

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA MISE À JOUR DES
HORAIRES D'AVION

ABDOULAYE HOULA-SANDA
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)

JUIN 2005

© Abdoulaye Houla-Sanda, 2005.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-16796-0

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16796-0

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 :

SYSTÈME D'AIDE À LA DÉCISION POUR LA MISE À JOUR DES
HORAIRES D'AVION

présenté par : HOULA SANDA Abdoulaye

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

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

M. HERTZ Alain, Doct. ès Sc., président

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

M. DESAULNIERS Guy, Ph.D., membre

À mon père et à mes enfants Amadou et Mariama...

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche, François Soumis, pour le soutien professionnel et financier qu'il m'a apporté pendant ma maîtrise. Je le remercie aussi pour m'avoir donné la chance de poursuivre mes études au GERAD.

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

Je tiens à remercier François Lessard pour son aide précieuse.

Je veux exprimer ma gratitude au personnel du GERAD.

Merci à toutes les secrétaires du département de mathématiques et de génie industriel. Je remercie plus particulièrement Suzanne Guindon et Diane Bernier pour leur professionnalisme et leur si beau sourire.

Je salue la mémoire de mon papa qui a su me communiquer le goût d'étudier depuis ma tendre enfance et d'aller le plus loin possible.

Finalement je veux remercier ma mère pour ses encouragements tout le long de mes études et ma femme Salane qui a partagé mes espoirs et mes doutes tout au long de ce périple.

RÉSUMÉ

L'objet de ce mémoire de maîtrise est de proposer un système d'aide à la décision pour la mise à jour des horaires d'avion suite à des perturbations, d'élaborer une méthode de résolution du problème, d'implémenter et de tester cette méthode. L'approche choisie est une approche locale qui s'inspire de celle utilisée par les gestionnaires de vols. L'objectif est d'aider le gestionnaire des vols à produire des décisions valables, en lui offrant plusieurs bonnes solutions pour chacune des perturbations traitées séquentiellement dans un ordre défini par le gestionnaire de vols. C'est le gestionnaire de vols qui décidera laquelle des solutions sera la meilleure pour une situation donnée.

Dans ce système, nous évaluons l'horaire de vols dans le but de l'améliorer en permettant l'annulation de vol et/ou le retard de vol et/ou les échanges d'avions aux vols. De plus le problème doit être résolu en temps réel afin que sa solution puisse être appliquée. Des tests ont été effectués sur un jeu de données provenant d'une compagnie aérienne.

Dans ce mémoire, nous traitons uniquement un aéroport à la fois étant donné que nous utilisons une approche locale. Dans le modèle de base (Modèle 1), chaque vol critique est résolu en partant d'une même situation initiale sans tenir compte du fait qu'il y a d'autres vols critiques. Lorsqu'on traite un vol critique donné, les autres vols critiques sont inclus dans le réseau avec leur heure de départ planifiée. Nous apportons deux modifications au modèle de base.

La première modification (Modèle 1') est effectuée de telle façon qu'on garde la formulation du modèle de base sauf que les autres vols critiques ainsi que leur avion planifié ne sont pas pris en considération dans le réseau.

La deuxième modification (Modèle 2) est une amélioration du modèle de base. Afin d'avoir un modèle plus complet, de couvrir plus de vols et de mieux utiliser les ressources disponibles, nous avons ajouté dans le réseau les autres avions critiques et les autres vols critiques. Les autres avions critiques sont pris en compte avec leur heure d'arrivée actualisée. Nous avons ainsi obtenu un modèle qui est plus conforme à la réalité, qui améliore la qualité de la solution et accélère le temps d'exécution du programme.

Le modèle de base ainsi que les modifications sont testés sur des problèmes provenant des données d'une compagnie aérienne. Les résultats obtenus sont très satisfaisants pour les modèles 1 et 2 : les temps de calcul sont raisonnables et la qualité des solutions est bonne. Le modèle 2 a apporté des améliorations qui ont eu les effets attendus : le modèle est devenu très réaliste, la solution s'est nettement améliorée. Nous avons réussi à modéliser le problème de mise à jour des horaires d'avion le jour des opérations et à obtenir de bonnes solutions en des temps très raisonnables.

ABSTRACT

The purpose of this master's thesis is to propose a decision support system for the aircraft recovery problem during the day of operation, to work out a method of resolution of the problem, to implement and to test this method. The proposed approach is a local approach which looks like the one used by the airline coordinator. The objective is to help the airline coordinator to produce valid decisions, by offering him several good solutions for each disruption treated sequentially in an order defined by the airline coordinator. The airline coordinator will decide which solution will be the best in the given situation.

In this system, we evaluate the schedule of flights in order to improve it by allowing cancellation of flights and/or delay of flights and/or aircraft swaps. Moreover the problem has to be solved in real time so that its solution can be applied. Tests were carried out on a data set coming from an airline company.

In this thesis, we treat only one airport at the same time since we use a local approach. In the basic model (Model 1) each critical flight is solved on the basis of the same initial situation without taking into account the fact that there are other critical flights. When a given critical flight is treated other critical flights are included in the network with their planned time of departure. We make two modifications to the basic model:

The first modification (Model 1') has been designed in such a way that the formulation of the basic model is kept except that the other critical flights, as well as their planned aircraft are not taken into account in the network.

The second modification (Model 2) is an improvement of the basic model. In order to have a better model, that covers more flights and that better uses the available

resources we added in the network the other critical aircrafts and the other critical flights. The other critical aircrafts are taken into account with their revised arrival time. We thus obtained a more realistic model, which improves the quality of the solution and decreases the execution time of the program.

The basic model as well as the modifications have been tested on a set of problems provided by an airline company. The obtained results are very satisfactory for models 1 and 2: the computing times are reasonable and the quality of the solutions is good. Model 2 has led to improvements that were expected: the proposed model is very realistic and the solution has been clearly improved.

We have successfully modeled the aircraft recovery problem during the day of operation and have obtained good solutions in reasonable times.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES ALGORITHMES	xvii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 : Vocabulaire	1
1.2 : Processus de planification en transport aérien	3
1.3 : Mise à jour des horaires planifiés	8

1.3.1 : Approche globale	10
1.3.2 : Approche locale	11
1.4 : Objectif et organisation du mémoire	11
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE	12
CHAPITRE 3 : MODULE PROPOSÉ	19
3.1 : Définition du problème	19
3.2 : Fonctionnalité	22
3.2.1 : Résolution en considérant un seul vol critique à la fois	24
3.2.2 : Résolution en considérant plusieurs vols critiques à la fois . .	25
3.3 : Mode d'utilisation	25
3.3.1 : Système autonome	27
3.3.2 : Module intégré	28
CHAPITRE 4 : MODÈLE D'OPTIMISATION	29
4.1 : Modèles 1 et 1' : Un vol critique	30
4.1.1 : Notation	30
4.1.2 : Réseau	33

4.2 : Modèle 2 : Plusieurs vols critiques	40
4.2.1 : Notation	40
4.2.2 : Réseau	41
4.3 : Algorithme de résolution : K plus courts chemins	45
4.4 : Résolution du problème	49
CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATION	51
5.1 : Données du problème	51
5.2 : Comparaison des différents modèles	59
5.2.1 : Une perturbation	59
5.2.2 : Deux perturbations	59
5.2.3 : Trois perturbations	60
5.2.4 : Quatre perturbations	60
5.2.5 : Cinq perturbations	61
5.2.6 : Six perturbations	61
5.3 : Comparaison entre les modèles 1, 2 et l'optimiseur	62
5.3.1 : Une perturbation	62
5.3.2 : Deux perturbations	62

5.3.3 : Trois perturbations	63
5.3.4 : Quatre perturbations	63
5.3.5 : Cinq perturbations	63
5.3.6 : Six perturbations	64
5.3.7 : Production de plusieurs bonnes solutions	64
5.4 : Synthèse des résultats	64
CONCLUSION	67
BIBLIOGRAPHIE	69
ANNEXES	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1 : Perturbations	52
Tableau 5.2 : Données d'entrée	53
Tableau 5.3 : Récapitulatif : qualité de la solution	55
Tableau 5.4 : Récapitulatif : qualité de la solution (suite)	56
Tableau 5.5 : Récapitulatif : performance de la solution	57
Tableau 5.6 : Récapitulatif : performance de la solution (suite)	58

Figure A.6 : Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen	79
Figure A.7 : Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)	79
Figure A.8 : Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)	80
Figure A.9 : Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)	80
Figure A.10 Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)	81
Figure A.11 Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (fin)	81

LISTE DES ALGORITHMES

4.1 : Dijkstra modifié	49
----------------------------------	----

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

La planification des itinéraires d'avion et des rotations d'équipage se fait longtemps à l'avance. Lorsque des perturbations surviennent en cours d'opération, les horaires d'avions ou des équipages peuvent devenir non réalisables. Le gestionnaire des vols doit alors procéder à la mise à jour des horaires planifiés et trouver une solution réalisable, i. e., des horaires d'avion et des horaires d'équipage réalisables. Nous limiterons notre champ d'intérêt à la mise à jour des horaires d'avion. Ce problème doit être résolu dans un environnement très difficile à prévoir à cause de nombreux facteurs tels que les changements des conditions météorologiques, l'absence d'équipage, la défaillance des équipements, un vol en retard, etc. Le temps de résolution du problème doit être suffisamment court pour que le gestionnaire des vols puisse réagir en temps réel suite à une perturbation.

Ce mémoire s'intéresse à la mise à jour des horaires d'avion. Avant de définir à fond le problème, la première section de ce chapitre définit la terminologie pertinente utilisée. Ensuite, la deuxième section contient une revue de littérature sur la planification en transport aérien. La troisième section décrit la mise à jour des horaires planifiés. La dernière section définit l'objectif et la structure du mémoire de maîtrise.

1.1 Vocabulaire

Définissons d'abord le vocabulaire du domaine aérien utilisé dans ce mémoire.

Station : aéroport desservi par une compagnie aérienne.

Segment de vol : déplacement sans atterrissage intermédiaire d'une station d'origine à une station de destination, avec une heure de départ et une heure d'arrivée.

Vol : suite de segments de vol consécutifs effectués par un même appareil et désignés par un même numéro de vol.

Horaire de vols : liste des vols devant être effectués au cours d'un certain horizon (par exemple, un jour ou une semaine).

Vol critique : vol dont l'avion planifié n'est pas disponible à l'heure prévue à cause d'une perturbation.

Entretien : ensemble d'opérations de vérification et de réparations qui sont effectuées régulièrement sur un appareil.

Itinéraire d'avion : séquence de segments de vol et d'entretiens, ordonnés chronologiquement, qui sont effectués par un appareil spécifique.

Horaire d'avion : plan d'utilisation des avions précisant le type d'avion utilisé pour chaque vol et l'itinéraire que parcourra chaque avion.

Service de vol : séquence de vols effectués par un équipage durant une journée de travail.

Rotation d'équipage : séquence de services de vol et de périodes de repos, ordonnés chronologiquement et effectués par un même équipage.

Durée de bloc : durée entre le moment où l'avion quitte la porte d'embarquement de la station d'origine jusqu'à ce que l'avion arrive à la porte de débarquement de la station de destination.

Connexion d'avion : période entre deux segments de vol où l'avion est au sol mais pas en entretien.

Connexion d'équipage : période entre deux segments de vol où l'équipage change d'avion.

Gestionnaire des vols : responsable de la régulation des vols en charge de la gestion de la circulation pendant la journée d'opération.

Ferry : segment de vol où l'avion est déplacé sans passagers.

Mise en place : segment de vol utilisé pour déplacer un équipage inactif jusqu'à la station où il deviendra actif ou jusqu'à son domicile.

Flotte : ensemble d'avions de même type.

Base technique : station où peut être effectué un type d'entretien.

Bloc mensuel : séquence d'activités effectuées par un seul pilote dans le mois.

Horaire d'équipage : horaire de travail pour chaque membre d'équipage précisant les vols, les périodes de repos et les entraînements.

1.2 Processus de planification en transport aérien

L'activité du transport aérien est un processus complexe qui fait intervenir des investissements lourds (les avions et les infrastructures de maintenance), du personnel hautement qualifié (le personnel navigant en particulier) et une informatique en temps réel très coûteuse (les systèmes de réservation et de gestion). Les compagnies

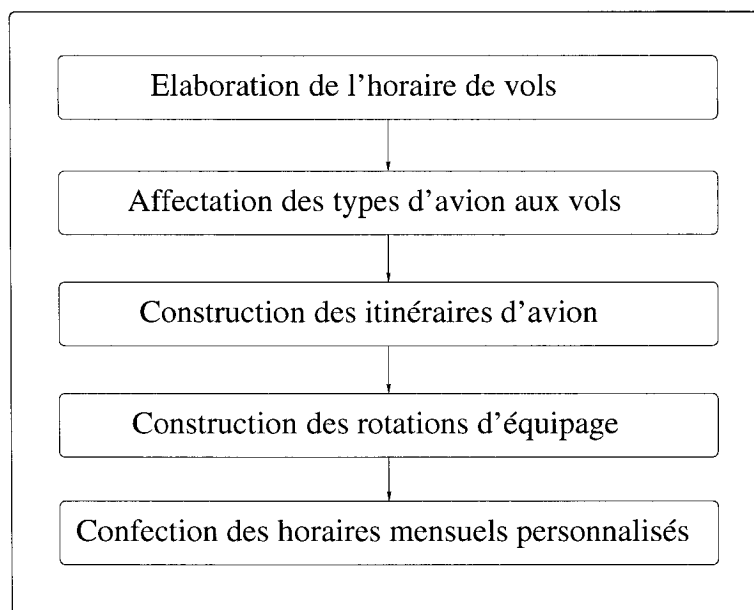


Figure 1.1 – Processus de planification en transport aérien

aériennes évoluent dans un marché très compétitif. L'optimisation de leurs opérations a un impact déterminant sur leur compétitivité. Le processus de planification dans le transport aérien est long et trop complexe pour être traité globalement. Comme le montre la figure 1.1, il est divisé en plusieurs étapes qui sont traitées séquentiellement ; le résultat d'une étape donnée sert d'input à l'étape suivante. Le processus implique les étapes suivantes.

– **Élaboration de l'horaire de vols**

La première étape consiste à construire l'horaire de vols. L'horaire est construit en tenant compte de la demande prévue suite à une étude de marché, des ressources disponibles, des horaires de vols offerts par la concurrence, etc. Le résultat détermine l'heure de départ, la ville de départ et la ville d'arrivée pour chaque vol. Cette étape est la plus importante de la planification puisque l'horaire est le produit vendu par la compagnie. Un horaire de vols est sujet à des changements

mineurs avant opération. La littérature fait peu état des modèles permettant de construire des horaires de vols utilisables en pratique. Il semble que même aujourd'hui le développement des horaires de vols est essentiellement manuel. Une revue de littérature sur le sujet se trouve dans Etschmaier et Mathaisel (1985).

– **Affectation des types d'avion aux vols**

Les compagnies aériennes ont généralement plus d'un type d'avion. Une fois que l'horaire des vols a été élaboré, il faut déterminer par quel type d'avion sera effectué chacun des vols. Le profit associé à un vol dépend du type d'avion utilisé pour le couvrir, la capacité de l'avion, son coût d'opération et de la demande. Lorsque la demande de passagers pour un segment de vol excède la capacité de l'avion, certains passagers sont exclus et ils sont pris en compte par d'autres segments de vol. L'objectif d'un modèle traditionnel d'affectation de type d'avion aux vols est de minimiser la perte de revenu des passagers qui dépassent la capacité de l'avion et le coût opérationnel. Hane et al. (1995), Gu et al. (1994), Barnhart et al. (1998), Kniker (1998) et Barnhart et al. (2002) décrivent le problème d'affectation des types d'avion aux vols en détail.

– **Construction des itinéraires d'avion**

Une fois qu'un type d'avion a été affecté à chaque segment de vol, des itinéraires d'avion sont générés. Chaque itinéraire d'avion doit satisfaire les exigences de la maintenance : les entretiens périodiques devant être satisfaits aux bases techniques. Clarke et al. (1997) décrivent le problème de construction des itinéraires d'avion. Jarrah et Strehler (2002) considèrent le problème d'optimisation des choix des connexions directes.

– Construction des rotations d’équipage

Le problème de construction des rotations d’équipage partitionne l’ensemble des segments de vol en voyages pour des équipages. Généralement, les pilotes sont qualifiés pour un seul type d’avion. A ce moment, le problème de construction de rotations d’équipage est séparable par type d’avion. Le problème de construction des rotations d’équipage consiste à couvrir, à coût minimum, les vols de la compagnie par les équipages qualifiés. Lorsque les membres d’équipage travaillent, ils suivent des segments de vol consécutifs tout en respectant certaines règles provenant des conventions collectives et organismes gouvernementaux. On détermine donc les rotations d’équipage afin d’assurer la disponibilité d’un équipage pour chaque vol. Le problème de construction de rotations d’équipage journalier est résolu en supposant qu’un même horaire de vols se répète tous les jours de la semaine. Hoffman et Padberg (1997), Chu et al. (1997), Vance et al. (1997), Klabjan et Schwan (1999), Klabjan et al. (2001b) donnent les détails des implémentations pour le problème journalier. Pourtant, un horaire de vols varie au cours de la semaine. Par exemple, un horaire de vols le lundi peut être différent de celui du samedi. Le problème hebdomadaire est résolu en supposant un même horaire de vols chaque semaine. Klabjan et al. (2001a) donnent les détails des implémentations pour le problème hebdomadaire. On peut résoudre le problème de partitionnement en considérant implicitement toutes les rotations possibles à l’aide d’une approche de génération de colonnes, le tout étant imbriqué dans une procédure de séparation et d’évaluation progressive. Cette approche est utilisée par Desaulniers et al. (1997). Barnhart et al. (1995) proposent une approche pour résoudre le problème permettant aux membres d’équipage de voyager comme passagers sur des segments de vol offerts par la compagnie ou même d’autres transporteurs.

– Confection des horaires mensuels personnalisés

Il s'agit de planifier les activités de chacun des membres d'équipage (pilotes, co-pilotes, chefs de cabine, agents de bord), pour un horizon d'un mois. En plus des rotations d'équipage, ces activités comprennent des stages, des périodes d'entraînement, des congés, des examens médicaux, etc. Ces horaires sont construits de façon à minimiser les coûts pour la compagnie tout en maximisant la satisfaction du personnel et en tenant compte des règles provenant des conventions collectives et des organismes gouvernementaux.

L'approche bidline consiste à générer un ensemble d'horaires non personnalisés de travail permettant de couvrir à coût minimum toutes les rotations. Une fois les horaires construits, les employés indiquent leur préférence et les horaires leurs sont attribués par ordre d'ancienneté.

L'approche rostering permet la construction d'un horaire personnalisé pour chaque employé. On tient compte des activités pré-assignées. Pour résoudre ce problème, Gamache et Soumis (1998) et Gamache et al. (1999) font appel à une procédure de génération de colonnes imbriquée dans une procédure de séparation et d'évaluation progressive.

L'approche preferential bidding prend en compte les intérêts particuliers de chaque employé par ordre d'ancienneté lors de la confection des horaires. Gamache et al. (1998) proposent une approche quasi-optimale à l'aide d'une décomposition par génération de colonnes imbriquée dans une procédure de séparation et d'évaluation progressive.

L'élaboration des horaires de vols se fait avant chaque saison, avec des révisions mensuelles. Les compagnies aériennes préparent donc un plan d'utilisation des avions

en précisant le type d'avion utilisé pour chaque vol et l'itinéraire que parcourra chaque avion. L'élaboration des horaires d'avion se fait aussi avant chaque saison, avec des révisions mensuelles. Un horaire de travail pour chaque membre d'équipage est aussi élaboré, en précisant les vols, les périodes de repos et les stages d'entraînement. La planification du personnel naviguant est réalisée un à deux mois à l'avance. La plupart des activités décrites ci-dessus appartiennent au registre de la planification. A part les outils pour la planification d'opérations, il faut disposer d'outils pour le suivi des décisions et la prise en compte des aléas, au fur et à mesure qu'ils sont observés. Ce besoin est d'autant plus crucial au moment où les opérations passent du stade virtuel à leur réalisation.

1.3 Mise à jour des horaires planifiés

Toutes les compagnies aériennes possèdent un centre de contrôle des opérations (CCO) qui fait la mise à jour des horaires d'avion. La veille du départ de chaque vol, le CCO "reprend la main" sur toutes les activités opérationnelles. Ce centre fonctionne nuit et jour. Le plus souvent un CCO fait la mise à jour manuellement (Lettovsky, 1997). Il regroupe des décideurs qui doivent résoudre quasiment en temps réel et au mieux pour la compagnie et ses passagers tous les problèmes pouvant se produire : avion retardé, équipage manquant, aéroport fermé, intempéries, saturation d'aéroport, etc. Une perturbation est un événement qui empêche la compagnie aérienne d'opérer un vol tel que prévu par la planification.

La mise à jour des horaires planifiés le jour des opérations comprend les mises à jour présentées dans les paragraphes suivants.

Mise à jour des itinéraires d'avion et des vols

Suite à une ou plusieurs perturbations, le gestionnaire de vol réorganise le plan initial en procédant à des échanges et substitutions d'avions aux vols, à des annulations de vol ou à des retards de vol afin d'obtenir un nouveau plan réalisable permettant de continuer les opérations planifiées. Les coûts supplémentaires associés aux avions et passagers dérangés par des modifications au plan initial devraient être les plus petits possibles.

Mise à jour des équipages

Une fois que l'étape précédente est terminée, il faut réorganiser les rotations d'équipage selon le nouvel horaire de vols duquel les vols annulés sont retirés. La mise à jour des équipages consiste à affecter les membres d'équipages aux segments de vol opérationnels en routant de nouveau les membres d'équipages planifiés et en faisant appel aux membres d'équipages de réserve. Le but est de minimiser les coûts supplémentaires causés par des changements aux rotations d'équipage initiales.

Mise à jour des passagers

Finalement, une mise à jour des passagers route de nouveau les passagers concernés par la mise à jour de l'horaire planifié.

Mise à jour intégrée

La mise à jour composée des trois étapes précédentes correspond à l'approche traditionnelle utilisée dans les compagnies aériennes. La mise à jour intégrée a fait son apparition plus récemment. Suite à une ou plusieurs perturbations, la mise à jour intégrée consiste à résoudre simultanément les mises à jour des vols et des itinéraires d'avion, des rotations d'équipage et des itinéraires des passagers. Ainsi on détermine

les retards et les annulations de vol et les échanges d'avions aux vols, les changement dans les rotations d'équipage et des modifications des itinéraires initiaux des passagers.

Les perturbations peuvent être résolues en utilisant deux approches : une approche globale où on résout simultanément toutes les perturbations données et une approche locale où on résout les perturbations séquentiellement dans un ordre prédéfini.

1.3.1 Approche globale

Dans le cas de l'approche globale tous les vols critiques sont traités simultanément, on tient compte de toutes les perturbations qui touchent un aéroport et de toutes les flottes de la compagnie impliquées dans le problème. Les équipages et les passagers sont pris en compte également. L'objectif est de minimiser les coûts de mise à jour des horaires d'avion et d'équipage tout en minimisant les perturbations des itinéraires planifiés des passagers. Les principales contraintes sont :

1. la capacité des stations ;
2. le délai maximal et le type d'avion permis pour chaque vol ;
3. les temps de connexion ;
4. la maintenance des avions ;
5. la qualification, la durée de travail et le temps de transfert pour les équipages.

Un nouvel horaire de vols est obtenu avec des retards et des annulations, des réaffectations des avions aux vols et des réaffectations des équipages. Une solution optimale est produite pour tous les avions critiques en utilisant les avions de la flotte touchée et les avions des autres flottes qui visitent l'aéroport critique.

1.3.2 Approche locale

Dans le cadre de l'optimisation locale, un aéroport et une seule perturbation sont traités à la fois. Étant donné l'horaire initial et un ensemble de perturbations (vols retardés, avion ayant des problèmes mécaniques), l'approche consiste à résoudre une perturbation à la fois sans tenir compte des autres perturbations présentes en même temps. Le problème doit être résolu en préservant au mieux les connexions des passagers et en minimisant les coûts d'annulation de vol et de réaffectation d'avion. L'objectif de résolution est de fournir au gestionnaire de vols un ensemble de solutions alternatives.

1.4 Objectif et organisation du mémoire

L'objet de ce mémoire de maîtrise est de proposer un système d'aide à la décision pour la mise à jour des horaires d'avion suite à des perturbations, d'élaborer une méthode de résolution du problème, d'implémenter et de tester cette méthode. L'approche choisie est une approche locale qui s'inspire de celle utilisée par les gestionnaires des vols. Les perturbations sont traitées séquentiellement dans un ordre défini par le gestionnaire des vols. L'objectif est d'aider le gestionnaire des vols à produire des décisions valables, en lui offrant plusieurs bonnes solutions pour chaque perturbation. C'est le gestionnaire des vols qui décidera laquelle des solutions sera la meilleure dans la situation donnée.

Voici un bref aperçu du contenu de ce mémoire. Le deuxième chapitre présente une revue de littérature pour chacune des étapes de la mise à jour des horaires planifiées. Le troisième chapitre définit le problème et décrit le module proposé. Le chapitre suivant présente les modèles proposés pour résoudre le problème. Le cinquième chapitre présente les résultats numériques obtenus avec différents scénarios de tests. Ce mémoire se termine par une brève conclusion.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

Comme nous l'avons vu en introduction, la mise à jour des horaires planifiés se fait traditionnellement en deux étapes :

1. la mise à jour des horaires de vols et des itinéraires d'avion,
2. la mise à jour des horaires d'équipage.

Des travaux récents font cas du problème intégré : la mise à jour simultanée des itinéraires d'avion et des horaires d'équipage. Même si ce mémoire porte seulement sur le problème de la mise à jour des horaires d'avion, nous présentons les travaux sur l'ensemble des trois problèmes énumérés.

Ce chapitre est scindé en trois parties. La première partie contient une revue de littérature de la mise à jour des horaires de vols et des itinéraires d'avion. La deuxième partie contient une revue de littérature sur la mise à jour des horaires d'équipage. La dernière partie contient une revue de littérature de la mise à jour intégrée.

Mise à jour des horaires de vols et des itinéraires d'avion

Teodorovic et Gubernic (1984) ont indiqué l'importance du problème et ont proposé un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour le problème global. La fonction objectif de leur modèle minimise les pertes totales de temps des passagers sans annuler les vols planifiés. Ce modèle n'inclut pas les équipages et les contraintes de maintenance. Aucun résultat expérimental n'a été donné.

Teodorovic et Stojkovic (1990) ont développé un algorithme heuristique basé sur la programmation dynamique. Le modèle a deux objectifs : minimiser le nombre total de vols annulés et minimiser les pertes totales de temps de tous les passagers

dans le réseau. Le modèle ne tient pas compte des équipages et des contraintes de maintenance.

Teodorovic et Stojkovic (1995) ont amélioré leur modèle précédent. Ils ont développé un système d'aide à la décision qui contient trois modules. Le premier génère des rotations d'équipage, le second génère les itinéraires d'avion en utilisant les rotations d'équipage du premier module et le troisième module vérifie les contraintes de maintenance des avions. Les deux premiers modules utilisent deux algorithmes pour générer les rotations d'équipage et les itinéraires d'avion : une heuristique FIFO (premier arrivé, premier servi) et une heuristique séquentielle basée sur la programmation dynamique citée précédemment. Le troisième module contient un ensemble de règles qui permet les échanges de vols si l'itinéraire n'est pas faisable du fait de la maintenance.

Stojkovic et al. (2002) proposent un modèle qui garde les itinéraires d'avion et les rotations d'équipage intacts en retardant certains vols lorsque des irrégularités mineures surviennent le jour d'opération. Le modèle est un modèle de réseau multicommodités. Ils ont ramené le problème à un modèle de réseau. Le réseau contient des noeuds associés au début et à la fin de chaque vol et des arcs correspondant aux vols et aux déplacements des avions. Le temps de visite de chaque nœud est limité par une fenêtre de temps. La formulation duale du modèle est un problème de flot à coût minimum, dont la solution s'obtient très rapidement.

Rakshit (1990), Krishnamurthy (1991) et Jarrah et al. (1993) ont présenté un système modulaire pour traiter le problème des opérations irrégulières. Deux modules ont été développés : un qui fournit une solution avec des retards de vols et des réaffectations d'avion aux vols et un autre qui fournit une solution avec des annulations de vols. Les deux modules sont formulés comme un modèle de flot à coût minimum avec plusieurs sources et puits. Le réseau est construit en tenant compte des

contraintes opérationnelles, d'équipages et de maintenance. Une capacité unitaire est assignée à tous les arcs du réseau. Le flot total requis du réseau est égal au nombre de pénuries. Pour résoudre le problème de flot à coût minimum, l'algorithme dual est utilisé. Les plus courts chemins sont générés successivement en utilisant l'algorithme de Busacker-Gowen. L'utilisateur définit l'endroit où les échanges d'avion sont permis et les pénuries multiples peuvent être résolues simultanément. Les deux modules fonctionnent en temps réel en utilisant des données de United Airlines. Les coûts assignés aux arcs du réseau sont basés sur les données courantes et historiques de la compagnie. Des résultats expérimentaux pour le modèle avec retard sont présentés par Rakshit et al. (1996).

Yan et Yang (1996) ont proposé quatre modèles pour aider les compagnies aériennes à gérer les perturbations causées par une panne d'un avion. Les modèles considèrent quatre différentes stratégies : annulations de vol, annulations de vol et ferry d'un avion réparé, annulations de vol avec retards de vol, annulations de vol avec ferry d'un avion réparé et retards de vol. Les deux premiers modèles sont formulés comme des modèles de flot dans le réseau et sont résolus en utilisant la méthode du simplexe adaptée à un réseau. Les deux derniers modèles sont formulés comme des modèles de flot dans le réseau avec des contraintes additionnelles et ils sont résolus en utilisant la relaxation lagrangienne et une méthode de sous-gradients. Ces modèles ne tiennent pas compte des rotations d'équipage, de la maintenance et des connexions des passagers.

Cao et Kanafani (1997) proposent un système d'aide à la décision qui intègre les annulations et les retards de vol. Cette recherche est une extension des travaux de Jarrah et al. (1993). Les auteurs présentent un modèle quadratique binaire qui maximise le profit en tenant compte des coûts de retard, de réaffectation et des pénalités pour les annulations de vol.

Arguello et al. (1997) présentent un modèle d'optimisation par tranche de temps pour reconstruire les itinéraires d'avion. Le problème est résolu à l'aide d'une heuristique.

Ce modèle correspond à un problème de flot à coût minimum avec contraintes supplémentaires. Ils justifient l'utilisation de l'heuristique en montrant la complexité des difficultés liées à la résolution par les méthodes exactes. Des résultats expérimentaux sont présentés.

Mise à jour des équipages

La mise à jour des équipages fait suite à la mise à jour des avions. Les inputs du problème sont les nouveaux itinéraires des avions avec les nouvelles heures de départ et les segments de vol annulés. De nouvelles rotations d'équipage doivent être obtenues. Les rotations non perturbées peuvent être utilisées durant les mises à jour, mais leur nombre doit être minimisé. Un objectif est de revenir le plus rapidement possible à la rotation initiale de l'équipage. Un autre objectif est de minimiser les coûts associés à la solution proposée (salaire supplémentaire de l'équipage, coût d'annulation des vols qui ne peuvent pas être opérés, coût de mise en place de l'équipage, coût d'utilisation des équipages de réserve, etc.).

Wei et al. (1997) considèrent que la solution optimale ne peut pas être trouvée en temps réel et qu'il est plus utile pour une compagnie aérienne d'obtenir plusieurs solutions acceptables, mais pas forcément optimales. Ils proposent une méthode heuristique pour résoudre le problème. L'horaire des vols ainsi que l'itinéraire des avions sont fixés. Le problème est formulé comme un problème de multiflots en nombres entiers. L'objectif est de couvrir un maximum de vols tout en minimisant le nombre total de rotations modifiées. Un algorithme de recherche heuristique est utilisé pour explorer l'arbre de recherche contenant les solutions possibles. À chaque nœud de l'arbre, une solution est générée pour tous les équipages, mais les vols ne sont pas forcément tous couverts. Cette solution est trouvée à l'aide d'un plus court chemin dans un réseau. La réalisabilité de chaque rotation est vérifiée une fois la rotation générée. Si une rotation s'avère non réalisable, la branche de l'arbre est coupée. Plusieurs solutions sont obtenues en parcourant l'arbre de recherche.

Stojkovic et al. (1998) traitent pour la première fois dans la littérature le problème de la gestion des équipages pendant la journée des opérations avec une méthode d'optimisation exacte. Selon leur définition, le problème se pose lorsque des perturbations à l'horaire original empêchent certains membres d'équipage de poursuivre leur horaire tel que planifié. Le problème consiste alors à modifier les horaires des membres du personnel de façon à ce que tous les vols compris dans un horizon prédéfini soient couverts et ce à coût minimal. Les horaires de vols et les itinéraires des avions sont les données d'entrée fixées. Le problème est formulé comme un problème de multiflots non-linéaire et en nombres entiers avec variables de ressource. La résolution utilise la génération de colonnes accompagnée d'une technique de séparation et d'évaluation progressive afin d'obtenir une solution en nombres entiers. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensemble et les sous-problèmes sont des problèmes de plus courts chemins dans un réseau avec ressources. De bons résultats ont été obtenus en peu de temps sur les problèmes tests.

Stojkovic et Soumis (2000) généralisent l'article précédent en considérant plusieurs membres d'équipage par vol. Cette généralisation est nécessaire pour traiter les problèmes d'agents de bord. Le problème est aussi formulé comme un problème de multiflots avec fenêtres de temps et contraintes supplémentaires. Les nouvelles contraintes supplémentaires comprennent des contraintes de même heure de départ. L'approche de résolution est basée sur la génération de colonnes jumelée à une technique de séparation et d'évaluation progressive. Une nouvelle méthode de branchement a été créée pour résoudre efficacement le problème. Lorsque les horaires des vols sont fixés, des problèmes de taille commerciale sont résolus en très peu de temps. Lorsque les horaires de vols sont variables, des solutions de meilleure qualité sont obtenues sur ces mêmes problèmes de taille commerciale dans des temps raisonnables.

Stojkovic et Soumis (2001) proposent par la suite une approche de résolution du problème où les services de vols planifiés pour un groupe de pilotes et les horaires

des vols sont modifiés simultanément tout en maintenant les itinéraires prédéfinis des avions. Le problème est formulé comme un problème de multiflots en nombres entiers avec fenêtres de temps et contraintes supplémentaires. Ces contraintes comprennent, entre autres, les contraintes de préséance des vols imposées afin de préserver les itinéraires d'avion. Ces dernières sont introduites ici pour la première fois. La méthode de résolution est une décomposition de Dantzig-Wolfe accompagnée d'une technique de séparation et d'évaluation progressive permettant d'obtenir une solution entière. De bonnes solutions sur des problèmes de taille réelle ont été obtenues en peu de temps.

Letovsky et al. (2000) proposent un modèle pour la mise à jour des horaires d'équipage. Lors d'un pré-traitement, il fixe une partie de la solution planifiée initiale. Un générateur de rotations d'équipage est développé pour couvrir les vols par les équipages. Le problème est un problème en nombres entiers. Plusieurs stratégies de branchement qui permettent d'avoir des solutions entières sont présentées.

Mise à jour intégrée

Letovsky (1997) présente un modèle qui traite simultanément la gestion des équipages, la mise à jour des horaires d'avion et la gestion des passagers durant le jour des opérations. Le modèle proposé utilise une décomposition de Benders. Le problème est composé d'un problème maître où les vols sont pris en compte, c'est-à-dire s'ils doivent être retardés ou annulés. Les sous-problèmes peuvent être regroupés en trois catégories, le problème de recouvrement pour les équipages, un autre problème de recouvrement pour les avions et un problème de flot qui permet d'avoir des itinéraires pour tous les passagers qui subissent une modification de leurs parcours. Aucun détail d'implémentation ou résultats numériques n'ont été fournis.

Stojkovic et Soumis (2003) présentent un modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour la mise à jour intégrée accompagné d'une interface graphique

pour les perturbations moyennes et majeures. En présence de plusieurs perturbations, le problème est résolu par une approche intégrée en tenant compte en même temps des avions, des équipages et des passagers. Les perturbations sont résolues simultanément tout en minimisant les coûts associés aux avions et les coûts supplémentaires associés aux équipages et aux passagers. Les temps de résolution des différents problèmes sont inférieurs à la minute.

Barnhart et Bratu (2004) ont aussi développé un modèle intégré faisant simultanément la mise à jour des horaires de vols, des itinéraires d'avion, des rotations d'équipage et des routes des passagers. Ils présentent trois variantes du modèle de programmation linéaire en nombres entiers : le premier minimise les coûts d'opérations et les coûts des passagers qui manquent leur connexion, le deuxième minimise les coûts d'opérations et les coûts de retard des passagers et le troisième minimise les coûts d'opérations et les coûts approximatifs de retard des passagers. Les modèles 1 et 3 donnent des solutions en temps réel.

D'une manière générale, le problème des petites perturbations est fréquent pour les compagnies aériennes. Ce problème comporte à la fois un problème combinatoire dans un réseau et de nombreux facteurs difficiles à quantifier. Dans ce mémoire, nous proposons des modèles d'optimisation qui considèrent plus de facteurs que les modèles précédents. Nous produisons plusieurs bonnes solutions devant répondre aux attentes des gestionnaires. Les modèles permettent de faire des modifications simultanément telles que :

- retarder le départ d'un vol,
- annuler un vol,
- modifier les itinéraires des avions en effectuant les échanges d'une partie des horaires planifiées.

Ces modifications sont faites de telle sorte que les coûts supplémentaires engendrés et le nombre de passagers non servis soient minimisés.

CHAPITRE 3 : MODULE PROPOSÉ

Dans ce chapitre, nous présentons le module proposé pour la mise à jour des horaires d'avion. Avant de présenter le problème de façon plus détaillée, définissons le vocabulaire spécifique aux modèles que nous allons développer.

Vol critique : c'est un vol dont l'avion planifié n'est pas disponible à l'heure prévue à cause d'une perturbation.

Avion critique : c'est l'avion planifié pour le vol critique.

Autre vol critique sélectionné : c'est un vol, autre que le vol critique, qui ne peut pas partir à l'heure prévue à cause de l'arrivée tardive de son avion planifié. Les autres vols critiques font partie de l'ensemble des vols sélectionnés si et seulement si leurs avions planifiés sont en retard et atterrissent à l'aéroport considéré dans la période considérée.

Autre avion critique sélectionné : c'est l'avion planifié pour un autre vol critique.

Heure de référence : c'est l'heure à laquelle le gestionnaire de vols commence à traiter les vols critiques.

3.1 Définition du problème

Le problème consiste à mettre à jour les horaires d'avion suite à des perturbations. Voyons maintenant plus de détails sur le problème. Les principales causes de perturbation sont les suivantes :

- problèmes commerciaux tels que passagers en retard de correspondance, vol additionnel en raison d'une augmentation du nombre de passagers ;
- problèmes techniques tels que l'avion a une petite panne technique, l'avion doit subir un contrôle technique non prévu par le constructeur ;
- problèmes d'équipage tels qu'un entraînement de l'équipage non planifié, un membre d'équipage malade ou en retard ;
- problèmes d'aéroport tels qu'un bris de certains équipements de l'aéroport, un aéroport saturé aux heures de pointe, un retard dans le service d'un avion ;
- problèmes de l'ATC (air traffic control) tels que la saturation de l'espace aérien ;
- problèmes météorologiques tels qu'une tempête de neige, un orage violent, etc.

Une pénurie d'avion est le synonyme de l'indisponibilité d'un nombre suffisant d'avions pour compléter tous les départs prévus d'un aéroport dans une période de temps spécifiée. Une pénurie d'avion est la conséquence d'une des perturbations suivantes :

1. un vol arrivant qui est retardé provoque une pénurie d'avion temporaire jusqu'à l'arrivée de l'avion correspondant ;
2. un vol arrivant qui est annulé provoque une pénurie d'avion prolongée, qui nécessite d'habitude l'annulation d'un des vols partant de l'aéroport d'arrivée du vol annulé ;
3. un avion ayant des problèmes mécaniques provoque une pénurie d'avion qui se termine avec le retour en service de l'avion en question.

Sous des contraintes de capacité très serrées qui sont imposées aux compagnies aériennes, chaque retard ou annulation d'un vol peut provoquer des retards et des annulations supplémentaires. Théoriquement, tout problème de ce type peut être résolu en utilisant des avions de surplus. En réalité, il est inacceptable, du point de vue du coût associé, de garder un nombre suffisant d'avions de surplus de telle façon

qu'ils soient toujours disponibles au bon moment et au bon aéroport. Par conséquent, les pénuries d'avion doivent être gérées efficacement afin de garder les retards et les annulations de vol au minimum.

Lorsqu'il y a des vols critiques, il faut réorganiser l'horaire de l'ensemble des avions afin qu'un maximum de vols de la période considérée soient couverts. Ceci s'appelle un problème de mise à jour des horaires d'avion le jour d'opérations. La mise à jour des horaires d'avion suite à une perturbation durant le jour d'opérations est très importante pour une compagnie aérienne. Suite à une mise à jour inadéquate, les performances des compagnies aériennes peuvent devenir désastreuses.

A part les retards et les annulations de vol, l'ensemble d'actions potentielles inclut les substitutions d'avions (même flotte), les échanges d'avions (flotte différente), l'utilisation des avions de surplus de l'aéroport considéré ou des avions de surplus d'un autre aéroport qui doivent être déplacés à l'aéroport considéré (ferry). Suite à une perturbation, le gestionnaire des vols et avions doit alors mettre à jour l'horaire planifié et trouver rapidement une solution réalisable. Etant donné l'horaire des vols planifiés et une ou plusieurs perturbations, la mise à jour des horaires d'avion comprend les actions suivantes :

1. retarder certains vols ;
2. annuler certains vols ;
3. échanger les avions aux vols.

L'objectif du CCO est de trouver une solution minimisant les coûts supplémentaires et permettant un retour rapide au plan initial. Des décisions appropriées, comme la réaffectation d'avion à un autre vol que celui planifié, l'utilisation des avions de surplus (i.e., sans vol planifié), les retards des vols planifiés et les annulations de vol sont autorisés. Différentes politiques de mises à jour peuvent donner différentes

solutions. En comprenant mieux les opérations, les plans et les politiques de mise à jour des horaires d'avion, les compagnies aériennes peuvent améliorer de manière significative leur rendement, réduire leurs coûts d'opération, réduire le nombre de vols annulés et accroître la satisfaction de leur passagers.

Sous des charges de travail très élevées, un temps de réaction très serré et sans outil qui peut les aider, le gestionnaire des vols choisit souvent comme solution les retards, les annulations de vol et les échanges d'avion sans tenir compte des impacts financiers. Les conséquences financières sont donc souvent insatisfaisantes. Ce mémoire propose un système de mise à jour des horaires d'avion, pour aider les gestionnaires à trouver rapidement des solutions faisables de bonne qualité dans les situations réelles caractérisées par l'indisponibilité de quelques avions. Ce système d'aide à la décision pour la mise à jour des horaires d'avion suite à des perturbations fournit aux compagnies aériennes les outils dont elles ont besoin pour établir des nouveaux horaires de façon rentable. Cet outil d'analyse des coûts permet aux planificateurs d'évaluer différentes options ou scénarios. Le gestionnaire des vols a la possibilité de faire exécuter des scénarios complets en mode simulation et de réagir rapidement et efficacement aux perturbations imprévues.

3.2 Fonctionnalité

Suite à une ou plusieurs perturbations qui rendent critiques certains vols, la mise à jour des horaires d'avion doit être faite en temps réel. Les solutions doivent être accessibles très rapidement afin de laisser le temps au gestionnaire des vols de les implanter. Le système d'aide à la décision doit permettre de minimiser les dépenses induites par les perturbations. Bien que la résolution par l'approche globale offre une solution optimale pour la mise à jour des horaires d'avion, nous proposons dans ce

mémoire un système d'aide à la décision offrant rapidement plusieurs solutions pour chacun des vols critiques traités.

Le système d'aide à la décision s'inspire de l'approche manuelle utilisée par les gestionnaires de vol qui consiste à solutionner localement autant que possible le problème de chaque vol critique plutôt que de remettre en question les avions dans le réseau au complet. Pour un vol critique donné, le système fournit au gestionnaire plusieurs bonnes solutions en temps réel dans le but de lui alléger la tâche (le nombre de solutions est un paramètre fixé par l'utilisateur).

Le système d'aide à la décision proposé permet la mise à jour des horaires de vol et d'avion dans le cas où nous sommes en présence de plusieurs vols critiques. Cette mise à jour est effectuée de manière séquentielle soit dans l'ordre chronologique de l'heure de départ des vols critiques, soit dans un ordre défini par l'utilisateur. Les passagers sont pris en considération également. Pour l'ensemble des vols critiques, le système recherche une ou plusieurs solutions pour tous les vols critiques de sorte que les solutions proposées ne soient pas en conflit (i.e., lors de la mise à jour pour solutionner un vol critique, un vol soit affecté à un avion et lors de la mise à jour pour solutionner un deuxième vol critique, ce même vol soit affecté à un autre avion). Une telle solution, lorsqu'elle existe, sera appelée solution compatible. L'utilisateur du système peut intervenir dans la résolution du problème pour effectuer des modifications de paramètres, des règles et des éléments de coûts, avec la possibilité d'interdire la réaffectation de certains vols ou d'imposer des types d'avions qui peuvent être affectés à un vol critique. Dans les modèles que nous allons développer, nous ne considérons qu'un seul aéroport.

3.2.1 Résolution en considérant un seul vol critique à la fois

La résolution se fait en considérant un seul vol critique à la fois. Dans le modèle de base, le problème de chaque vol critique est résolu en partant d'une même situation initiale sans tenir compte du fait qu'il y a d'autres vols critiques. Lorsqu'on traite un vol critique donné, les autres vols critiques sont inclus dans le réseau avec leur heure de départ planifiée. Lors de la résolution du problème d'un vol critique, les solutions obtenues sont analysées et on ne conserve que les solutions qui sont réalisables et compatibles, c'est-à-dire qui ne sont pas en conflit avec les solutions obtenues pour les perturbations précédentes.

Dans une autre version du modèle de base, on ignore les autres vols critiques ainsi que leur avion planifié. Un seul vol critique est donc conservé dans le problème.

Plusieurs solutions réalisables pour chaque vol critique sont générées. Le nombre désiré de solutions est représenté par un paramètre dont la valeur peut être changée par l'utilisateur. Il y a toujours une solution réalisable au problème donné. Une telle solution peut comprendre :

- des avions (vols) avec l'affectation initiale;
- des avions (vols) réaffectés;
- des avions non utilisés;
- des vols non couverts.

Un rapport détaillé est produit pour chaque solution proposée, qui comprend :

- le nombre d'avions réaffectés;
- le nombre d'avions de réserve utilisés;
- le nombre de vols non couverts;
- le nombre de vols retardés;

- le retard de chacun des vols retardés ;
- le retard total ;
- le coût de la solution ;
- le nombre de passagers servis, etc.

3.2.2 Résolution en considérant plusieurs vols critiques à la fois

En réalité, au cours des opérations, plusieurs vols critiques peuvent arriver simultanément. Pour avoir de meilleures solutions, nous devons modifier le premier modèle. Le modèle est modifié de telle manière qu'en résolvant un vol critique donné, on tient compte de la présence d'autres vols critiques. Ces modifications nous permettent de récupérer les autres vols critiques et les avions critiques correspondants dont l'heure d'arrivée est actualisée pour les intégrer dans la solution si cela est possible. Le même rapport détaillé pour chaque solution proposée est fourni.

3.3 Mode d'utilisation

Le système d'aide à la décision peut être utilisé pour mettre à jour le plan en une étape s'il y a peu de perturbations. Il peut aussi être utilisé en plusieurs étapes dans un arbre de décision pour traiter des perturbations plus complexes. Dans ce cas on peut l'utiliser avec d'autres outils. Le mode d'utilisation, présenté à la figure 3.1, montre que plusieurs scénarios peuvent être créés à partir des mêmes données comprenant le plan initial et les perturbations. Un scénario est un plan pouvant contenir des irréalismes suite à des perturbations. Un scénario peut être résolu par des outils différents ou par un même outil avec des valeurs des paramètres différentes. Pour chaque triplet (scénario, outil, paramètres), la solution obtenue, représentée par le

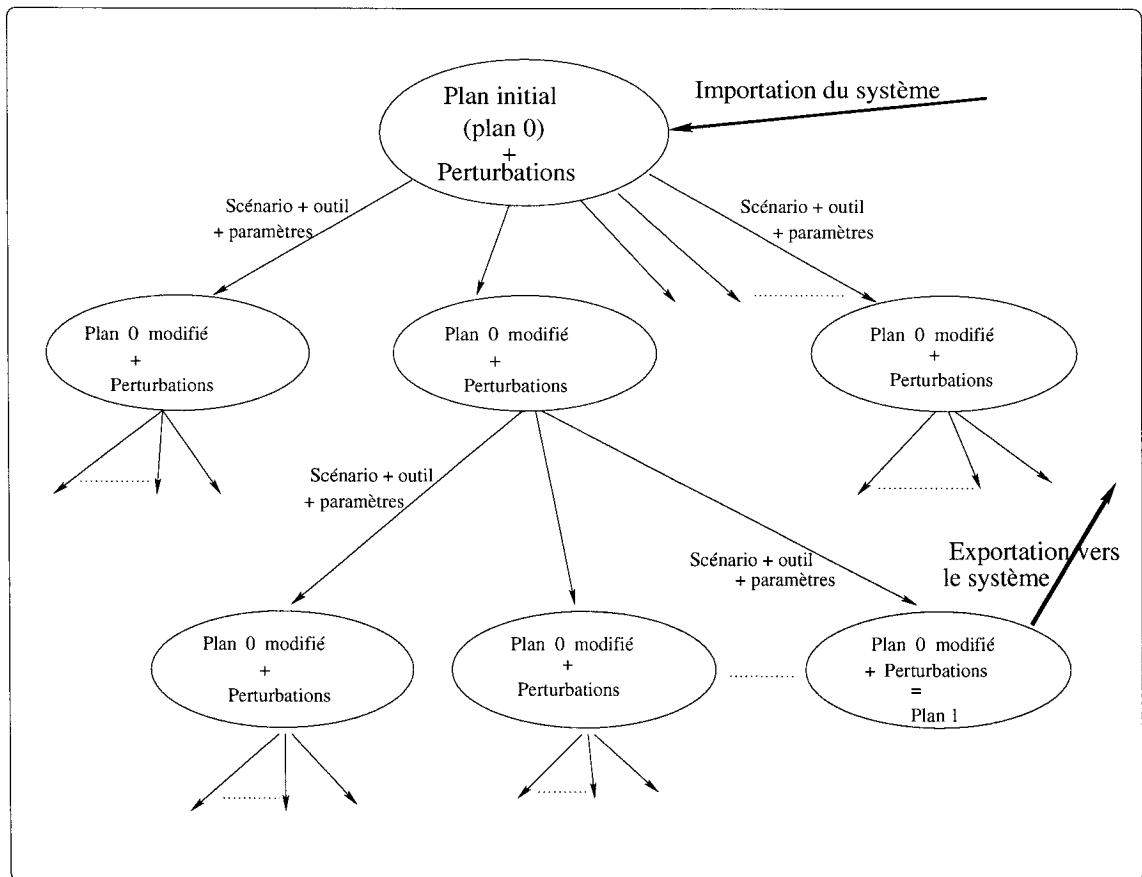


Figure 3.1 – Mode d'utilisation du système

noeud au bout de la branche correspondante, correspond au plan de départ modifié. Un noeud fils peut contenir des perturbations non résolues. A partir d'une solution, il est possible de :

1. Retourner au plan père pour :
 - Résoudre le même scénario
 - Avec un autre outil
 - Avec le même outil et des valeurs des paramètres changées
 - Résoudre un autre scénario en choisissant un triplet (scénario, outils, paramètres).
2. Créer des nouveaux scénarios à partir de la solution obtenue en sélectionnant un triplet (scénario, outil, paramètres) et résoudre ce nouveau problème.
3. Exporter la solution obtenue vers le système. Cette solution deviendra le nouveau plan courant.

3.3.1 Système autonome

Le système d'aide à la décision peut être utilisé comme un système autonome ce qui induit une économie de coûts pour la compagnie aérienne en produisant une mise à jour des horaires de vols et d'avion. Dans ce cas, avec les technologies de l'information actuelles, le système est centralisé au CCO où les décisions de mise à jour des horaires sont prises. Le CCO regroupe et identifie les vols critiques qui interviennent le jour des opérations. Le système d'aide à la décision génère les solutions alternatives qui permettront de réparer les vols critiques. Finalement, les différentes propositions retenues par le gestionnaire des vols seront envoyées dans chaque département pour qu'il puisse s'organiser suite aux différents changements (retard de vol, annulation de vol, échange d'affectation).

3.3.2 Module intégré

Le système d'aide à la décision peut être aussi utilisé comme un module intégré au sein d'un système plus élaboré. Ainsi on pourra communiquer avec les différents modules du système. La communication pourra se faire en fournissant les solutions obtenues aux autres modules qui pourront, par exemple, traiter et résoudre le problème de mise à jour des horaires des pilotes et des membres d'équipage le jour des opérations une fois que la mise à jour des horaires d'avion aura été complétée. Le gestionnaire des vols est alors en mesure d'évaluer les changements aux données et d'en déterminer l'impact suite aux permutations de routes en raison de retards et/ou de conditions météorologiques. Une autre façon d'utiliser le système d'aide à la décision consiste à utiliser à un nœud donné de la figure 3.1, l'approche globale pour résoudre le problème de mise à jour des horaires planifiés. Le gestionnaire des vols peut décider d'améliorer localement cette solution si la mise à jour des avions ne lui convient pas à un aéroport donné. La solution de l'approche globale est utilisée au nœud suivant pour l'aéroport concerné et sert d'input à la résolution avec l'approche locale.

CHAPITRE 4 : MODÈLE D'OPTIMISATION

Dans cette section, nous présentons les modèles mathématiques de Stojkovic (2003) proposés pour la mise à jour des horaires de vols et d'avion. L'auteure n'a pas testé ces modèles. La contribution de ce mémoire est d'en réaliser une implantation informatique efficace, de l'évaluer et d'apporter les améliorations requises. Le problème à résoudre est un problème de k plus courts chemins. Le flot unitaire dans le réseau correspond à une pénurie. Cette modélisation est inspirée par l'approche manuelle utilisée par les opérateurs, qui consiste à acheminer les pénuries à travers le réseau planifié. C'est une approche locale car on ne remet pas en question le réseau au complet et les solutions obtenues de cette manière comprennent un minimum de changements par rapport au plan initial. Dans ces modèles, un réseau contenant un nœud source et un nœud puits est associé à chaque perturbation. Tout chemin du nœud source au nœud puits correspond à une mise à jour des horaires de vols et d'avion. Ce qu'il y a de nouveau dans ce modèle par rapport à ce qui se fait dans la littérature, c'est que nous donnons au gestionnaire des vols un ensemble de solutions alternatives par ordre de coûts décroissants, dans lequel on tient compte des passagers. Ce qui veut dire que les retards des vols sont autorisés afin de servir un maximum de passagers faisant les connexions entre les vols.

Trois modèles seront présentés dans ce mémoire. Le premier modèle de base (Modèle 1) pour un vol critique, le deuxième modèle où une modification sera apportée au modèle de base (Modèle 1') à la section 4.1 et le troisième modèle (Modèle 2) pour plusieurs vols critiques à la section 4.2. Pour chacun des modèles, la notation utilisée dans le modèle sera introduite d'abord, suivie d'une description du réseau sous-jacent. Pour chacun des réseaux, les nœuds, les arcs, la nature du flot et les éléments de la fonction objectif seront présentés en détail. L'algorithme de résolution utilisé pour les deux modèles sera présenté à la section 4.3.

4.1 Modèles 1 et 1' : Un vol critique

Dans le modèle de base (Modèle 1), on ne considère qu'un vol critique à la fois sans tenir compte de l'impact des autres vols critiques. En effet, les autres vols critiques sont pris en compte avec l'heure de départ planifiée, les autres avions critiques aussi. Dans la version modifiée du modèle de base (Modèle 1'), en plus des conditions du Modèle 1, les autres vols critiques ainsi que leur avion planifié ne sont pas pris en considération dans le réseau.

4.1.1 Notation

Nous définissons les différents termes et symboles utilisés dans la suite du chapitre.

- **Période considérée** : période de temps qui commence à l'heure de référence et se termine en fin de journée ou après un certain nombre d'heures défini par l'utilisateur.
- j^c : le vol critique sélectionné.
- J^P : ensemble des vols planifiés sélectionnés. Cet ensemble contient tous les vols dont le départ prévu appartient à la période considérée.
- J^c : ensemble de tous les vols critiques. $J^c \subset J^P$.
- i^c : l'avion critique. C'est l'avion qui devait effectuer le vol critique.
- I : ensemble des avions i .
Cet ensemble comprend les avions au sol à l'heure de référence, les avions qui

arriveront dans la période considérée et ceux qui deviendront disponibles dans la période. L'avion critique peut appartenir à cet ensemble. Pour qu'un avion appartienne à l'ensemble I , il faut que l'heure planifiée de départ de son prochain vol, selon l'itinéraire planifié, soit plus grande ou égale à l'heure planifiée de départ du vol critique.

$I = I^P \cup I^c \cup I^s \cup I^r$, c'est l'ensemble des avions i disponibles à l'aéroport considéré, où :

- I^P est l'ensemble des avions affectés aux vols planifiés de l'ensemble J^P ;
 - I^c est l'ensemble contenant l'avion qui devait effectuer le vol critique j^c , ($|I^c| = 1$) ou ne contenant aucun avion ($|I^c| = 0$) si l'avion critique n'est pas disponible durant la journée considérée ;
 - I^s est l'ensemble des avions de surplus. C'est tout avion sans aucun vol planifié pour le reste de la journée, qui est disponible à l'aéroport donné durant la période considérée. Les avions qui peuvent être transférés d'un autre aéroport (ferry) font partie des avions de surplus ;
 - I^r est l'ensemble des avions qui deviendront disponibles à l'aéroport considéré durant la période considérée suite à des réparations.
- J : ensemble des départs j .
- Cet ensemble comprend le vol critique j^c et tous les vols partant de l'aéroport considéré dont l'avion planifié appartient à l'ensemble I .
- $J = \{j^c\} \cup J^P$: ensemble des vols de départ de l'aéroport considéré où $j^c \in J^c$.
- AP : ensemble des affectations planifiées qui ne sont pas touchées i.e., la planification initiale est toujours faisable
- $AP = \{(i, j) : i \in I^P, j \in J^P\}$.
- t_i : heure de disponibilité de l'avion $i \in I$. C'est l'heure à partir de laquelle l'avion devient disponible. Elle est calculée comme suit :

$t_i = \max(\text{heure de référence ; heure d'atterrissage ou fin de maintenance})$.

- δ : vol qui devait arriver à l'aéroport considéré avec l'avion critique, mais qui est annulé ou arrive en retard.
- t_a : heure d'arrivée du vol δ , le cas échéant.
- t_j^P : heure planifiée de départ du vol $j \in J$.
- t_j^d : dernière heure de départ acceptable pour le vol $j \in J$.
- d_j : constante représentant le retard maximal du vol $j \in J$ (en minutes), $d_j = t_j^d - t_j^P$.
- Δt : unité de retard, exprimée en minutes.
- L_j : ensemble des copies l du vol $j \in J$ où $|L_j| = \lceil \frac{d_j}{\Delta t} \rceil + 1$.
Chaque copie correspond à un départ possible du vol $j \in J$.
- t_l : heure de départ de la copie $l \in L_j$.
L'heure de départ de la première copie correspond à l'heure planifiée de départ ($t_l = t_j^P$). L'espacement entre les heures de départ de deux copies consécutives du vol $j \in J$ est de Δt unités ($t_{l+1} - t_l = \Delta t$), à l'exception des deux dernières copies dont l'espacement peut être plus petit.
- $T_1^c(j_1, j_2)$: durée en dessous de laquelle aucun passager ne peut effectuer la connexion entre le vol j_1 et le vol j_2 .

- $T_2^c(j_1, j_2)$: durée minimale pour que tous les passagers qui doivent effectuer une connexion entre le vol j_1 et le vol j_2 puissent la faire.

Les valeurs de $T_1^c(j_1, j_2)$ et $T_2^c(j_1, j_2)$ sont déterminées en fonction des types des vols j_1 et j_2 (domestique, transfrontalier ou international).

4.1.2 Réseau

Soit $G = (N, V)$ le réseau cyclique utilisé pour résoudre le problème. La figure 4.1 présente un exemple du réseau, constitué d'un ensemble N des nœuds, $|N| = n$ et d'un ensemble V des arcs. Dans cet exemple, nous avons trois avions (i_1^c l'avion critique, i_2^P et i_3^P), leurs vols planifiés (j_1^c le vol critique, j_2^P et j_3^P) et le nœud puits p . Pour chaque vol, il y a des copies de vol espacées de Δt unités de temps. Il y a différents types d'arc : arcs de réaffectation, arcs d'affectation planifiée, arc de fin, arcs de retard, arc d'annulation des vols planifiés et arc d'annulation du vol critique. Le flot d'une unité entre au premier nœud du vol critique et sort au nœud puits.

Nœuds

L'ensemble des nœuds $N = I \cup \left(\bigcup_{j \in J} L_j \right) \cup \{p\}$, est composé des types de nœuds suivants :

- Ensemble I des nœuds du type avion.

Pour chaque avion $i \in I$ un seul nœud est créé. Un nœud-avion correspond à l'avion $i \in I$ qui est disponible à l'heure t_i .

- Ensemble L_j des nœuds du type vol.

Chaque copie $l \in L_j$ du vol de départ $j \in J$ est représentée par un nœud dont l'heure de départ est égale à t_l .

- Puits p .

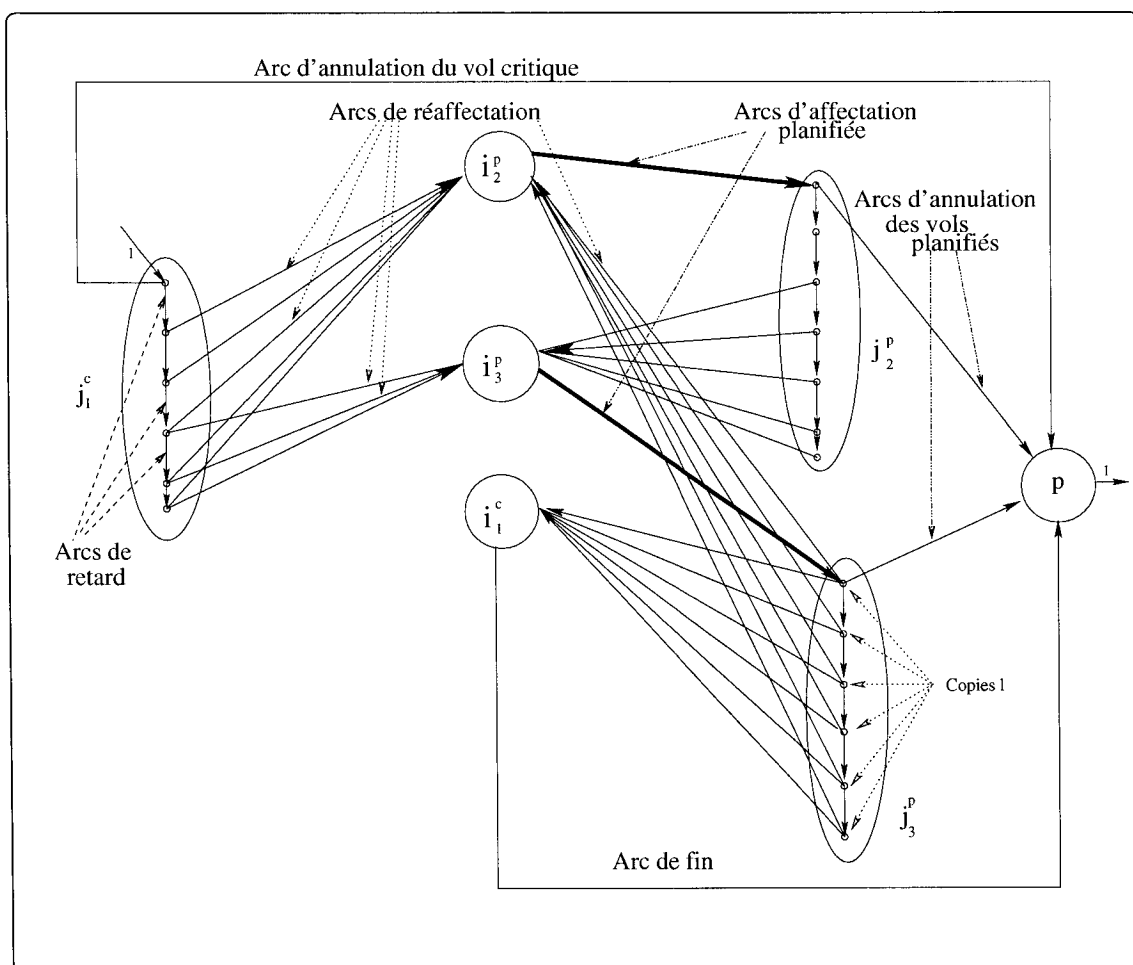


Figure 4.1 – Exemple d'un réseau avec un seul vol critique (vol j_1^c)

Flots externes

Le flot unitaire dans le réseau correspond à une pénurie ; il prend la valeur 1 au premier nœud du vol critique, la valeur -1 au nœud puits et la valeur 0 à tous les autres nœuds du réseau. Les flots externes $b(x)$ sont déterminés en fonction du type du nœud x considéré :

- Flot externe $b(i)$ d'un nœud $i \in I$: $b(i) = 0$.
- Flot externe $b(l)$ de toute copie $l \in L_j, j \in J$:

$$b(l) = \begin{cases} 1 & \text{si } j \in J^c, l \in L_j : t_l = t_j^P, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

- Flot externe $b(p)$: $b(p) = -1$

Arcs

L'ensemble V des arcs, $V = V_{avc} \cup V_{ap} \cup V_{rv} \cup V_{avp} \cup \left(\bigcup_{j \in J} V_r^j \right) \cup V_f$, est composé des types d'arcs suivants.

- **Arc d'annulation du vol critique : ensemble V_{avc}**

$$V_{avc} = \{(l, p) : t_l = t_j^P, l \in L_j, j \in J^c\}, |V_{avc}| = 1.$$

Cet arc permet d'annuler le vol critique.

- **Arcs d'affectation planifié : ensemble V_{ap}**

$$V_{ap} = \{(i, l) : t_l = t_j^P, (i, j) \in AP, i \in I^P, l \in L_j, j \in J^P\}.$$

Tout arc de ce type correspond à une affectation planifiée qui est toujours valide.

- **Arcs de réaffectation d'un vol : ensemble V_{rv}**

$$V_{rv} = \{(l, i) : i \in I, l \in L_j, j \in J\}.$$

Un vol $j \in J$ sera relié à tous les avions qui peuvent le faire (Condition 1), sauf le sien (Condition 2). La dernière copie d'un vol qui sera reliée par un arc de réaffectation à un avion spécifique est celle qui permet de récupérer tous les passagers. L'ensemble des arcs de réaffectation (l, i) , $i \in I$, $j \in J^P$, $l \in L_j$ sera donc créé si les conditions suivantes sont satisfaites :

1. $(t_i + \text{temps minimum de préparation de l'avion } i \text{ pour le vol } j) \leq t_j^d$,
2. $(i, j) \notin AP, \forall j \in J^P$.

Pour chaque vol $j \in J$ satisfaisant les deux conditions précédentes, l'ensemble V_{rv} est défini comme suit $V_{rv} = \{(l, i), \forall l \in L_j : t_{l_1} \leq t_l \leq \max(t_{l_1}, t_{l_2})\}$ où :

$t_{l_1} = \min_{l \in L_j} \{t_l : (t_i + \text{temps minimum de préparation de l'avion } i \text{ pour le vol } j) \leq t_l\}$,
 t_{l_2} est calculé comme suit :

– si δ est en retard

$$t_{l_2} = \begin{cases} \min_{l \in L_j} \{t_l : t_l \geq t_a + T_2^c(\delta, j)\} & \text{si } t_a + T_2^c(\delta, j) \leq t_j^d \\ t_j^d & \text{sinon.} \end{cases}$$

– si δ est annulé ou s'il y a un problème mécanique avec l'avion critique à l'aéroport considéré dans ce cas $t_{l_1} = t_{l_2}$.

– **Arcs d'annulation des vols planifiés : ensemble V_{avp}**

$$V_{avp} = \{(l, p), j \in J^P, l \in L_j : t_l = t_j^P\}.$$

Ce type d'arc permet d'annuler un vol planifié.

– **Arcs de retard du vol $j \in J$: ensemble V_r^j**

$$V_r^j = \{(l, l+1), l \in L_j : t_l \neq t_j^d\}.$$

Ce type d'arc permet de retarder le départ d'un vol.

– **Arcs de fin : ensemble V_f**

$$V_f = \{(i, p), i \in I^r \cup I^s \cup I^c\}.$$

Ce type d'arc permet d'arriver au nœud puits lors de la résolution d'un problème.

La borne supérieure U_{uv} du flot sur tout arc $(u, v) \in V$ est égale à 1, alors que la borne inférieure L_{uv} est égale à 0.

Coûts

Le coût associé aux différentes stratégies (annulation de vol, retard de vol et échange d'avion aux vols) est un élément primordial dans la mise à jour des horaires d'avion. Les coûts détaillés seront présentés plus loin.

L'objectif est de minimiser les pertes de revenus et les dépenses supplémentaires. Les pertes de revenus sont reliées aux passagers non servis du vol j partant à l'heure t_l , $pax_{ns}^j(t_l)$. Les passagers non servis, $pax_{ns}^j(t_l)$, sont divisés en deux catégories :

- $pax_{cm}^{\delta,j}(t_l)$ représente le nombre de passagers qui manqueraient la connexion planifiée du vol δ vers le vol $j \in J^P \cup \{j^c\}$ partant à l'heure t_l .
- $pax_{ab}^j(t_l)$ représente le nombre des autres passagers planifiés sur le vol $j \in J^P \cup \{j^c\}$ qui l'abandonneraient s'il partait à l'heure t_l .

Soit pax_{tp}^j le nombre total de passagers prévus sur le vol j et pax_{tot}^j le total de passagers qui pourraient se présenter au vol j . Soit $pax_{cp}^{\delta,j}$ le nombre prévu de passagers en connexion entre les vols δ et j . Soit c_b^j le cout moyen du billet sur le vol j et c_f^j le coût fixe d'opération du vol j .

Le nombre total de passagers qui pourraient se présenter au vol j , pax_{tot}^j et les passagers qui manqueraient la connexion du vol δ vers le vol j partant à l'heure t_l , $pax_{cm}^{\delta,j}(t_l)$, sont calculés comme suit :

– Cas 1 : δ est annulé

1. $pax_{tot}^j = pax_{tp}^j - pax_{cp}^{\delta,j}$
2. $pax_{cm}^{\delta,j}(t_l) = 0, \forall l \in L_j$

– Cas 2 : δ est en retard

1. $pax_{tot}^j = pax_{tp}^j$
2. $pax_{cm}^{\delta,j}(t_l) = pax_{cp}^{\delta,j} \times (1 - P_{\delta ajl}^r)$, où

P_{ikjl}^r représente la fraction des passagers qui réussissent la connexion entre un vol i arrivant à l'heure t_k et un vol j partant à l'heure t_l . P_{ikjl}^r est calculé comme suit :

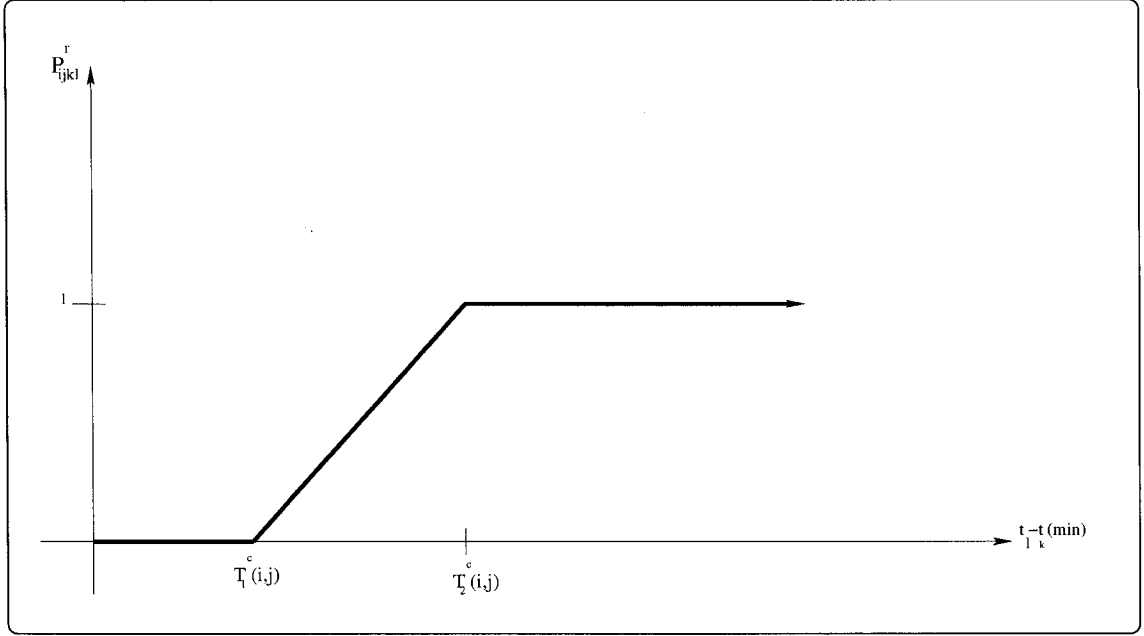


Figure 4.2 – Pourcentage du nombre de passagers pouvant effectuer une connexion en fonction du temps imparti pour la faire

- $P_{ikjl}^r = 1$ si la connexion (i, j) est faite par le même avion.
- Pour toute autre connexion (i, j) , la valeur de P_{ikjl}^r se calcule à l'aide d'une fonction croissante telle qu'illustrée à la figure 4.2

$$P_{ikjl}^r = \begin{cases} 1 & \text{si } t_l - t_k \geq T_2^c(i, j), \\ f(t_l - t_k - T_2^c(i, j)) & \text{si } T_1^c(i, j) \leq t_l - t_k < T_2^c(i, j), \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

- Cas 3 : Problème mécanique avec l'avion critique à l'aéroport considéré

1. $pac_{tot}^j = pac_{tp}^j$,
2. $pac_{cm}^{\delta, j}(t_l) = 0, \forall l \in L_j$.

Le coût associé à un arc est calculé selon le type d'arc :

1. Coût associé aux arcs $(i, l) \in V_{ap} : c_{(i,l)} = 0$.

Ces arcs sont construits uniquement pour rendre possibles les réaffectations des vols non touchés.

2. Coût associé aux arcs $(l, l+1) \in V_r^j : c_{(l,l+1)} = 0$.

3. Coût associé aux arcs $(i, p) \in V_f : c_{(i,p)} = 0$.

4. Coût associé aux arcs $(l, p) \in V_{avc} \cup V_{avp} : c_{(l,p)} = \text{pax}_{ns}^j(t_j^P) \times c_b^j - c_f^j$
où $\text{pax}_{ns}^j(t_j^P) = \text{pax}_{tot}^j - \text{pax}_{cm}^{(\delta,j)}(t_j^P)$.

Ce coût correspond à la perte de revenu liée aux passagers non servis suite à l'annulation d'un vol.

5. Coût associé aux arcs $(l, i) \in V_{rv}$. C'est la somme des éléments suivants :

- Pénalité de réaffectation pour inciter l'optimiseur à préserver autant que possible les affectations planifiées ;
- Coût de remorquage si le type de vol (domestique, transfrontalier, international) auquel l'avion est affecté ne correspond pas au type prévu, sa valeur dépend du type d'avion ;
- Pertes de revenu $= \text{pax}_{ns}^j(t_l) \times c_b^j$
 $\text{pax}_{ns}^j(t_l) = \text{pax}_{cm}^{\delta,j}(t_l) + \text{pax}_{ab}^j(t_l)$,
 où $\text{pax}_{cm}^{\delta,j}(t_l)$ est calculé selon le cas correspondant (Cas 1-3),
 $\text{pax}_{ab}^j(t_l) = (\text{pax}_{tp}^j - \text{pax}_{cp}^{\delta,j}) \times f_j(t_l)$,
 où $f_j(t_l)$ représente le taux d'abandon du vol j lorsqu'il part à l'heure t_l . Le taux d'abandon est un paramètre du modèle.

4.2 Modèle 2 : Plusieurs vols critiques

Afin d'avoir un modèle plus complet, couvrir plus de vols et mieux utiliser les ressources disponibles, nous avons ajouté dans le réseau les autres avions critiques et les autres vols critiques. Les autres avions critiques sont pris en compte avec leur heure d'arrivée actualisée. Ceci dans le but de voir si on peut affecter d'autres vols à ces avions et ainsi récupérer les autres vols critiques. Dans ce cas, le réseau est modifié et la fonction objectif aussi pour inciter le modèle à résoudre non seulement le vol critique donné mais aussi les autres vols critiques dans la mesure du possible.

4.2.1 Notation

Les définitions suivantes sont nécessaires pour l'élaboration du modèle.

$J^{ac} \subset J^P$: ensemble des autres vols critiques sélectionnés.

$I^{ac} \subset I^P$: ensemble des autres avions critiques sélectionnés.

Ω : ensemble des vols ω qui arrivent à l'aéroport considéré en retard avec les autres avions critiques I^{ac} , $|\Omega| \geq 1$.

t_{ω}^i : heure d'arrivée du vol $\omega \in \Omega$ effectué par un autre avion critique $i \in I^{ac}$.

$AP^c \subset AP$: ensemble des affectations critiques, soit les affectations planifiées entre les autres avions et les vols critiques, $AP^c = \{(i, j) \in AP : i \in I^{ac}, j \in J^{ac}\}$.

4.2.2 Réseau

Soit $G = (N, V)$ le réseau cyclique de la figure 4.3, constitué d'un ensemble N de nœuds, $|N| = n$ et d'un ensemble V d'arcs. Tous les arcs du réseau de la figure 4.3 sont construits comme dans le cas d'un seul vol critique à l'exception des arcs de réaffectation où certains changements doivent être apportés pour tenir compte de la présence des arrivées tardives autres que δ . Il faut noter que lors de la construction des arcs d'affectation planifiée V_{ap} , les affectations critiques seront traitées de la même façon que les affectations planifiées qui sont toujours valides. Dans cet exemple, nous avons quatre avions (i_1^c l'avion critique, i_2^P , i_3^P et i_4^c l'autre avion critique), leurs vols planifiés (j_1^c le vol critique, j_2^P , j_3^P et j_4^c l'autre vol critique) et le nœud puits p . L'autre avion critique est arrivé à l'aéroport à 17h25. Il ne peut plus effectuer son vol planifié j_4^c dont la première copie est à 16h45. Néanmoins, il peut effectuer certaines copies des vols j_1^c , j_2^P et j_3^P .

Nœuds

L'ensemble des nœuds N comprend les mêmes nœuds que ceux de la section 4.1 plus les nœuds représentant les autres avions critiques et les autres vols critiques sélectionnés. Dans ce cas, chaque autre avion critique est pris avec son heure d'arrivée actualisée.

Flots externes

Les flots externes sont déterminés de la même façon qu'à la section 4.1.

Arcs

L'ensemble V des arcs est le même que celui de la section 4.1 à la différence que les

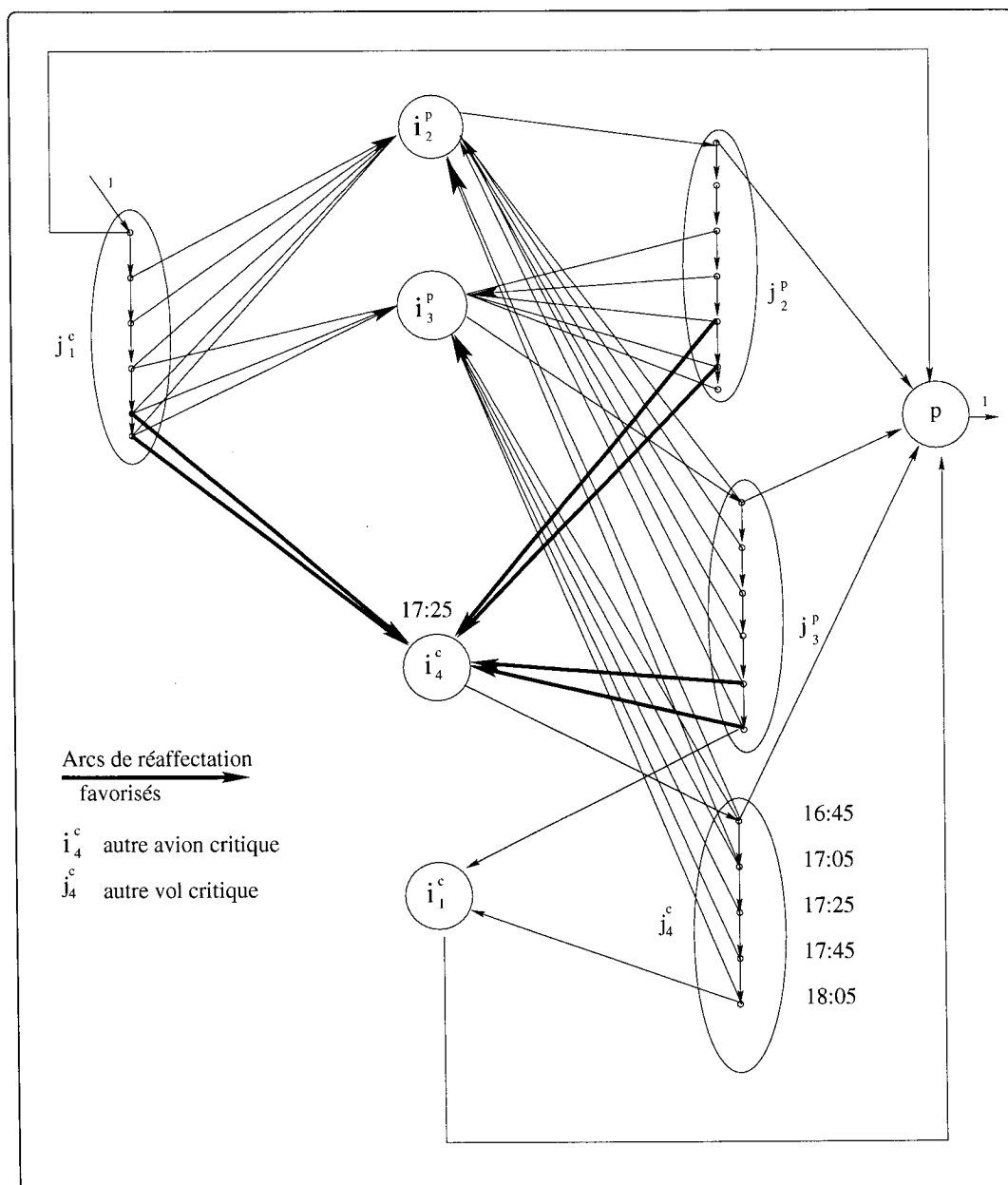


Figure 4.3 – Exemple d'un réseau avec un autre vol critique (vol j_4^c)

arcs de réaffectation sont modifiés pour permettre la prise en compte des passagers provenant des arrivées tardives.

Arcs de réaffectation d'un vol : ensemble V_{rv}

Comme dans le cas d'un seul vol critique, un vol $j \in J$ sera relié à tous les avions qui peuvent le faire (Condition 1), sauf le sien (Condition 2). La dernière copie d'un vol qui sera reliée par un arc de réaffectation à un avion spécifique est celle qui permet de récupérer tous les passagers. Les deux conditions restent comme avant. Notons $t_j^{AllConnPax}$ l'heure de départ du vol j qui permettrait de récupérer tous les passagers provenant des arrivées tardives. Pour chaque vol $j \in J$ satisfaisant les deux conditions précédentes, l'ensemble V_{rv} est défini comme suit :

$$V_{rv} = \{(l, i), \forall l \in L_j : t_{l_1} \leq t_l \leq \max(t_{l_1}, t_{l_2})\} \text{ où}$$

$$t_{l_1} = \min_{l \in L_j} \{t_l : (t_i + \text{temps minimum de préparation de l'avion } i \text{ pour le vol } j) \leq t_l\}$$

$$t_{l_2} = \begin{cases} \min_{l \in L_j} \{t_l : t_l \geq t_j^{AllConnPax}\} & \text{si } t_j^d \geq t_j^{AllConnPax} \\ t_j^d & \text{sinon.} \end{cases}$$

$t_j^{AllConnPax}$ est calculé de la façon suivante :

– si δ est en retard

$$t_j^{AllConnPax} = \max\{t_a + T_2^c(\delta, j), \max_{\omega \in \Omega} (t_\omega^i + T_2^c(\omega, j))\}$$

– si δ est annulé ou il y a un problème mécanique avec l'avion critique à l'aéroport considéré

$$t_j^{AllConnPax} = \max_{\omega \in \Omega} \{t_\omega^i + T_2^c(\omega, j)\}.$$

Coûts

Dans un premier temps, le coût $c_{l,i}$ pour chaque arc (l, i) est calculé comme dans le cas d'un seul vol critique, en tenant compte des modifications présentées dans

les paragraphes précédents. Ensuite les coûts sur les arcs de réaffectation des autres avions critiques I^{ac} , soit les arcs $(l, i) \in V_{rv}, l \in L_j, i \in I^{ac}$, seront modifiés afin de tenir compte des gains potentiels à cause des réaffectations des autres avions critiques. Le gain associé à la réaffectation de l'avion $i \in I^{ac}$ à un vol j tel que $(i, j) \notin AP^c$ correspond à la perte de revenu si le vol j partait avec son avion planifié i .

Pour chaque $(i, j) \in AP^c$, soit $\Delta_{i,j}$ la perte de revenu si le vol j partait avec son avion planifié i qui arrive en retard, tout en respectant le temps minimum de préparation de l'avion i pour le vol j . Le vol j peut donc partir au plus tôt à l'heure $t_l^{min} = \min\{t_l : t_l \geq t_\omega^i + \text{temps minimum de préparation de l'avion } i \text{ pour le vol } j\}$. Etant donné que tous les passagers en connexion entre le vol ω arrivant avec l'avion $i \in I^{ac}$ et le vol j sont récupérés, la perte de revenu ne correspond donc qu'aux passagers qui abandonneraient le vol j s'il partait à l'heure t_l^{min} . La perte de revenus est calculée de la façon suivante :

$$\Delta_{i,j} = pax_{ns}^j \times c_b^j, \text{ où}$$

$$pax_{ns}^j = pax_{ab}^j(t_l^{min}) = (pax_{tp}^j - pax_{cp}^{\omega,j}) \times f_j(t_l^{min}).$$

Le coût modifié est calculé pour tous les arcs $(l, i) \in V_{rv}, l \in L_j, j \in J, i \in I^{ac}$. Si $c_{l,i}$ représente le coût sur un arc $(l, i) \in V_{rv}, l \in L_j, j \in J, i \in I^{ac}$, son coût modifié $c'_{l,i}$ est calculé de la façon suivante :

$$c'_{l,i} = c_{l,i} - \Delta_{i,j}.$$

Tous les coûts $c'_{l,i}$ négatifs sont ordonnés par ordre non décroissant et on attribuent la valeur zéro au plus petit coût, la valeur 1 au coût suivant et ainsi de suite. Soit $n_{l,i}$ la valeur attribuée à l'arc (l, i) . Les coûts $c''_{l,i}$ sur les arcs $(l, i) \in V_{rv}, l \in L_j, i \in I^{ac}$ prennent donc les valeurs suivantes :

$$c''_{l,i} = \begin{cases} c'_{l,i} & \text{si } c_{l,i} - \Delta_{i,j} \geq 0 \\ n_{l,i} & \text{sinon.} \end{cases}$$

Cette modification rend les coûts non négatifs et ne change pas l'ordre des coûts car les coûts positifs sont en dollars et sont beaucoup plus grand que cent.

4.3 Algorithme de résolution : K plus courts chemins

Afin de fournir plusieurs solutions alternatives à la mise à jour des horaires d'avion, nous nous devons de trouver un algorithme pour résoudre le problème. L'algorithme de Yen (1971) sera utilisé pour trouver les K plus courts chemins acycliques entre un nœud source s et un nœud puits p dans un réseau donné. A chaque itération, l'algorithme de Dijkstra modifié sera utilisé pour trouver le plus court chemin entre la source s et le puits p (la source et le puits sont choisis pour chacune des itérations). L'algorithme de Dijkstra sera modifié pour traiter des problèmes pouvant contenir certains arcs de coût négatif. En effet, l'algorithme de Dijkstra de base n'est utilisable que lorsque les arcs ont un coût positif. Or, dans notre situation, certains arcs d'annulation de vol peuvent avoir des coûts négatifs. Cet algorithme sera expliqué plus loin dans cette section.

Soit $G = (N, V)$ un réseau constitué d'un ensemble de nœuds $N = \{v_1, \dots, v_n\}$ et d'un ensemble d'arcs $V = \{a_1, \dots, a_m\} \subset N \times N$. Chaque arc a_k est représenté par (v_i, v_j) avec $v_i \neq v_j$. Soient i et j deux nœuds de G . Un chemin q de i à j dans G est une séquence de la forme $q = \langle i = v'_1, v'_2, \dots, j = v'_l \rangle$ telle que : $v'_k \in N, \forall k \in \{1, \dots, l\}$; soit Q_{ij} l'ensemble des chemins dans G allant du nœud i au nœud j . Étant donnés deux nœuds x et y du chemin $q \in Q_{ij}$, un élément $g \in P_{x,y}$ est un sous-chemin de q s'il coïncide avec q de x , jusqu'à y . Nous définissons ce chemin par $sub_q(x, y)$. Soit c_{ij} le coût de l'arc $(i, j) \in V$. Soit $c(q)$ le coût du chemin q .

$$c(q) = \sum_{(x,y) \in q} c_{xy}.$$

La concaténation de deux chemins, $q \in Q_{ij}$ et $g \in Q_{jl}$, notée par $q \diamond g$, est le chemin allant de i à l , formé par le chemin q et suivi par g .

Soit $q_k = \langle s = v_1^k, v_2^k, \dots, v_{l_k}^k = p \rangle$, le k^e plus court chemin sans cycle allant du nœud source s au nœud puits p , $k \in \{1, \dots, K\}$. Soit Q l'ensemble Q_{sp} . Soit $Q_K = \{q_1, \dots, q_K\} \subseteq Q$ l'ensemble de chemins, tel que : $c(q_k) \leq c(q_{k+1}), \forall k \in \{1, \dots, K-1\}$.

Soit q_1 un chemin allant de s à p dans G . Considérons un autre chemin q_2 allant de s à t . q_2 coïncide avec le chemin q_1 du nœud s , jusqu'à un certain nœud (qui peut être le nœud s), où il dévie de ce chemin. Ce nœud sera noté $d(q_2)$. C'est le nœud où q_2 dévie du chemin q_1 . Étant donné un chemin q , le nœud $d(q)$ est appelé déviation de q .

L'algorithme de Yen, est un algorithme de déviation. Les K plus courts chemins sont trouvés par un algorithme itératif. On calcule d'abord le plus court chemin. Pour obtenir les plus courts chemins suivants, on calcule d'autres plus courts chemins en interdisant un à un les arcs des chemins précédemment retenus. L'algorithme de Yen, propose une gestion des ensembles de chemins générés, permettant de choisir facilement le plus court chemin suivant.

Soient liste A la liste où les plus courts chemins sont stockés et liste B la liste des chemins candidats.

Première itération

On détermine un plus court chemin q_1 par l'algorithme de Dijkstra modifié. Cet algorithme trouve aussi les autres chemins de même longueur.

Si on trouve à cette itération un nombre de plus courts chemins supérieur ou égal à K , l'algorithme s'arrête.

Si on trouve un nombre de chemins inférieur à K

- on affecte à q_1 arbitrairement un de ces chemins et on le conserve dans une liste A .
- on conserve au plus K chemins dans une liste B .

Itération k : ($k = 2, 3, \dots, K$)

A cette itération, les plus courts chemins $q_1, q_2, \dots, q_{k-1}$ sont supposés déjà trouvés et stockés dans la liste A . $q_k = \langle s = v_1^k, v_2^k, \dots, v_{l_k}^k = p \rangle$ va être déterminé comme suit :

- I) Pour $i = 1, 2, \dots, l_{k-1} - 1$
 - (a) Si le sous-chemin constitué des i premiers nœuds de q_{k-1} coïncide avec le sous-chemin constitué des i premiers nœuds d'un q_j avec $j \in \{1, 2, \dots, k-1\}$ alors $d_{v_i^{k-1}t} := \infty$ où t est le $(i+1)^{ieme}$ nœud de q_j .
Cette modification est valable pour l'itération k seulement, à la prochaine itération d_{it} reprend sa valeur originale.
 - (b) Appliquer l'algorithme de Dijkstra modifié pour trouver le plus court chemin g à partir du nœud (i) jusqu'au nœud (p) qui ne contient aucun nœud qui figure déjà dans la première partie, $g \in Q_{v_i^k p}$. S'il y a plusieurs plus courts chemins de coût minimum on les traite l'un après l'autre.
 - (c) Concaténer $subq_k(s, v_i^k)$ et g ; $q = subq_k(s, v_i^k) \diamond g$ ensuite ajouter g à la liste B tant que : $|B| \leq K - k + 1$.
- II) Trouver dans la liste B le chemin de plus courte distance. Si la somme des nombres de chemins trouvés à cette itération et de ceux qui sont déjà dans la liste A est égale à K , arrêter l'algorithme. Sinon prendre arbitrairement un des chemins trouvés et le mettre dans la liste A et mettre les autres dans la liste B . Aller à l'itération $k+1$.

Un exemple de calcul de quatre plus courts chemins à l'aide de l'algorithme de Yen est donné à la section A.2, de l'annexe A.

Le réseau correspondant contient un seul type d'arcs qui pourraient avoir des coûts négatifs. Il s'agit des arcs d'annulation (ensembles V_{avc} et V_{avp}). En effet, le coût d'annulation d'un vol est négatif si le vol est non profitable. L'algorithme de Dijkstra (complexité : $O(n^2)$) sera modifié pour résoudre le problème de plus court chemin

dans un réseau avec des arcs de coût négatif menant au puits. Même si le réseau est cyclique, ces arcs de coût négatif ne peuvent faire partie d'aucun cycle car ils mènent au puits. L'étiquette du puits ne peut pas devenir permanente avant que l'étiquette de tous les nœuds soit permanente.

Soit

- s : nœud source qui correspond à la première copie du vol critique ($l \in L_j : t_l = t_j^P, j \in J^c$);
- p : nœud puits;
- $A(u) = \{(u, v) \in N \times N : v \in \Gamma(u)\}$: ensemble des arcs du réseau sortant du nœud u ;
- S : ensemble des nœuds dont l'étiquette est permanente;
- $\underline{S}$: ensemble des nœuds dont l'étiquette est temporaire;
- $d(u)$: étiquette associée au nœud u qui représente la distance entre le nœud source s et le nœud u (la borne supérieure sur le plus court chemin de s à u);
- $Pred(u)$: ensemble des nœuds immédiatement avant le nœud u sur un plus court chemin du nœud s au nœud u . S'il y a plusieurs plus courts chemins de s à u , $Pred(u)$ peut contenir plusieurs nœuds.

L'algorithme de Dijkstra modifié est présenté à l'algorithme 4.1. L'algorithme de Dijkstra a été modifié pour permettre de traiter les arcs de coût négatif menant au nœud puits et pour trouver tous les plus courts chemins ayant le même coût. On note que le nœud puits p n'est pas pris en considération quand on choisit le prochain nœud à traiter. Une fois que l'exécution de l'algorithme est terminée, du nœud p , nous reconstituons les plus courts chemins grâce à $Pred(p)$ jusqu'au nœud source.

Un exemple de calcul des plus courts chemins à l'aide de l'algorithme de Dijkstra modifié est donné à la section A.1, de l'annexe A.

Algorithme 4.1 Dijkstra modifié

```

 $S \leftarrow \emptyset$ 
 $\underline{S} \leftarrow N \setminus \{p\}$ 
pour tout  $u \in N$  effectuer
   $d(u) \leftarrow \infty$ 
 $d(s) \leftarrow 0$ 
 $Pred(s) = \emptyset$ 
tant que  $|\underline{S}| > 0$  effectuer
  soit  $u \in \underline{S}$  tel que  $d(u) = \min\{d(v) : v \in \underline{S}\}$ 
   $S \leftarrow S \cup \{u\}$ 
   $\underline{S} \leftarrow \underline{S} \setminus \{u\}$ 
  pour tout  $(u, v) \in A(u)$  effectuer
    si  $d(v) > d(u) + c_{uv}$  alors
       $d(v) = d(u) + c_{uv}$ 
       $Pred(v) \leftarrow \{u\}$ 
    si  $d(v) = d(u) + c_{uv}$  alors
       $Pred(v) \leftarrow Pred(v) \cup \{u\}$ 
   $S \leftarrow S \cup \{p\}$ 

```

4.4 Résolution du problème

Le gestionnaire des vols est informé que n vols arrivants dans un aéroport donné sont retardés à cause d'une intempérie. Cette information est mise dans un fichier et le système détermine l'ensemble des vols critiques et l'ensemble des autres vols critiques dans le cas du Modèle 2. Les vols critiques sont triés par ordre croissant de leur heure de départ. La résolution du problème se fait séquentiellement un vol critique à la fois.

Pour le Modèle 1, les autres vols critiques sont pris en compte dans le réseau avec leur heure de départ planifiée et les autres avions critiques avec leur heure d'arrivée planifiée. Pour le Modèle 1', les autres vols critiques et les autres avions critiques sont enlevés du réseau. Pour le Modèle 2, les autres vols critiques sont pris en compte avec leur heure de départ planifiée et les autres avions critiques avec leur heure d'arrivée actualisée.

Soit T_j l'ensemble de solutions réalisables, T^j l'ensemble des solutions réalisables et compatibles (i. e. pour une solution donnée il n'y a pas de conflit) Nous disposons d'une liste ordonnée de n vols critiques. Nous traitons le premier vol critique et nous obtenons un ensemble T_1 de K solutions réalisables qui est aussi l'ensemble T^1 . L'ensemble T^j est défini de façon itérative, considérons que T^{j-1} est défini. Pour le j^{eme} vol critique ($1 < j \leq n$) un ensemble T_j de K solutions réalisables est calculé. Soit W l'ensemble des solutions globales, $W = T^{j-1} \cup T_j$. W contient des solutions compatibles et non compatibles. Le système fournit le plus grand des sous ensembles de W contenant toutes les solutions réalisables et compatibles qui est l'ensemble T^j .

CHAPITRE 5 : EXPÉRIMENTATION

Dans les chapitres précédents, nous avons décrit trois modèles de mise à jour des horaires d'avion pendant le jour d'opération. Le modèle de base (Modèle 1) considère un seul vol critique. Par la suite, nous avons modifié le modèle de base où les autres vols critiques ainsi que leur avion planifié ne sont pas pris en compte dans le réseau (Modèle 1'). Enfin, nous avons ajouté des améliorations à notre modèle de base afin d'obtenir de meilleures solutions. Dans ce modèle amélioré (Modèle 2), nous gardons dans le réseau les autres vols critiques avec leurs heures de départ planifiées et leurs avions planifiés avec leurs heures d'arrivée actualisées. La fonction objectif est modifiée pour favoriser la résolution de plusieurs perturbations simultanément. Nous devons maintenant effectuer des tests pour voir si tous les objectifs ont été atteints. Mentionnons que les tests ont été réalisés sur une machine SUN ayant les caractéristiques ci-après : 4 CPUs ultrasparc à 900MHz, 8GB de mémoire ; un seul CPU a été utilisé. Les tests ont été effectués sur des données réelles provenant d'une compagnie aérienne.

5.1 Données du problème

Le scénario choisi représente une situation typique se produisant régulièrement pendant la saison hivernale. Une tempête de neige de forte intensité s'abat sur la côte Est de l'Amérique du Nord le 24 janvier 2001 à l'heure de pointe de l'après-midi. Six vols à destination de Toronto, en provenance des aéroports Boston, Newark et Lagaardia sont affectés par cette tempête. La stabilisation de la situation est prévue à 19h 59 le même jour, ce qui correspond à la fin de la période de perturbation. Ces six vols arrivant en retard à Toronto rendent critiques les six vols suivants que devaient effectuer

Tableau 5.1 – Perturbations

N°	Vol perturbé	ETA	Retard (min)	ETAR	Vol critique	ETD	Tps conn. (min)	Tps mini conn. (min)
1	0717_LGA	16 :44	50	17 :34	0462_YYZ	18 :04	30	80
2	0825_BOS	17 :08	40	17 :48	0486_YYZ	18 :30	42	80
3	0739_EWR	17 :53	45	18 :38	0697_YYZ	18 :35	-3	40
4	0719_LGA	17 :49	60	18 :49	3553_YYZ	19 :30	41	80
5	0807_BOS	19 :03	30	19 :33	0922_YYZ	19 :55	22	45
6	0721_LGA	18 :50	60	19 :50	0568_YYZ	19 :55	5	40

ces avions et créent six problèmes à corriger. Le tableau 5.1 présente les différentes caractéristiques des problèmes triés par ordre croissant de l'heure de départ planifiée des vols critiques. Le numéro de la perturbation est indiqué dans la première colonne du tableau. La deuxième colonne indique le numéro du vol perturbé, la troisième colonne indique l'heure d'arrivée prévue (ETA) du vol perturbé à Toronto alors que la quatrième colonne fournit la durée du retard du vol perturbé. La cinquième colonne indique l'heure d'arrivée actualisée (ETAR) du vol perturbé, la sixième colonne indique le numéro du vol critique qui est le vol qui suit le vol perturbé dans l'itinéraire de l'avion. La septième colonne indique l'heure de départ prévue (ETD) du vol critique. Nous nous servirons de ces heures pour définir la période de perturbation. La huitième colonne indique le temps de connexion actuel, i.e., la différence entre l'heure d'arrivée actualisée du vol perturbé et l'heure de départ planifiée du vol critique. La dernière colonne indique le temps minimum de connexion pour que le vol puisse être fait. Les six problèmes sont résolus successivement par ordre présenté dans le tableau 5.1. Lors de la résolution d'un problème, les vols précédemment perturbés sont inclus dans le problème.

Tableau 5.2 – Données d’entrée

Période de perturbation	2002-01-24 18 :00 à 2002-01-24 19 :59							
Modèle	1 et 2	Opti	1’					
N° de la perturbation	1 à 6	1 à 6	1	2	3	4	5	6
Nombre de vols op.	39	94	34	34	34	34	34	34
Nombre d’avions	44	79	39	39	39	39	39	39
Nombre de passagers	3388	3388	2985	3017	2959	2985	3020	2985
Nombre correspondance	358	358	318	321	320	318	340	318

Le tableau 5.2 fournit les renseignements suivants sur les données d’entrée pour chaque problème : la période de perturbation qui est la même pour tous les modèles, le modèle utilisé, le numéro de la perturbation, le nombre de vols opérationnels qui est le nombre de vols dont l’heure de départ est comprise dans la période de perturbation, le nombre d’avions qui correspond au nombre d’avions planifiés pour les vols opérationnels plus les avions au sol sans aucun vol durant la journée, le nombre total de passagers sur les vols opérationnels et le nombre de passagers en connexion. Les données d’entrée sont les mêmes pour les Modèles 1 et 2. L’optimiseur est le module AircraftRecovery qui a été développé pour les grandes perturbations et utilise une approche globale (Stojkovic et Soumis 2003). Dans le reste du mémoire, ce module sera appelé l’optimiseur. Pour l’optimiseur, le nombre de vols opérationnels et le nombre d’avions sont différents car il prend en compte les vols arrivants pendant la période de perturbation ainsi que leurs avions planifiés. Il est à noter que pour le Modèle 1’ le nombre d’avions critiques et le nombre de vols opérationnels est le même pour toutes les perturbations car on ne prend pas en considération les autres vols critiques ainsi que les autres avions critiques.

Les tableaux 5.3 et 5.4 fournissent une synthèse des solutions obtenues par les différents modèles. La première colonne indique le numéro de la perturbation. La deuxième

colonne indique le modèle utilisé. La troisième colonne indique le type de solution recherchée : Opt pour la solution obtenue au premier plus court chemin, R-C pour la solution réalisable et compatible, Opti pour la solution identique à celle de l'optimiseur. La quatrième colonne indique le nombre de plus courts chemins qu'il a fallu générer pour avoir le type de solution recherchée. la cinquième colonne indique le nombre de vols réaffectés (i.e., vol ayant été affecté à un autre avion que celui planifié). La sixième colonne indique le nombre de vols critiques qui ont pu être récupérés. La septième colonne indique le nombre de vols annulés. La huitième colonne indique le nombre de vols retardés. La neuvième colonne indique le retard moyen des vols retardés et la dernière colonne indique le nombre total de passagers non servis. On constate qu'il y a des lignes vides dans ces tableaux pour le Modèle 1', parce que ce Modèle n'arrive pas à trouver le type de solution recherchée.

Les tableaux 5.5 et 5.6 fournissent aussi une synthèse des performances des solutions obtenues par les différents modèles. La première colonne indique le numéro de la perturbation. La deuxième colonne indique le modèle utilisé. La troisième colonne indique le type de solution recherchée où le modèle O désigne l'optimiseur. La quatrième colonne indique les temps nécessaires pour lire les différentes bases de données et construire le réseau. La cinquième colonne indique le temps pour calculer les plus courts chemins. La sixième colonne fournit le temps nécessaire pour évaluer la compatibilité et la dernière colonne donne le temps global pour la résolution du problème.

Pour les Modèles 1 et 1', la résolution se fait séquentiellement du premier vol critique au sixième vol critique. Les temps de calcul pour chaque perturbation sont inférieurs à deux secondes jusqu'à la quatrième perturbation. Pour le Modèle 2, la résolution se fait en une seule fois car il y a la présence des autres vols critiques. Les temps de calcul sont inférieur à huit secondes. En pratique le gestionnaire de vols recherche des solutions réalisables et compatibles, nous avons intégré les solutions Opti pour fin d'étude.

Tableau 5.3 – Récapitulatif : qualité de la solution

P	M	Type	K	Vols réaffectés	Vols critiques récupérés	Vols annulés	Vols retardés	Retard moyen (min)	Pax non servis
1	1	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	1	1	0	0	0	0
		Opti	1	1	1	0	0	0	0
	1'	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	1	1	0	0	0	0
		Opti	1	1	1	0	0	0	0
	2	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	1	1	0	0	0	0
		Opti	1	1	1	0	0	0	0
2	1	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	2	2	0	0	0	0
		Opti	1	2	2	0	0	0	0
	1'	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	2	2	0	0	0	0
		Opti	1	2	2	0	0	0	0
	2	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	1	2	2	0	0	0	0
		Opti	1	2	2	0	0	0	0
3	1	Opt	1	3	1	0	0	0	0
		R - C	3	4	3	0	0	0	0
		Opti	9	4	3	0	0	0	0
	1'	Opt	1	3	1	0	0	0	0
		R - C	24	7	3	0	0	0	0
		Opti							
	2	Opt	1	3	2	0	0	0	0
		R - C	1	4	3	0	0	0	0
		Opti	1	4	3	0	0	0	0

Tableau 5.4 – Récapitulatif : qualité de la solution (suite)

P	M	Type	K	Vols réaffectés	Vols critiques récupérés	Vols annulés	Vols retardés	Retard moyen (min)	Pax non servis
4	1	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	7	8	4	1	0	0	8
		Opti	45	6	4	0	0	0	0
	1'	Opt	1	1	1	1	0	0	8
		R - C	7	11	4	0	0	0	0
		Opti							
	2	Opt	1	1	1	0	0	0	0
		R - C	4	5	4	0	0	0	0
		Opti	28	6	4	0	0	0	0
5	1	Opt	1	2	2	0	0	0	0
		R - C	3	9	5	1	0	0	8
		Opti	697	7	5	0	0	0	0
	1'	Opt	1	2	1	0	0	0	0
		R - C	61	14	5	1	0	0	8
		Opti							
	2	Opt	1	2	2	0	0	0	0
		R - C	5	6	5	0	0	0	0
		Opti	90	7	5	0	0	0	0
6	1	Opt	1	3	1	1	0	0	8
		R - C	50	10	6	1	0	0	8
		Opti	415	8	6	0	0	0	0
	1'	Opt	1	3	1	1	0	0	8
		R - C							
		Opti							
	2	Opt	1	2	2	0	0	0	0
		R - C	8	9	6	1	0	0	8
		Opti	101	8	6	0	0	0	0

Tableau 5.5 – Récapitulatif : performance de la solution

P	M	Type	CPU (sec)			
			Réseau	Optimisation	Compatibilité	Total
1	1	Opt	1.01	0.01	0.00	1.02
		R - C	1.01	0.01	0.00	1.02
		Opti	1.01	0.01	0.00	1.02
	1'	Opt	0.83	0.01	0.00	0.84
		R - C	0.83	0.01	0.00	0.84
		Opti	0.83	0.01	0.00	0.84
	2	Opt	0.72	0.01	0.00	0.73
		R - C	0.71	0.01	0.00	0.72
		Opti	0.70	0.01	0.00	0.71
	O		0.18			1.99
2	1	Opt	0.97	0.01	0.00	0.98
		R - C	0.94	0.01	0.01	0.96
		Opti	0.95	0.01	0.01	0.97
	1'	Opt	0.74	0.01	0.00	0.75
		R - C	0.73	0.01	0.01	0.75
		Opti	0.73	0.01	0.01	0.75
	2	Opt	0.77	0.01	0.00	0.78
		R - C	0.78	0.01	0.01	0.80
		Opti	0.76	0.01	0.01	0.78
	O		0.18			1.86
3	1	Opt	0.99	0.01	0.00	1.00
		R - C	0.98	0.01	0.01	1.00
		Opti	1.00	0.01	0.01	1.02
	1'	Opt	0.76	0.01	0.00	0.77
		R - C	0.79	0.71	0.02	1.52
		Opti				
	2	Opt	0.87	0.01	0.00	0.88
		R - C	0.86	0.01	0.01	0.88
		Opti	0.85	0.01	0.01	0.87
	O		0.18			1.84

Tableau 5.6 – Récapitulatif : performance de la solution (suite)

P	M	Type	CPU (sec)			
			Réseau	Optimisation	Compatibilité	Total
4	1	Opt	1.04	0.01	0.00	1.05
		R - C	1.01	0.18	0.01	1.20
		Opti	1.06	0.47	0.11	1.64
	1'	Opt	0.79	0.01	0.00	0.80
		R - C	0.78	0.12	0.01	0.91
		Opti				
	2	Opt	0.90	0.01	0.00	0.91
		R - C	0.95	0.01	0.01	0.97
		Opti	0.95	0.34	0.03	1.32
	O		0.18			1.84
5	1	Opt	1.05	0.01	0.00	1.06
		R - C	1.03	0.01	0.01	1.05
		Opti	2.25	180.47	18.43	201.15
	1'	Opt	0.76	0.01	0.00	0.77
		R - C	0.85	2.03	0.05	2.93
		Opti				
	2	Opt	1.03	0.01	0.00	1.04
		R - C	1.04	0.01	0.01	1.06
		Opti	1.13	2.82	0.17	4.12
	O		0.18			1.89
6	1	Opt	1.05	0.01	0.00	1.06
		R - C	1.11	2.88	0.02	4.01
		Opti	5.38	110.33	1294.38	1410.09
	1'	Opt	0.79	0.01	0.00	0.80
		R - C				
		Opti				
	2	Opt	1.08	0.01	0.00	1.09
		R - C	1.22	0.01	0.01	1.24
		Opti	1.23	5.72	0.86	7.81
	O		0.18			1.88

5.2 Comparaison des différents modèles

Dans cette section, nous allons comparer les solutions obtenues par les différents modèles. Nous allons examiner le nombre de plus courts chemins qu'il a fallu pour obtenir une solution compatible et réalisable.

5.2.1 Une perturbation

Pour la première perturbation décrite au tableau 5.2, les trois modèles trouvent les mêmes solutions après une seule itération (le nombre de K plus courts chemins, est égal à un). Les résultats présentés au tableau 5.3 nous montrent qu'aucun vol n'est annulé à l'aéroport considéré, un seul vol a été réaffecté et tous les passagers ont été servis. L'avion qui est réaffecté au vol critique est l'un des avions au sol. Le temps de résolution (tableau 5.5) est autour d'une seconde.

5.2.2 Deux perturbations

Pour la deuxième perturbation présentée au tableau 5.2, les solutions des trois modèles (tableau 5.3) sont identiques après une seule itération (le nombre de K plus courts chemins, est égal à un). Pour résoudre le problème, deux vols ont été réaffectés. Aucun vol planifié n'a été annulé et tous les passagers ont été servis. Les deux vols critiques ont pu être récupérés même avec le Modèle 1' où on enlève d'autres vols critiques. Les avions qui sont réaffectés aux vols critiques sont les avions au sol. Le temps de résolution (tableau 5.5) est inférieur à une seconde.

5.2.3 Trois perturbations

Pour la troisième perturbation (tableau 5.2), les Modèles 1 et 2 trouvent les solutions (tableau 5.3) dans lesquelles les trois vols critiques ont pu être récupérés et il y a quatre vols réaffectés. Tous les passagers ont été servis. Les solutions sont différentes car les vols réaffectés ne sont pas les mêmes. En plus, il a fallu un plus court chemin pour le Modèle 2 et trois plus courts chemins pour le Modèle 1 pour récupérer les deux vols critiques. Le Modèle 1' trouve une solution après avoir généré 24 plus courts chemins. Les trois vols critiques ont pu être récupérés. Sept vols ont été réaffectés et tous les passagers ont pu être servis. Le temps d'exécution (tableau 5.5) est plus élevé pour le Modèle 1' parce qu'il faut calculer vingt quatre plus courts chemins pour avoir la solution.

5.2.4 Quatre perturbations

Pour la quatrième perturbation (tableau 5.2), les trois modèles trouvent des solutions différentes (tableau 5.4). Le Modèle 2 fournit une solution avec quatre plus courts chemins, il y a cinq vols réaffectés, les quatre vols critiques ont été récupérés et tous les passagers ont été servis. Le Modèle 1 fournit, après le calcul de sept plus courts chemins, une solution avec huit vols réaffectés, les quatre vols critiques récupérés et un vol annulé dont huit passagers ne sont pas servis. Le Modèle 1' fournit après le calcul de sept plus courts chemins, une solution avec onze vols réaffectés, les quatre vols critiques récupérés et un vol annulé. Huit passagers ne sont pas servis. Les temps de calcul (tableau 5.6) sont presque les mêmes car il faut calculer quatre à sept plus courts chemins. Ils sont toujours autour d'une seconde.

5.2.5 Cinq perturbations

Pour la cinquième perturbation (tableau 5.2), les trois modèles trouvent des solutions différentes (tableau 5.4). Le Modèle 2 fournit, après le calcul de cinq plus courts chemins, une solution avec cinq vols critiques récupérés, six vols réaffectés et tous les passagers servis. Pour le Modèle 1, il a fallu calculer trois plus courts chemins pour avoir une solution avec neuf vols réaffectés, tous les cinq vols critiques récupérés et un vol annulé dont huit passagers ne sont pas servis. Le Modèle 1' fournit après le calcul de soixante et un plus courts chemins, une solution avec tous les cinq vols critiques récupérés, quatorze vols réaffectés et un vol annulé dont huit passagers ne sont pas servis. Le temps de calcul (tableau 5.6) est plus élevé pour le Modèle 1' car il a fallu calculer soixante et un plus courts chemins. Pourtant il est très bas, à moins de 3 secondes.

5.2.6 Six perturbations

Pour la sixième perturbation (tableau 5.2), les solutions des trois modèles (tableau 5.4) sont différentes. Le Modèle 2 donne, après le calcul de huit plus courts chemins, une solution avec tous les six vols critiques récupérés, neuf vols réaffectés et un vol annulé dont les huit passagers ne sont pas servis. Le Modèle 1 donne, après le calcul de 50 plus courts chemins, une solution avec tous les six vols critiques récupérés, dix vols réaffectés et un vol annulé dont les huit passagers ne sont pas servis. Le Modèle 1' ne donne pas de solution avec les six vols critiques récupérés. Le temps de résolution (tableau 5.6) est moins de quatre secondes pour le Modèle 1 et moins de 2 secondes pour le Modèle 2.

5.3 Comparaison entre les modèles 1, 2 et l'optimiseur

Dans la suite du chapitre, nous ferons des comparaisons entre les deux modèles développés dans ce mémoire et l'optimiseur. Nous n'utiliserons pas le Modèle 1' étant donné que le domaine de recherche exclut d'emblée les autres vols critiques et les autres avions critiques. Or, il se peut que la solution optimale prenne en compte ces éléments. Les Modèles 1 et 2 sont plus réalistes que le Modèle 1'. Pour pouvoir comparer les solutions obtenues par les Modèles 1, 2 et celles de l'optimiseur, nous faisons varier le nombre de plus courts chemins pour savoir à partir de quel nombre de plus courts chemins ces modèles fournissent une solution identique à celle de l'optimiseur.

5.3.1 Une perturbation

Pour la première perturbation, les Modèles 1 et 2 trouvent la solution (tableau 5.3) de l'optimiseur après avoir résolu un seul plus court chemin. La solution comprend un vol réaffecté et le vol critique est récupéré. Le temps de résolution (tableau 5.5) est de l'ordre d'une seconde.

5.3.2 Deux perturbations

Pour deux perturbations, les Modèles 1 et 2 trouvent la même solution que l'optimiseur (tableau 5.3) après le calcul d'un seul plus court chemin. La solution comprend deux vols réaffectés et tous les deux vols critiques sont récupérés. Le temps de résolution (tableau 5.5) est inférieur à une seconde pour nos modèles et 1.86 seconde pour l'optimiseur.

5.3.3 Trois perturbations

Pour trois perturbations, le Modèle 2 fournit la même solution que l'optimiseur (tableau 5.3) après un seul plus court chemin généré. Quatre vols sont réaffectés et les trois vols critiques ont pu être récupérés. Pour le Modèle 1, il faut calculer neuf plus courts chemins pour avoir la même solution que l'optimiseur. Le temps de résolution (tableau 5.5) est autour d'une seconde pour nos modèles et de 1.84 secondes pour l'optimiseur.

5.3.4 Quatre perturbations

Pour quatre perturbations (tableau 5.4), il faut aller jusqu'à 28 plus courts chemins pour trouver la solution de l'optimiseur pour le Modèle 2. Pour le Modèle 1, il faut calculer 45 plus courts chemins pour avoir la solution de l'optimiseur. Le temps de résolution (tableau 5.6) est inférieur à deux secondes pour nos modèles, alors que pour l'optimiseur, il est de 1.84 seconde.

5.3.5 Cinq perturbations

Pour cinq perturbations (tableau 5.4), il faut aller jusqu'à 90 plus courts chemins pour trouver la même solution que l'optimiseur avec le Modèle 2. Le Modèle 1 nécessite le calcul de 697 plus courts chemins, dont 393 ont le même coût, pour obtenir la solution de l'optimiseur. Le temps de calcul (tableau 5.6) correspondant est supérieur à 3 minutes à cause du calcul de nombreux plus courts chemins. Le problème est résolu en moins de 5 secondes avec le Modèle 2. L'optimiseur résout le même problème en moins de 2 secondes.

5.3.6 Six perturbations

Pour six perturbations (tableau 5.4), il faut aller jusqu'à 101 plus courts chemins pour trouver la même solution que l'optimiseur avec le Modèle 2. Le Modèle 1 nécessite le calcul de 415 plus courts chemins pour trouver la même solution que l'optimiseur. Le temps de calcul (tableau 5.6) est important pour le Modèle 1 car il faut calculer ces plus courts chemins, construire le réseau et évaluer la compatibilité, ce qui prend environ 20 minutes.

5.3.7 Production de plusieurs bonnes solutions

Dans les résultats que nous avons présentés, nous produisons plusieurs solutions jusqu'à trouver la solution de l'optimiseur. De la même façon, un gestionnaire de vol peut produire plusieurs solutions tant qu'il n'a pas une solution satisfaisant les autres facteurs qu'il veut considérer. Ne pouvant pas expérimenter avec des gestionnaires pour voir combien de solutions il faut générer, nous avons expérimenté avec l'optimiseur qui est un gestionnaire idéal. Il faut noter que le temps de calcul pour un plus court chemin est d'un centième de seconde, pour calculer plusieurs solutions le temps d'optimisation est faible.

5.4 Synthèse des résultats

Après l'analyse de la qualité des solutions et de la performance des différents modèles avec différentes perturbations, nous faisons une synthèse des résultats obtenus. Pour l'exploitation du système d'aide à la décision pour la mise à jour des horaires d'avions, nous devons faire des propositions de choix du modèle à appliquer.

Le Modèle 1 fournit les mêmes solutions que l'optimiseur jusqu'à deux perturbations avec le calcul d'un seul plus court chemin et un temps de calcul total autour d'une seconde. Au delà de deux perturbations, le modèle ne trouve pas la solution de l'optimiseur avec un plus court chemin.

On remarquera qu'avec l'ajout des autres avions critiques et leur heure d'arrivée actualisée, le Modèle 2 trouve les même solutions que l'optimiseur jusqu'à trois perturbations avec le calcul d'un seul plus court chemin en moins d'une seconde. Au delà de trois perturbations, il faut augmenter le nombre de plus courts chemins pour avoir la solution de l'optimiseur.

Au delà de trois perturbations, le Modèle 2 demeure plus performant que le Modèle de base : il faut moins de plus courts chemins pour avoir la solution de l'optimiseur et, pour une perturbation donnée, il y a souvent d'autres vols critiques récupérés dans la solution.

Les améliorations apportées par le Modèle 2 produisent les effets attendus. En effet, on constate que, dans la majorité des cas, un ou plusieurs autres vols critiques sont récupérés dans la solution proposée. Les résultats obtenus sont satisfaisants avec le Modèle 2 car les temps de calcul sont inférieurs à huit secondes dans tous les cas.

Jusqu'à trois perturbations, le Modèle 2 trouve la même solution que l'optimiseur avec un seul plus court chemin avec un temps meilleur temps que l'optimiseur. À la quatrième perturbation, il faut aller jusqu'à 28 plus courts chemins pour avoir la solution de l'optimiseur. Le temps de calcul est de 1.32 seconde pour le Modèle 2 et 1.84 seconde pour l'optimiseur. Au delà de quatre perturbations, le Modèle 2 trouve les solutions de l'optimiseur mais le nombre de plus courts chemins est élevé entre 61 et 101. Le temps de calcul est de l'ordre de deux secondes pour l'optimiseur, entre quatre et huit secondes pour le Modèle 2.

Sur la base de ces résultats, le Modèle 2 est supérieur aux Modèles 1 et 1'. On retient que le Modèle 2 trouve des solutions réalisables et compatibles (R - C) en générant peu de plus courts chemins. En effet, pour des problèmes difficiles (nombre de perturbations supérieur à quatre) le Modèle 2 trouve une solution compatible avec respectivement quatre, cinq et huit plus courts chemins. De plus, quand le nombre de perturbations est petit (moins de trois dans les exemples) il produit la solution optimale avec un seul plus court chemin. Quand il y a un nombre moyen de perturbations (quatre à six), il faut souvent plusieurs dizaines de plus courts chemins avant d'obtenir la solution de l'optimiseur.

CONCLUSION

L'objectif de ce mémoire de maîtrise consistait à mettre en place un système d'aide à la décision pour le problème de mise à jour des horaires d'avion suite à des perturbations. L'objectif principal de cette recherche est de fournir au gestionnaire des vols plusieurs bonnes solutions pour pouvoir revenir rapidement au plan initial. Dans ce système, nous évaluons l'horaire de vols dans le but de l'améliorer en permettant l'annulation de vol et/ou le retard de vol et/ou les échanges d'avion aux vols. De plus le problème doit être résolu en temps réel afin que sa solution puisse être appliquée. Des tests ont été effectués sur un jeu de données provenant d'une compagnie aérienne, les vols critiques étant traités séquentiellement.

Nous avons construit un modèle de base (Modèle 1) où chaque vol critique est traité en partant d'une même situation initiale sans tenir compte du fait qu'il y a d'autres vols critiques. Lorsqu'on traite un vol critique donné, les autres vols critiques sont inclus dans le réseau avec leur heure de départ planifiée.

Après nous avons effectué deux modifications sur le Modèle de base. La première modification (Modèle 1') est effectuée de telle façon qu'on garde la formulation du modèle de base sauf que les autres vols critiques ainsi que leur avion planifié ne sont pas pris en considération dans le réseau. La deuxième modification (Modèle 2) est une amélioration du modèle de base. Afin d'avoir un modèle plus complet, couvrir plus de vols et mieux utiliser les ressources disponibles, nous avons ajouté dans le réseau les autres avions critiques et les autres vols critiques. Les autres avions critiques sont pris en compte avec leur heure d'arrivée actualisée. Nous avons ainsi obtenu un modèle qui est plus conforme à la réalité, qui améliore la qualité de la solution et accélère le temps d'exécution du programme.

Nous avons finalement un système d'aide à la décision pour la mise à jour des horaires d'avion durant la journée d'opération. L'analyse des résultats nous amène aux conclusions suivantes qui sont spécifiques aux tests réalisés :

1. Le Modèle 2 est très réaliste et produit des solutions après le calcul d'un seul plus court chemin pour un nombre de perturbations inférieur ou égal à trois en des temps de calcul très raisonnables. Il prend en compte les autres avions critiques avec leur heure d'arrivée planifiée et les autres vols critiques.
2. Le Modèle 1 produit des solutions après le calcul d'un seul plus court chemin pour un nombre de perturbations inférieur ou égal à deux, les temps de calcul sont plus élevés que ceux du Modèle 2.
3. Le Modèle 1' ne produit qu'une solution pour une seule perturbation. Ce modèle n'est pas du tout réaliste car les autres avions critiques et les autres vols critiques ne sont pas pris en compte.
4. Jusqu'à trois perturbations, le Modèle 2 est plus rapide que l'optimiseur. À la quatrième perturbation, il faut augmenter le nombre de plus courts chemins pour avoir la solution de l'optimiseur avec un temps de calcul de moins de deux secondes. Aux cinquième et sixième perturbations, le Modèle 2 trouve les solutions de l'optimiseur mais le nombre de plus courts chemins est élevé (61 et 101 respectivement). Le temps de calcul varie entre quatre et huit secondes pour le Modèle 2 et de l'ordre de deux secondes pour l'optimiseur.
5. La recherche des solutions réalisables et compatibles (R - C) dans un graphe d'une centaine de vols avec le Modèle 2, se fait en des temps inférieurs à une seconde et demi. Le nombre de plus courts chemins est inférieur à huit si le nombre de perturbation est assez petit (1 à 6).

BIBLIOGRAPHIE

ARGUELLO, M. F., BARD, J. F. et YU, G. (1997). Models and Methods for Managing Airline Irregular Operations. Dans Yu G., éditeur, *Operations Research in the Airline Industry*, 1–45. Kluwer academic publishers.

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

BARNHART, C. et BRATU, S. (2004). Airline Operations Recovery : Integrating Aircraft, Crews and Passengers. *AGIFORS Airline Operations Conference*, Washington D.C., USA.

BARNHART, C., HATAY, L., et JOHNSON, E. L. (1995). Deadhead Selection for the Long-Haul Crew Pairing Problem. *Operations Research* **43**, No.3, 491–499.

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

CAO, J. et KANAFANI, A. (1997). Real Time Decision Support for Integration of Airline Flight Cancellations and Delays part I and II. *Transportation Planning and Technology* **20**, 183–217.

CHU, H. D., GELMAN, E. et JOHNSON, E. L. (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 ZHU, Z. (1997). The Aircraft Rotation Problem. *Annals of Operations Research : Mathematics of Industrial Systems II* **69**.

- CORDEAU, J. F., STOJKOVIC, G., SOUMIS, F. et DESROSIERS, J. (2001). Benders Decomposition for Simultaneous Aircraft Routing and Crew Scheduling. *Transportation Science* **35**, No. 4, 375–388.
- DESAULNIERS, G., DESROSIERS, J., DUMAS, Y., MARC, S., RIOUX, B., SOLOMON, M. et SOUMIS, F. (1997). Crew Pairing at Air France. *European Journal of Operations Research* **97**, 245–259.
- ETSCHMAIER, M. M. et MATHAISEL, D. F. X. (1985). Airline Scheduling : an Overview. *Transportation Science* **19**, No. 2, 127–138.
- GAMACHE, M. et SOUMIS, F. (1998). A Method for Optimally Solving the Rostering Problem. Dans Yu, G., éditeur, *Operations Research in the Airline Industry*, 124–154. Kluwer academic publishers.
- GAMACHE, M., SOUMIS, F., MARQUIS, G. et DESROSIERS, J. (1999). A Column Generation Approach for Large Scale Aircrew Rostoring Problems. *Operations Research* **47**, No 2, 247–263.
- GAMACHE, M., SOUMIS, F., VILLENEUVE, D., DESROSIERS, J. et GELINAS, E. (1998). The Preferential Bidding System at Air Canada. *Transportation Science* **32**, 246–255.
- GU, Z., NEMHAUSER, G. L. et WANG, Y. (1994). Some Properties of the Fleet Assignment Problem. *Operations Research Letters* **15**, 59–71.
- HANE, C. A., BARNHART, C., JOHNSON, E.L., MARSTEN, R.E., NEMHAUSER, G. L. et SIGISMONDI G.C. (1995). The Fleet Assignment Problem : Solving a Large Integer Program. *Mathematical Programming* **70**, 211–232.
- HOFFMAN, K. L. et PADBERG, M. (1993). Solving Airline Crew Scheduling Problems by Branch and Cut. *Management Science* **39**, No. 6, 657–682.

- JARRAH, A., et STREHLER, J. C. (2002). An Optimization Model for Assigning Through Flights. *IEE Transactions*, **32**, No. 3, 237–244.
- JARRAH, A., YU, G., KRISHNAMURTHY, N. et RAKSHIT, A. (1993). A Decision Support Framework for Airline Flight Cancellations and Delays. *Transportation Science*, **27**, No. 3, 266–280.
- KLABJAN, D., JOHNSON, E. L., NEMHAUSER, G. L., GELMAN, E. et RAMASWAMY, S. (2001a). Airline Crew Scheduling with Regularity. *Transportation Science*, **35**, No. 4, 359–374.
- KLABJAN, D., JOHNSON E. L., NEMHAUSER, G. L., GELMAN, E. et RAMASWAMY, S. (2001b). Solving Large Airline Crew Scheduling Problems : Random Pairing and Strong Branching. *Computational Optimization and Applications*, **20**, 73–91.
- KLABJAN, D. et SCHWAN, K. (1999). Airline Crew Pairing Generation in Parallel. *Technical Report TLI/LEC-99-09*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
- KNIKER, T. (1998). *Itinerary Based Airline Fleet Assignment*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Boston, USA.
- KRISHNAMURTHY, N. (1991). Model for Irregular Operations at United Airlines. *AGIFORS Proceedings*, **31**, 81–95
- LETOVSKY, L. (1997). *Airline Operations Recovery : An Optimization Approach*. Thèse de doctorat, Georgia Institute of Technology. Atlanta, USA.
- LETOVSKY, L., JOHNSON, E. L., et NEMHAUSER, G. L. (2000). Airline Crew Recovery. *Transportation Science*, **34**, No. 4, 337–348.
- RAKSHIT, A. (1990). Decision Support Systems for Systems Operations Control. *AGIFORS Proceedings*, **30**, 117–126.

- RAKSHIT, A., KRISHNAMURTHY, N. et YU, G. (1996). System Operations Advisor : Real Time Decision Support System for Managing Airline Operations at United Airlines. *Interfaces*, **26**, No. 2, 50–58
- STOJKOVIC, G., SOUMIS, F., DESROSIERS, J. et SOLOMON, M. M. (2002). An Optimization Model for a Real Time Flight Scheduling Problem. *Transportation Research*, **36**, 779–788.
- STOJKOVIC, M., SOUMIS, F., et DESROSIERS, J. (1998). The Operational Airline Crew Scheduling Problem. *Transportation Science*, **32**, 232–245.
- STOJKOVIC, M. et SOUMIS, F. (2000). The Operational and Multi-crew Scheduling Problem. Les cahiers du GERAD G-2000-27, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada.
- STOJKOVIC, M. et SOUMIS, F. (2001). An Optimization Model for the Simultaneous Operational Flight and Pilot Scheduling Problem. *Management Science* **47**, No. 9, 1290–1305, 2001.
- STOJKOVIC, M. (2003). Aircraft Recovery DSS, Document interne, GERAD, École des Hautes Études Commerciales, Montréal, Canada.
- STOJKOVIC, M. et SOUMIS, F. (2003). Simultaneous Aircraft and Crew Recovery System. *AGIFORS Airline Operations Conference*, Auckland, New Zealand.
- TEODOROVIC, D. et GUBERNIC, S. (1984). Optimal Dispatching Strategy on an Airline Network after a Schedule Perturbation. *European Journal of Operational Research*, **15**, No 2, 178–182.
- TEODOROVIC, D. et STOJKOVIC, G. (1990). Model for Operational Daily Airline Scheduling. *Transportation Planning Technology*, **14**, 273–285.

- TEODOROVIC, D. et STOJKOVIC, G. (1995). Model to Reduce Airline Schedule Disturbances. *Journal of Transportation Engineering*, **121**, 324–331.
- VANCE, P. H., ATAMTURK, A., BARNHART, C., GELMAN, E., JOHNSON, E. L., KRISHNA, A., MADIDHARA, D., NEMHAUSER, G. L. et REBELLO, R. (1997). A Heuristic Branch and Price Approach for the Airline Crew Pairing Problem. *Technical Report TLI/LEC-97-06*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
- WEI, G., YU, G. et SONG, M. (1997). Optimization Method and Algorithm for Crew Management during Airline Irregular Operations. *Journal of Combinatorial Optimization* **1**, 305–321.
- YAN, S. et YANG, D. H. (1996). A Decision Support Framework for Handling Schedule Perturbation. *Transportation Research* **30**, No.6, 405–419.
- YEN, J. Y. (1971). Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network. *Management Science* **17**, No. 11, 712–716.

ANNEXE A : DIFFÉRENTS EXEMPLES

Dans cette annexe, nous donnons des exemples de calculs des plus courts chemins. D'abord un exemple avec l'algorithme de dijkstra modifié et un exemple avec l'algorithme de Yen.

A.1 Exemple algorithme de Dijkstra modifié

Soit $G = (N, V)$ le réseau constitué des nœuds $s, 1, 2, 3$ et t et d'un ensemble d'arcs tel qu'illustré dans la figure A.1. Les coûts sont sur les différents arcs. Nous cherchons les plus courts chemins de s à t . soient S l'ensemble des nœuds dont l'étiquette est permanente, $\underline{S}$ l'ensemble des nœuds dont l'étiquette est temporaire et $d(u)$ l'étiquette associée au nœud u qui représente la distance entre le nœud source s et le nœud u . Toutes les étiquettes prennent la valeur infinie sauf $d(s) = 0$ et $Pred(s) = \emptyset$. Les ensembles S et $\underline{S}$ sont définis comme suit : $S = \emptyset$ et $\underline{S} = \{s, 1, 2, 3\}$. La plus petite étiquette des nœuds appartenants à $\underline{S}$, vaut zéro et c'est le nœud s . Le nœud s est alors retiré de $\underline{S}$ et est ajouté à S .

À la figure A.2 on procède à la mise à jour des étiquettes des nœuds (1, 2 et 3) et de leur prédécesseur. On a $\underline{S} = \{1, 2, 3\}$ et la plus petite étiquette des nœuds appartenants à $\underline{S}$, vaut deux et c'est le nœud 1. Le nœud 1 est alors retiré de $\underline{S}$ et est ajouté à S .

À la figure A.3 on procède à la mise à jour des étiquettes des nœuds (3 et t) et de leur prédécesseur. On a $\underline{S} = \{2, 3\}$ et la plus petite étiquette des nœuds appartenants à $\underline{S}$, vaut trois et c'est le nœud 2. Le nœud 2 est alors retiré de $\underline{S}$ et est ajouté à S .

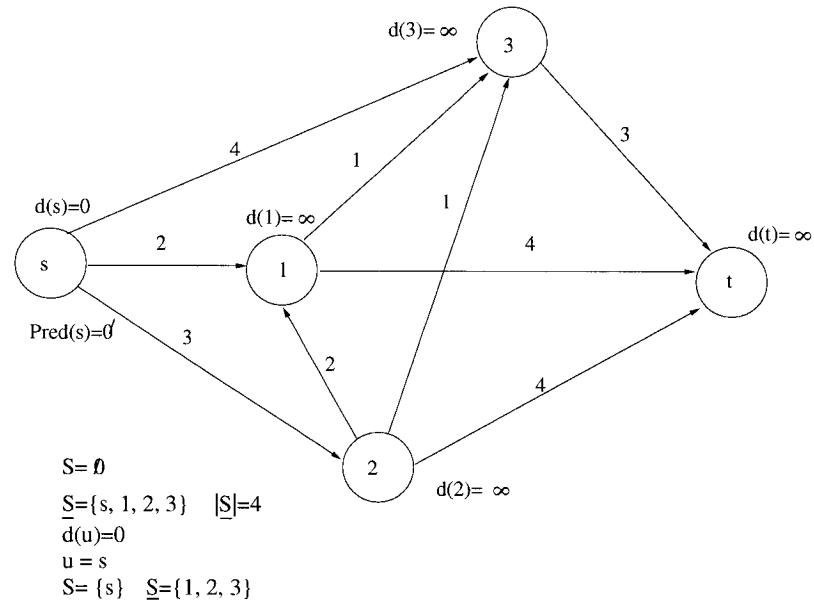


Figure A.1 – Calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Dijkstra modifié

À la figure A.4 on procède à la mise à jour des étiquettes des nœuds (1, 3 et t) et de ses prédécesseurs. On a $\underline{S} = \{3\}$ et la plus petite étiquette des nœuds appartenants à $\underline{S}$, vaut trois et c'est le nœud 3. Le nœud 3 est alors retiré de $\underline{S}$ et est ajouté à S .

À la figure A.5 on procède à la mise à jour de l'étiquette du nœud t et de ses prédécesseurs. On a $\underline{S} = \emptyset$ et le nœud p est ajouté à S . Les deux plus courts chemins de s à p sont $s-1-t$ et $s-1-3-t$ et ils ont un coût de six.

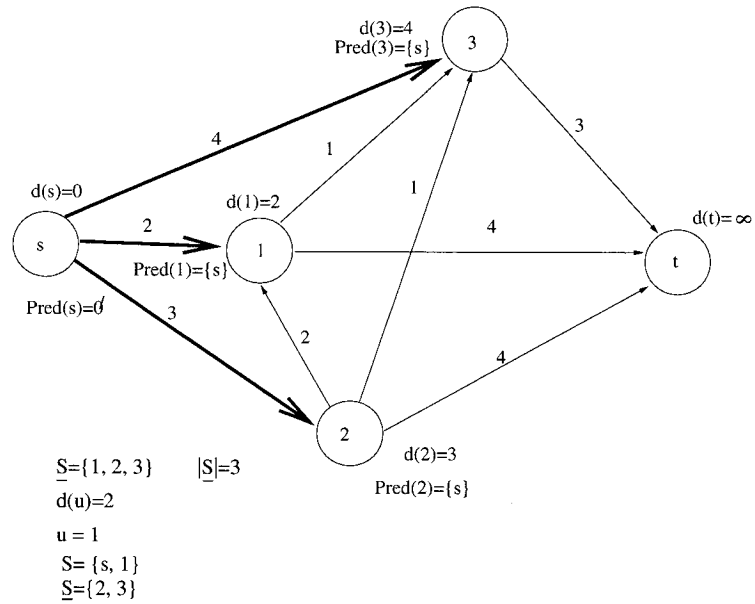


Figure A.2 – Calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Dijkstra modifié (suite)

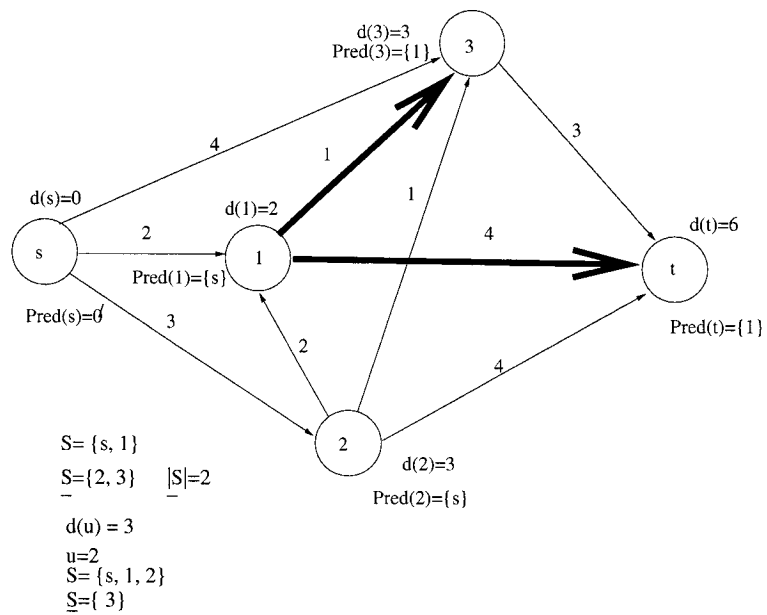


Figure A.3 – Calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Dijkstra modifié (suite)

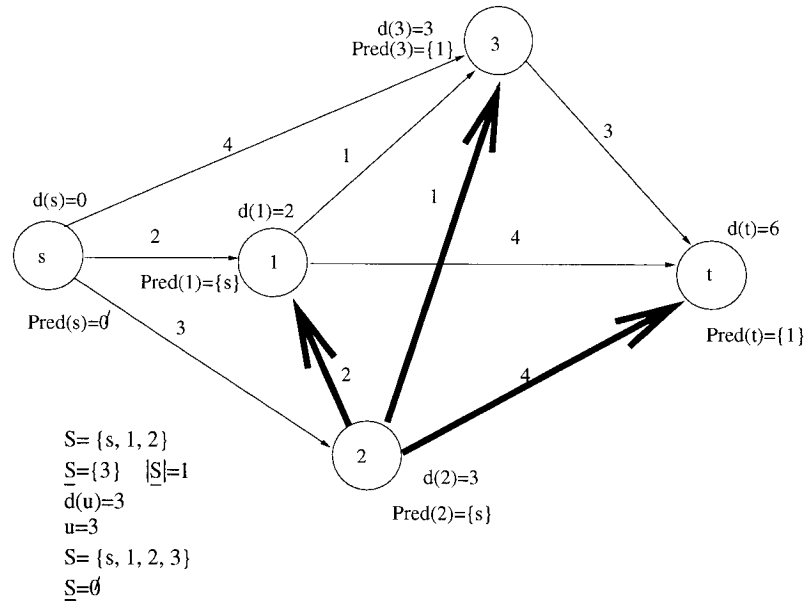


Figure A.4 – Calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Dijkstra modifié (suite)

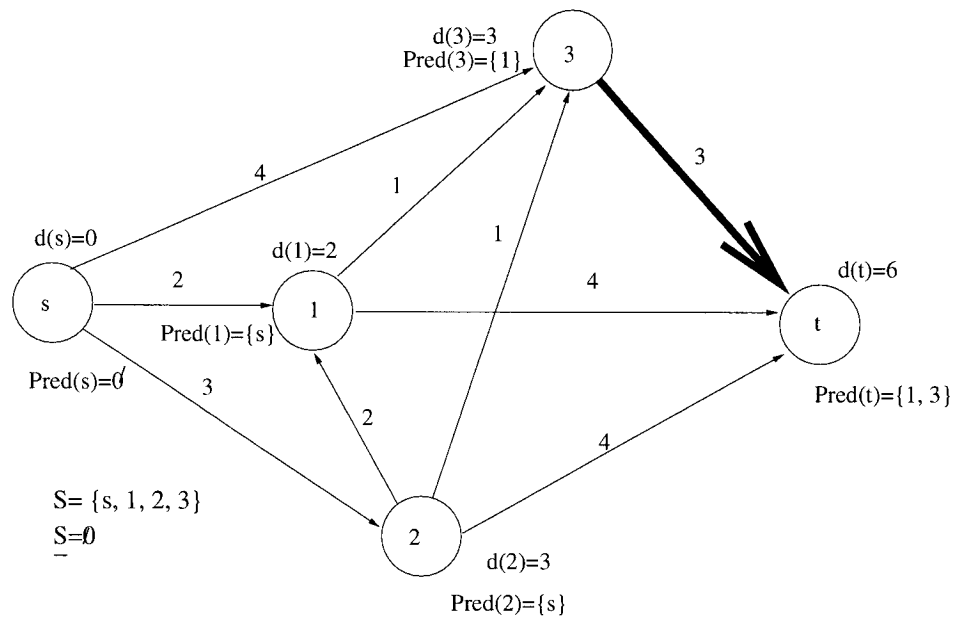


Figure A.5 – Calcul des plus courts chemins avec l'algorithme de Dijkstra modifié (fin)

A.2 Exemple algorithme de Yen

Le graphe G est le même que celui de la section A.1 et on cherche les quatre plus courts chemins de s à t en appliquant l'algorithme de Yen.

À la première itération $k=1$ (figure A.6) on obtient deux plus courts chemins par l'algorithme de Dijkstra modifié. Ces chemins ont un coût de six. Le premier chemin $s-1-t$ est placé dans la *ListeA* et le deuxième chemin $s-1-3-t$ est placé dans la *ListeB*.

À la deuxième itération $k=2$ (figure A.7), on a $q_1 = s-1-t$, pour le nœud $i = s$ on enlève l'arc $(s,1)$ du graphe G et on obtient les plus courts chemins de s à t $g = \{s-2-t, s-3-t, s-2-3-t\}$ qui ont un coût de sept. Pour $k=2$ $|ListeB| \leq 3$, on met dans *ListeB* les chemins $s-1-3-t$ et $s-3-t$. Pour le nœud $i=1$ (figure A.8), on enlève l'arc $(1, t)$ du graphe G . On obtient le plus court chemin de 1 à t $g = \{1-3-t\}$ et $sub_{q_1} = s-1$. On les concatène $sub_{q_1} \diamond g$, on obtient le plus court chemin de s à t $q = \{s-1-3-t\}$ qui est déjà dans *ListeB*. On enlève le chemin $s-1-3-t$ de *ListeB* et on le met dans *ListeA*.

À la troisième itération $k=3$ (figure A.9), on a $q_2 = s-1-3-t$, pour le nœud $i = s$ on enlève l'arc $(s,1)$ du graphe G . On obtient les plus courts chemins de s à t $g = \{s-3-t, s-2-t, s-2-3-t\}$ avec un coût de sept. Pour $k=3$ $|ListeB| \leq 2$, aucun des chemins de g ne peut être mis dans *ListeB*. Pour le nœud $i=1$ (figure A.10), on enlève les arcs $(1,3)$ et $(1,t)$ du graphe G . Il n'y a pas de plus court chemin de 1 à t donc $g = \emptyset$. Pour le nœud $i=3$ (figure A.11), on enlève l'arc $(3,t)$ du graphe G . Il n'y a pas de plus court chemin de 3 à t , $g = \emptyset$. Les deux chemins qui sont dans *ListeB* ont un coût de sept, on les enlève de *listeB* et on les met dans *ListeA*. Finalement $|ListeA| = 4$, $ListeA = \{s-1-t, s-1-3-t, s-3-t, s-2-t\}$.

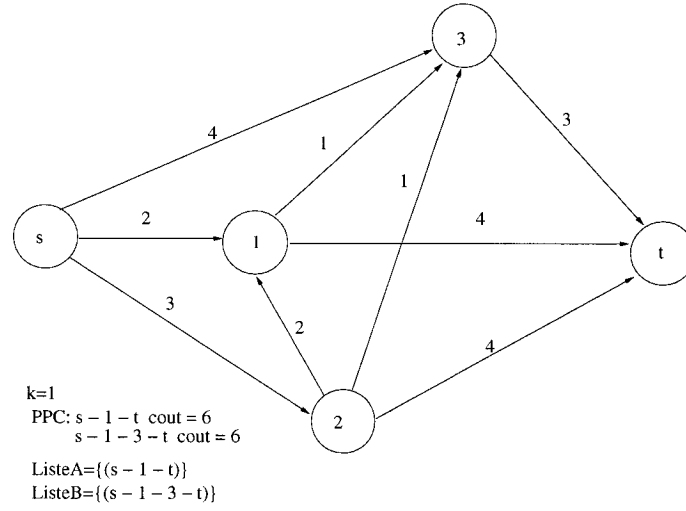


Figure A.6 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l’algorithme de Yen

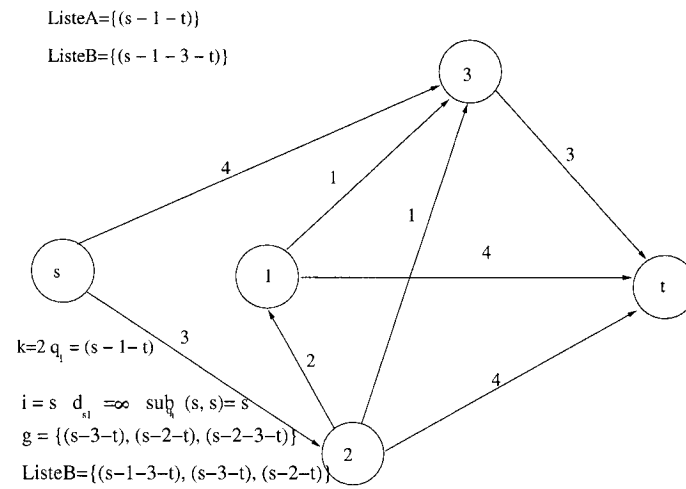


Figure A.7 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l’algorithme de Yen (suite)

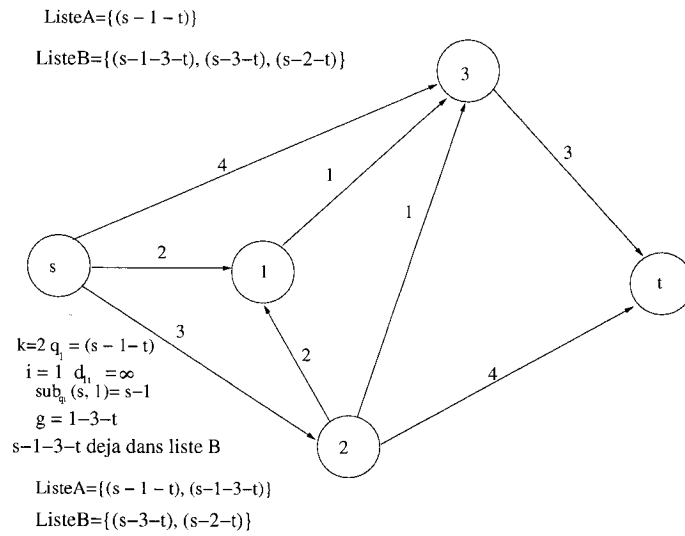


Figure A.8 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)

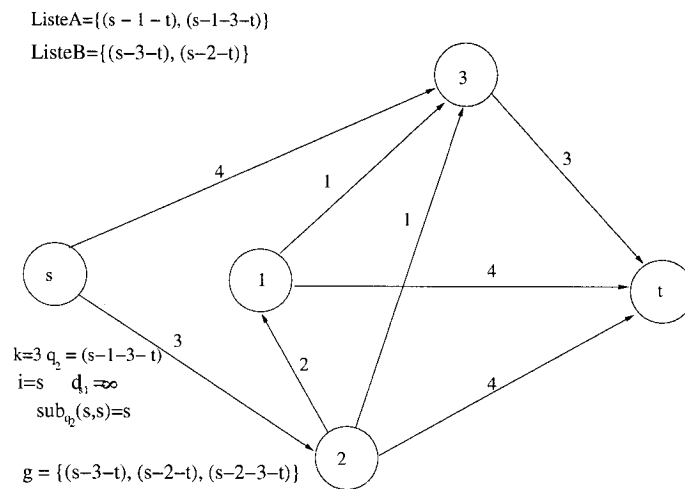


Figure A.9 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)

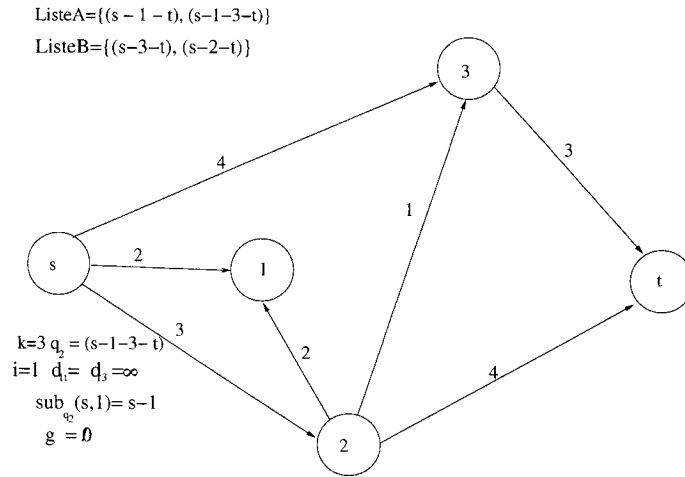


Figure A.10 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (suite)

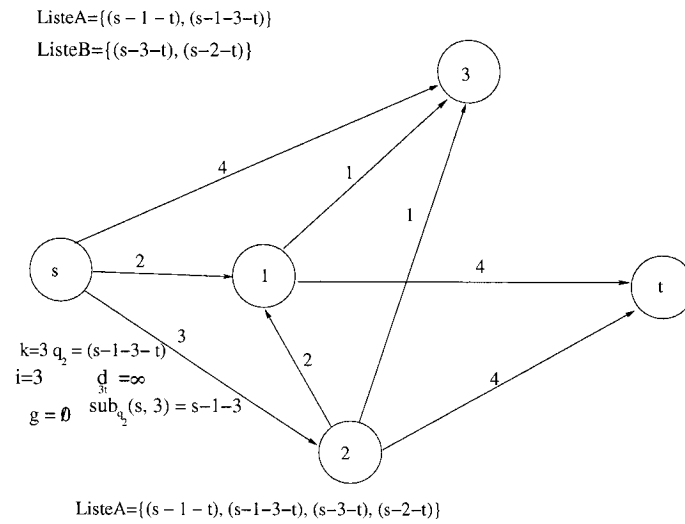


Figure A.11 – Calcul des quatre plus courts chemins avec l'algorithme de Yen (fin)