Planning and Technology* 20, 183-217.

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

CHU, H.D., GELMAN, E. et JOHNSON, E. 1997. Solving Large Scale Crew Scheduling Problems, *European Journal of Operational Research* 97, 260-268.

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

DANTZIG, G.B. et WOLFE P. 1960. Decomposition principle for linear programming, *Operation Research* 8, 1001-1011.

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

DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., GAMACHE, M. et SOUMIS, F. 1998. Crew Scheduling in Air Transportation, *Fleet Management and Logistics*, T. Crainic et G Laporte (eds), Kluwer, Norwell, MA, 169-185.

DOBSON, G. et LEDERER, L. 1993. Airline Scheduling and Routing in a Hub and Spoke System, *Transportation Science* 27, 281-247.

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

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

FAHLE, T., JUNKER, U., KARISCH, S.E., KOHL, N., SELLMANN, M. et VAABEN, B. 2002. Constraint programming based column generation for crew assignment, *Journal of heuristics*, n° 8, 59-81.

GAMACHE, M. et SOUMIS, F. 1998. A Method for Optimally Solving the Rostering Problem, *Operations Research in the Airline Industry*, edited by Gang YU, 124-156.

GAMACHE, M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., DESROSIERS, J. et GELINAS, E. 1998. The Preferential Bidding System at Air Canada, *Transportation Science* 32, n° 3, 246-255.

GERSHOFF, I. 1984. A Timetable Approach to the Assignment of Pilots to Rotations, *AGIFORS Symposium Proceedings* 24, 369-391.

GLANERT, W. 1984. Aircraft Shortage Evaluator, presented at the ORSA/TIMS Joint National Meeting, St Louis, MO (October).

GOPALAN, R. et TALLURI, K.T. 1998. The Aircraft Maintenance Routing Problem, *Operation Research* 46, n° 2, 260-271.

GRAVES, G.W., McBRIDE, R.D., GERSHKOFF, I., ANDERSON, D. et MAHIDARA, D. 1993. Flight Crew Scheduling, *Management Science* 39, 736-745.

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

JARRAH, A.I.Z., YU, G., KRISHNAMURTHY, N. et RAKSHIT, A. 1993. Network Models for Airline Flight Cancellation and Delays, *Transportation Science* 27, n° 3, 266-280.

JARRAH, A.I.Z. et STREHLER, J.C. 2002. An Optimization model for assigning through flights, *IIE Transactions* 32, n°3, 237-244.

KLINCEWICZ, J.C. et ROSENWEIN, M.C. 1995. The Airline Exception Scheduling Problem, *Transportation Science* 29, n° 1, 4-16.

LEVIN, A. 1971. Scheduling and Fleet Routing Models for Transportation Systems, *Transportation Science* 5, 232-255.

LETOVSKÝ, L. 1997. Airline Operations Recovery: An Optimization Approach, Ph.D. dissertation, Georgia Institute of Technology.

LETOVSKÝ, L., JOHNSON, E.L. et NEMHAUSER, G.L. 2000. Airline Crew Recovery, *Transportation Science* 34, n° 4.

LUO, S. et YU, G. 1998. Airline Schedule perturbation Problem: Landing and Takeoff with Nonsplitable Resource for the Ground Delay Program, Operations Research in the Airline Industry, edited by Gang YU, 404-432.

MOORE, R., EVANS, J. et NOO, H. 1978. Computerized Tailored Blocking, *AGIFORS Symposium Proceedings* 18, 343-361.

- NIKULAINEN, M. 1992. A Simple Mathematical Method to Define Demand for Schedule Planning, *AGIFORS Symposium Proceedings* 32, 77-85.
- PHILIPS, R.L. et BOYD, D.W. 1989. An Integrated Approach to Airline Fleet and Scheduling Planning, *AGIFORS Symposium Proceedings* 29, 284-28.
- RAKSHIT, A., KRISHNAMURTHY, N. et YU, G. 1996. System Operations Advisor: A Real-Time Decision Support System for Managing Airline Operations at United Airlines, *Interfaces* 26, n° 2, 50-58.
- REXING, B., BARNHART, C., KNIKER, T., JARRAH, A. et KRISHNAMURTHY, N. 2000. Airline Fleet Assignment with Time Windows, *Transportation Science* 34, n° 1, 1-20.
- RUSHMEIER, R.A. et KONTORGIOGIS, S.A. 1997. Advances in the Optimization of Airline Fleet Assignment, *Transportation Science* 31, n° 2, 159-169.
- RYAN, D.M. 1992. The solution of Massive Generalized Set Partitioning Problems in Air Crew Rostering, *Journal of Operational Research Society* 43, n° 5, 459-467.
- SIMPSON, R.W. 1968. A Review of Scheduling and Routing Models for Airline Scheduling, *AGIFORS Symposium Proceedings* 8.
- STOJKOVIĆ, M., SOUMIS, F. et DESROSIERS, J. 1998. The Operational Airline Crew Scheduling Problem, *Transportation Science* 32, n° 3, 232-245.

STOJKOVIĆ, G. 1999. Gestion des avions et des équipages durant le jour d'opération, thèse de doctorat, Université de Montréal, École Polytechnique de Montréal.

STOJKOVIĆ, M. et SOUMIS, F. 2001. An Optimization Model for the Simultaneous Operational Flight and Pilot Scheduling Problem, *Management Science* 47, n° 9, 1290-1305.

STOJKOVIĆ, M. 2003. Integrated aircraft and crew recovery, *document interne, GERAD*.

TALLURI, K.T. 1996. Swapping Application in a Daily Airline Fleet Assignment, *Transportation Science* 30, n° 3, 237-248.

TALLURI, K.T. 1998. The Four-Day Aircraft Maintenance Routing Problem, *Transportation Science* 32, n° 1, 43-53.

TEODOROVIĆ, D. et STOJKOVIĆ, G. 1990. Model for Operational Daily Airline Scheduling, *Transportation Planning and Technology* 14, 273-285.

TEODOROVIĆ, D. et G. GUBERINIĆ. 1984. Optimal Dispatching Strategy on an Airline Network After a Schedule Perturbation, *European Journal of Operations Research* 15, 178-182.

VASQUEZ-MARQUEZ, A. 1998. American Airlines Arrival Slot Allocation System (ASAS), *Interfaces* 21, n° 1, 42-61

YAN, S. et YOUNG, H. 1996. A Decision Support Framework for Multi-Fleet Routing and Multi-Stop Flight Scheduling, *Transportation Research* 30, 379-398.

YU, G. 1998. Operations Research in the Airline Industry, Kluwer, Boston.