

Titre: Gestion des vols en retard
Title:

Auteur: Nour Mustapha
Author:

Date: 2012

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Mustapha, N. (2012). Gestion des vols en retard [Mémoire de maîtrise, École
Citation: Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1047/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/1047/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-Marc Frayret, & Michel Gamache
Advisors:

Programme: Génie industriel
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

GESTION DES VOLS EN RETARD

NOUR MUSTAPHA

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

(GÉNIE INDUSTRIEL)

DÉCEMBRE 2012

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

GESTION DES VOLS EN RETARD

présenté par : MUSTAPHA Nour

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

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

M. BASSETTO Samuel, Doct., président

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GAMACHE Michel, ing., Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. PELLERIN Robert, ing., Ph.D., membre

DÉDICACE

L'imagination est plus importante que la connaissance [le savoir]. Car la connaissance est limitée, tandis que l'imagination englobe le monde entier, stimule le progrès, suscite l'évolution.

-Albert Einstein

REMERCIEMENTS

Premièrement, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Jean-Marc Frayret, pour son excellent soutien et encadrement pendant la réalisation du projet. De plus, ses judicieux conseils et son entière coopération m'ont permis de persévérer et de mener à terme un tel projet. Je remercie également mon co-directeur Monsieur Michel Gamache pour son support et ses recommandations pertinentes à l'avancement du projet. Je vous remercie également, pour votre grande disponibilité, votre patience et vos encouragements.

Deuxièmement, je tiens à souligner ma reconnaissance pour la collaboration inégalée d'Air Canada, qui m'a donné la chance de réaliser ce projet et qui a mis à ma disposition toutes les ressources nécessaires à sa réalisation. L'engagement honorable et l'appui de Jérôme-Olivier Ouellet et Karine Lacerte m'ont permis de bâtir un tel projet. Également, je tiens à remercier toute l'équipe de recherche opérationnelle, dont Jacques Cherrier, Soad El-Taji et Mathieu Nonki pour leur aide et leur soutien tout au long du projet. Je remercie spécialement Mathieu Nonki pour son aide et ses recommandations au sujet de Visual Basic Application.

Troisièmement, je remercie Alvaro Gil pour son enseignement, sa persévérance, sa disponibilité et ses sages conseils concernant l'application Visual Basic.

Quatrièmement, je tiens à remercier le MITACS pour sa contribution et son soutien financier durant le projet qui m'a permis de me concentrer entièrement sur celui-ci.

Finalement, le support et l'encouragement de la part de tous les membres de ma famille, de mon époux et de tous mes proches, m'ont permis d'être tenace et de persévérer pendant la durée du projet. Je vous dédie ce mémoire.

RÉSUMÉ

L'industrie aérienne est caractérisée par la complexité de ses opérations. Ainsi, lorsqu'un retard survient sur un vol, l'impact de celui-ci peut devenir très important, voire même à créer un effet boule de neige sur l'ensemble des activités opérationnelles et des ressources impliquées. Bien qu'un retard peut être causé par des bris mécaniques ou de mauvaises conditions météorologiques, son effet n'est pas négligeable et doit être absorbé le plus tôt possible afin d'en limiter les conséquences. Les options, afin de rétablir la situation lorsqu'un retard survient, sont très restreintes. Ainsi, la première est de rattraper celui-ci en accélérant le vol affecté et la seconde est de ne poser aucune action et donc, d'assumer tous les coûts qui en découlent.

L'objectif du projet qui est présenté est de développer un ensemble d'outils d'analyse et d'aide à la décision qu'Air Canada pourra mettre en œuvre afin de prendre de meilleures décisions opérationnelles et financières quant à la gestion des vols accusant des retards.

Afin de simplifier le modèle développé des hypothèses générales ont été posées. Premièrement, l'échange de vols entre avions n'est pas une option retenue. Ensuite, seuls les impacts sur le coût du carburant associé à une accélération, les passagers et leurs vols de correspondance, les équipages, le prochain vol du même avion et ses vols de correspondance sont considérés. De la même manière, les annulations et les détournements de vols, les impacts des retards sur les bagages et le cargo, la disponibilité des portes et le trafic aérien ne sont pas considérés. Finalement, les coûts liés à l'insatisfaction des passagers sont ignorés dans cette étude.

Pour ce faire, un modèle de décisions, énumérant un ensemble de solutions potentielles a été développé. Celui-ci présente l'effet du retard sur deux vols d'un même avion ainsi que sur leurs correspondances. À chaque fois que le vol affecté par le retard est accéléré, un ensemble de solutions est généré afin de connaître quelles seront les actions possibles afin de limiter l'effet du retard et rétablir la situation. À ces solutions, sont rattachés des coûts afin de pouvoir les comparer et choisir celles qui seront réalisables à moindre coût.

Afin de tester et valider le modèle développé, un prototype a été créé à l'aide de Visual Basic. Celui-ci a été testé sur quatre scénarios différents. À l'aide de cette application, la pertinence et la cohérence du modèle ont été validées. Les résultats obtenus démontrent clairement que grâce à des accélérations possibles sur les vols, il est possible de rétablir la situation telle que prévue au

départ, et ce à moindre coût, tout en assurant la satisfaction des passagers. Également, le temps de résolution faible à l'aide de Visual Basic est l'une des grandes forces de notre modèle.

Toutefois, des améliorations possibles peuvent être apportés afin d'augmenter la précision des coûts. Une meilleure estimation des coûts permettrait d'obtenir des solutions avec des coûts plus réalistes.

ABSTRACT

The airline industry is characterized by the complexity of its operations. Thus, when a delay occurs on a flight, the impact of it can become very important, even to create a snowball effect on all operational activities and resources involved. Although a delay may be caused by mechanical failure or bad weather conditions, its effect is not negligible and must be absorbed as soon as possible to limit the consequences. Options to restore the situation when a delay occurs are very limited. The first is to catch it up by accelerating the affected flight and the second is not take any action and, therefore, to assume all associated costs.

The aims of the project is to develop a set of tools for analysing options and support decision making that Air Canada can implement to make better decisions regarding operational and financial management of delayed flights.

In order to simplify the model, this study considers several general assumptions. First, the exchange of aircraft between flights (swap) is not an option. Second, only the impact on fuel costs associated with an acceleration, passengers and their connections, the crew, the next flight of the same aircraft and its connections are considered. Similarly, cancellations and diversions of flights are not considered. Along the same line, the impact of delay on baggage, cargo, gates availability, and air traffic are also not considered. Finally, passengers dissatisfaction costs are also ignored in this study.

A decision model, identifying a set of solution has been developed. This model shows the effect of delay on two flights on the same plane and their correspondences by computing delay costs. Whenever the flight affected by a delay is accelerated, a set of solutions is generated in order to know the possible actions that minimize the effect of delay and recover the situation. For each solution, costs are associated in order to compare them and choose the ones that are achievable at lower cost.

A prototype using Visual Basic was created to test and validate the proposed model. This model was therefore tested on four different scenarios, which validate the relevance and consistency of the model. Indeed, the results clearly show that with the acceleration of flights, it is possible to restore the situation that was originally planned, at lower cost, while ensuring passenger satisfaction. Also, the low resolution time using Visual Basic is one of the great

strengths of our model. However, improvements can be made to increase the accuracy of cost. A better calculation of the cost involved in the project would provide solutions with more realistic costs.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES	xii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 NOTION DE RETARD	1
1.2 IMPACTS FRÉQUENTS DES RETARDS.....	3
1.3 HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES	5
1.4 OBJECTIF GÉNÉRAL	5
1.5 OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	5
1.6 STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MODÈLE	14
3.1 MODÈLE GÉNÉRAL.....	14
3.2 EXPLICATION DU MODÈLE	16
3.3 ÉVALUATION DES COÛTS	28
3.3.1 COÛTS LIÉS AU CARBURANT	28
3.3.2 COÛTS LIÉS AUX PASSAGERS.....	30
3.3.3 COÛTS LIÉS AUX ÉQUIPAGES	34

CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION	37
4.1 PRÉSENTATION DU PROCESSUS.....	37
4.2 DESCRIPTION DES INTRANTS.....	38
4.3 PROCESSUS DE RÉOLUTION	42
4.3.1 INITIALISATION	42
4.3.2 PARAMÈTRES	42
4.3.3 CALCULS EFFECTUÉS.....	42
4.4 AMÉLIORATIONS POSSIBLES	53
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS	55
5.1 PLAN D'EXPÉRIENCE.....	55
5.2 RÉSULTATS ET ANALYSES DE L'EXPÉRIMENTATION.....	56
CHAPITRE 6 CONCLUSION	71
RÉFÉRENCES.....	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Classification des vols de correspondance en type 0, 1 et 2.....	19
Tableau 4.1 Contenu du tableau de la feuille <i>Calculs</i>	43
Tableau 5.1 Description des scénarios	56
Tableau 5.2 Résultats du <i>scénario 1</i>	58
Tableau 5.3 Résultats du <i>scénario 2</i>	58
Tableau 5.4 Résultats du <i>scénario 3</i>	59
Tableau 5.5 Résultats du <i>scénario 4</i>	59
Tableau 5.6 Temps de résolution minimum et maximum de l'application par scénario	69
Tableau 5.7 Résultats des 3 branches de l'arbre pour un retard sur le vol X de 50 minutes	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Segment de vol.....	2
Figure 3.1 Modèle général	15
Figure 3.2 Accélération sur le vol X	17
Figure 3.3 Temps de correspondance minimal (TCM).....	18
Figure 3.4 Schéma d'un retard sur X et ses correspondances Y	19
Figure 3.5 Exemple d'un vecteur de variables binaires	21
Figure 3.6 Création des combinaisons de X et de ses correspondances	22
Figure 3.7 Schéma de tous les niveaux combinés.....	22
Figure 3.8 Exemple d'une itération du modèle.....	23
Figure 3.9 Modèle combiné avec plusieurs itérations.....	24
Figure 3.10 Combinaison du vol X et du vol X'	26
Figure 3.11 Présentation des scénarios possibles pour aucune accélération sur le vol X.....	27
Figure 3.12 Représentation de la solution du vol X'	27
Figure 3.13 Relation entre la quantité de carburant consommée en fonction de l'accélération.....	30
Figure 3.14 Représentation de l'attribution des compensations de base	33
Figure 4.1 Processus utilisé lors de l'application	38
Figure 4.2 Exemple de la feuille <i>Paramètres</i>	42
Figure 4.3 Exemple de la feuille <i>Calculs</i>	46
Figure 4.4 Exemple de la feuille <i>Types</i>	47
Figure 4.5 Exemple de la feuille <i>Accélération</i>	47
Figure 4.6 Exemple de la feuille <i>Énumération</i>	47
Figure 4.7 Exemple de la feuille <i>Passagers ratant leur correspondance</i>	48
Figure 4.8 Exemple de la feuille <i>Temps de correspondance disponible</i>	48

Figure 4.9 Exemple de la feuille <i>Combinaisons</i> Stade 1	49
Figure 4.10 Exemple de la feuille <i>Combinaisons</i> Stade 2	49
Figure 4.11 Exemple de la feuille <i>Réaffectation des passagers Z_i</i>	51
Figure 4.12 Exemple de la feuille <i>Combinaisons</i> Stade 3.....	52
Figure 5.1 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 1.....	62
Figure 5.2 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 2.....	63
Figure 5.3 Coûts total en fonction du retard pour les scénarios 1 et 2	64
Figure 5.4 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 3.....	66
Figure 5.5 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 4.....	66
Figure 5.6 Coûts total en fonction du retard pour les scénarios 3 et 4	67

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'industrie du transport aérien, à laquelle appartient Air Canada, est sujette à un ensemble d'imprévus qui ont pour impact d'engendrer des retards par rapport aux arrivées et départs planifiés des avions. En 2010, Airlines for America (A4A) enregistrait 99 millions de minutes de retard et établissait leurs coûts directs d'exploitation, incluant le carburant, l'équipage, la maintenance, l'avion et d'autres coûts, à 6,5 milliards de dollars. Ceci représentait un coût direct d'exploitation de 65,19 \$ par minute, soit une augmentation de 7 % de plus qu'en 2009. Pour la même année, l'association A4A estimait les coûts additionnels, c'est-à-dire ceux associés aux compensations des voyageurs à 3,3 milliards de dollars. À chaque année, dans cette industrie, les retards représentent des pertes de revenus supplémentaires.

Bien que plusieurs auteurs se soient penchés sur la question, peu d'outils complets existent afin d'assister le personnel opérationnel des compagnies aériennes à réduire les impacts de ces retards et contrôler les coûts qui en découlent. En fait, la complexité de cette problématique réside dans l'interdépendance des activités opérationnelles et des parties prenantes impliquées dans chaque vol. Ainsi, un retard sur un vol peut engendrer des retards en cascade sur d'autres vols qui à leur tour perturbent le départ des autres avions, affectent l'efficacité des opérateurs et engendrent des coûts additionnels. En conséquence, les plans de vols doivent être modifiés et les promesses faites aux clients se voient changées également.

Pour gérer le retard d'un vol, les options offertes aux compagnies aériennes, dont Air Canada, sont plutôt restreintes. D'une part, elles peuvent décider d'accélérer l'avion en retard, dans le but de rattraper partiellement ou entièrement le retard. D'autre part, elles peuvent décider de ne pas réagir et donc, d'assumer totalement les coûts. Dans d'autres cas, les plus extrêmes, il est également possible de faire des détournements ou des annulations de vol. Idéalement, la solution envisageable serait de rétablir le plan de vol prévu au départ, le plus tôt possible, afin de limiter les conséquences des retards et respecter la planification prévue au départ.

1.1 Notion de retard

Cette section vise à définir certaines terminologies qui permettront de faciliter la compréhension globale de l'étude qui suit. Globalement, l'itinéraire d'un passager, qui a des correspondances, est représenté par un minimum de deux segments (voir figure 1.1). Un «segment» est l'unité la plus

granulaire représentant un décollage ou un atterrissage. Il représente, également, une partie de l'itinéraire d'un passager. Ainsi, le passager effectue son premier segment de A vers B, effectue une correspondance à l'aéroport B et entame son prochain segment de B vers C, et ainsi de suite. Une correspondance se définit comme étant un lieu ou un aéroport où le passager débarque pour ensuite compléter son itinéraire. De plus, le sens des flèches représente la direction dans laquelle le vol s'effectue. Le vol 123 est représenté par le segment allant de A vers B. Un vol a plusieurs attributs. Ainsi, il peut être caractérisé par le numéro de vol, la compagnie aérienne qui opère le vol, le type d'appareil, l'origine, la destination, l'heure de départ, l'heure d'arrivée, la date de départ, la date d'arrivée, le nombre de passagers dans chaque classe, etc. Également, chaque passager est associé à un PNR (*Passenger Name Record*) définissant un numéro d'identification unique correspondant à l'achat du ou des billets lorsque plusieurs passagers voyagent ensemble. Il est possible de connaître plusieurs informations sur chaque passager à l'aide de son PNR, incluant celles associées à son vol. Toutes ces caractéristiques permettent d'analyser les retards sur plusieurs niveaux. Par exemple, si le vol 123 est retardé, il est possible de décrire ce retard de manière très spécifique : le vol allant de A vers B est retardé de 20 minutes, il y a 20 passagers dont 15 en classes Y (économique) et 5 en classes J (affaires) qui ont des correspondances sur trois vols différents. Une telle approche permet de décrire ce retard et ses interdépendances avec d'autres vols via les correspondances des passagers affectés.

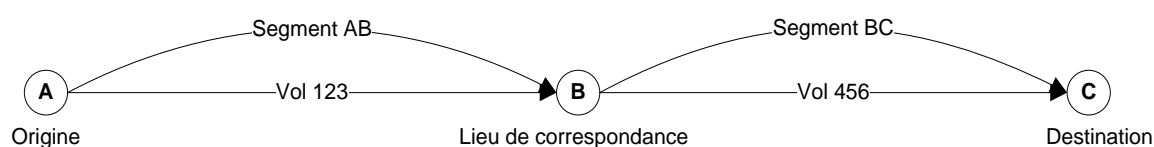


Figure 1.1 Segment de vol

Parallèlement, les retards peuvent aussi être caractérisés selon leur contexte. Selon Cook et Tanner (2009), la gestion des coûts de retards est décrite par phase de vol. Ainsi, ils divisent cette gestion en deux phases : stratégique et tactique. La phase stratégique décrit principalement les ressources requises au stade de la planification et les possibilités de retard connues d'avance. La phase tactique est divisée en trois parties : avant le départ, pendant et après le vol. La phase avant le départ implique les processus de gestion du temps (*slot management process*) et les décisions liées au carburant (*decision point for fuel uplift*). À son tour, la phase pendant le vol implique les ajustements de vitesse et d'itinéraire qui dépendent du trafic aérien, des conditions

météorologiques et du niveau de carburant. Finalement, la phase après le vol représente la gestion des impacts du retard sur l'avion, l'équipage et les passagers. Par conséquent, ces différentes phases permettent de comprendre la notion de retard à différents stades. Évidemment, la pertinence de cette description réside dans le fait qu'à chaque phase, plusieurs options sont offertes afin de réparer ou pallier les inconvénients causés par les retards. Par exemple, dans le cas d'un retard avant le départ, causé par un problème lié à l'appareil aérien, il serait possible de faire un échange entre avions. Bien qu'un retard puisse survenir au départ, cela ne se traduit pas nécessairement par un retard à l'arrivée.

Afin de mieux comprendre la notion de retard, il est important de comprendre que ceux-ci peuvent être provoqués par plusieurs causes. Selon le *Research and Innovative Technology Administration* (RITA)¹, les causes de retard les plus fréquentes sont dues au transporteur aérien, plus précisément à tout ce qui est sous son contrôle : la maintenance, les problèmes liés à l'équipage, le nettoyage des avions, le chargement des bagages, l'alimentation en carburant, etc. Certaines d'entre elles peuvent également être causées par les décisions stratégiques et opérationnelles des compagnies aériennes telles qu'une mauvaise planification des ressources. À l'opposé, les conditions météorologiques, hors du contrôle des compagnies aériennes, peuvent également provoquer des retards. Le trafic aérien, les politiques géographiques, la disponibilité des portes, l'état de la chaussée, les bris mécaniques, le chargement du cargo et des bagages, le retard des autres vols, la sécurité, les politiques internationales et les charges aéroportuaires constituent plusieurs autres causes potentielles. Les retards sont occasionnés par plusieurs d'entre elles et celles-ci peuvent avoir des impacts très importants. La section suivante décrit brièvement les impacts des retards.

1.2 Impacts fréquents des retards

En considérant qu'une minute de retard sur un vol planifié peut empêcher un passager d'embarquer sur son prochain vol, un retard plus élevé peut modifier le déroulement planifié de l'ensemble des opérations. Il est important de comprendre que plus la longueur du retard est

¹ Décrit la performance des vols à temps de juin 2003 à novembre 2011.

importante, plus son impact et les coûts qui en résulteront seront significatifs. De ce fait, un passager qui manque sa correspondance devient un passager à replacer sur un prochain vol. Bien évidemment, si le vol manqué par ce passager est offert à une fréquence élevée, par exemple 10 fois par jour, l'effet du retard peut être absorbé plus facilement, pour ce passager. Par contre, si ce vol est offert à une faible fréquence, voire 4 fois par jour, et que le client doit attendre 6 heures, des coûts tels que les compensations de base, de nourriture et parfois d'hôtel entrent en jeu. Mis à part l'aspect monétaire lié à un passager, il y a aussi la valeur du temps perdu, le coût lié à son insatisfaction et la possibilité de perdre le client pour des vols futurs. En plus des passagers, les retards ont également un impact sur la gestion des bagages et des cargos. En ce qui concerne les équipages, incluant le personnel navigant et le personnel de service, ils doivent être rémunérés pour le temps de service supplémentaire. Également, la notion de légalité des équipages devient problématique. En effet, dans certain cas, des membres de l'équipage deviennent illégaux (lorsque le nombre total d'heures de vol ou le nombre total d'heures consécutives travaillées est dépassé). Dans de tels cas, les employés concernés ne peuvent plus agir dans leur fonction. Ils doivent alors retourner à leur base sur un vol ou des vols en tant que passager ou encore rester au lieu de correspondance pour une période de récupération. De plus, ils doivent être remplacés par d'autres employés qui devront être rémunérés. Dans tous les cas, ceci occasionne des coûts. Dans d'autres cas, un avion en retard peut ne pas avoir de porte assignée afin d'effectuer le débarquement des passagers et peut se voir imposer de voler un temps additionnel causant ainsi des coûts supplémentaires de carburant, du trafic aérien et de la pollution pour l'environnement.

Comme le mentionnent Beatty et al. (1998), il est important de noter que, pour une compagnie aérienne, «la valeur» du retard n'est pas juste comptabilisée en fonction de son effet sur le vol retardé, mais aussi en fonction de l'effet sur l'horaire des opérations planifiées. Lorsqu'un vol est en retard, il peut provoquer un retard sur d'autres vols puisque qu'un avion n'est pas seulement assigné à un seul vol. Ainsi Dunbar et al. (2010) mentionnent que dans les réseaux avec un grand nombre de ressources qui connectent, des retards peuvent se propager très rapidement dans tout le réseau. Cela entraîne des coûts de récupération importants pour une compagnie aérienne. De ce fait, toutes les ressources impliquées dans un seul vol, telles que les équipages, les passagers, les cargos, etc., peuvent être analysées individuellement. Les auteurs expliquent très bien la notion de réseau qui rassemble l'ensemble de ces ressources et qui les considère comme un tout. Bien que la notion d'impact des retards soit importante, les coûts qui en découlent sont encore plus

importants. L'impact des retards amène une notion de coûts supplémentaires très importante. Ces coûts sont évalués à des milliards de dollars, à chaque année. De manière générale, si le retard n'est pas absorbé le plus rapidement possible, cela peut provoquer des retards en cascades et compliquer la planification de toutes les ressources nécessaires au bon fonctionnement de l'ensemble du réseau. Compte tenu de la complexité de cette problématique, la section suivante présente les hypothèses simplificatrices utilisées dans ce projet.

1.3 Hypothèses simplificatrices

Certaines hypothèses ont ainsi été posées afin de simplifier le modèle :

- l'échange de vols entre avions n'est pas une option retenue;
- seuls les impacts sur le coût du carburant associé à une accélération, les passagers et leurs correspondances, les équipages, le prochain vol du même avion sont considérés;
- les annulations et les détournements de vols ne sont pas considérés;
- les impacts des retards sur les bagages, le cargo, la disponibilité des portes et le trafic aérien ne sont pas considérés;
- les coûts liés à l'insatisfaction des passagers sont ignorés dans cette étude.

1.4 Objectif général

Ce mémoire de maîtrise a pour but de développer un ensemble d'outils d'analyse et d'aide à la décision qu'Air Canada pourra mettre en œuvre afin de prendre de meilleures décisions opérationnelles et financières quant à la gestion des vols accusant des retards.

1.5 Objectifs spécifiques

Afin de mener à terme un tel projet, l'élaboration d'objectifs spécifiques est nécessaire. Ainsi, ceux-ci peuvent être décrits comme suit :

1. Analyser, quantifier et modéliser le concept de retard d'un vol et ses coûts directs;
2. Analyser, quantifier et modéliser les coûts d'accélération d'un vol;

3. Modéliser les décisions alternatives impliquées dans la gestion du retard d'un vol et proposer une approche d'optimisation de ces décisions;
4. Implémenter un prototype permettant de tester les modèles et l'approche d'optimisation ainsi développés;

1.6 Structure du mémoire

Les éléments de base concernant les retards ayant été décrits, les chapitres du mémoire sont constitués comme suit. Le chapitre 2 présente la revue de littérature. Le chapitre 3 décrit le modèle proposé pour résoudre la problématique. Le chapitre 4 présente un prototype permettant de trouver les décisions de gestion du retard d'un vol à moindre coût à l'aide d'une application en Visual Basic. Le chapitre 5 présente et analyse les résultats obtenus dans le cadre des simulations. Finalement, le chapitre 6 conclut et propose des nouvelles voies de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans l'industrie aérienne, des perturbations occasionnées soit par des problèmes mécaniques d'avions ou par l'absence d'équipage peuvent survenir et modifier l'horaire des opérations telles que prévues au départ. Clausen et al. (2001) définissent une perturbation comme étant un écart suffisamment important entre l'état actuel des opérations et celui prévu par l'horaire de planification pour qu'il y ait un changement des opérations planifiées. Dans l'industrie aérienne, celles-ci sont communément appelées opérations irrégulières (*irregular operations*). Selon Gang (1998), ces déviations conduisent à un réacheminement des activités dans tout le système de planification des horaires de vols sur trois niveaux : les passagers, les équipages et les avions. Selon Clausen et al. (2001), lorsqu'une perturbation survient pendant le cours des opérations, plusieurs compagnies aériennes résolvent le problème de façon séquentielle selon l'ordre suivant: les avions, les équipages, les opérations au sol et les passagers. Dans le même ordre d'idées, Ball et al. (2007) prétendent que l'horaire des vols est à la base de trois autres types d'horaires : l'horaire des avions, des équipages et l'itinéraire des passagers. De façon générale, dans la littérature, le rétablissement de l'horaire, appelé en anglais *schedule recovery*, peut s'effectuer en analysant un aspect à la fois : soit le rétablissement de l'horaire des avions (*flight recovery*), des équipages (*crew recovery*) et l'itinéraire des passagers (*passenger itineraries*).

En ce qui concerne le rétablissement de l'horaire des avions, les auteurs Teodorovic et al. (1984) ont étudié la situation où un avion est mis hors service et ont fait un effort afin de minimiser les retards des passagers en échangeant et retardant des avions. Jarrah et al. (1993) ont développé un modèle utilisant l'algorithme du chemin le plus court, permettant de résoudre les pénuries d'avion, en retardant des vols, en permettant l'échange entre avions (*swapping*) et l'utilisation de surplus d'avion (*spare aircraft*) jusqu'à ce que le problème soit réglé. Le modèle développé par Yan et al. (1996) représenté par un réseau, permet de traiter une perturbation liée à une panne d'avion. Ainsi, trois stratégies sont prises en compte lors du processus de résolution : les annulations de vol, l'utilisation des surplus d'avions et les retardements de vol. Argüello et al. (1997) proposent des solutions, formulées à l'aide d'un modèle de programmation quadratique, permettant de reconstituer les itinéraires des avions en réponse à des retards au sol. De leur côté, les auteurs Rosenberger et al. (2003) ont développé un modèle permettant de créer un nouvel horaire pour les vols et de réaffecter les avions tout en minimisant les coûts de réaffectation et

d'annulation de vol. Andersson et al. (2004) présente un modèle de réseau permettant d'utiliser l'annulation, le retard et l'échange entre avions afin de résoudre les perturbations liées aux avions. De la même manière, Babic et al. (2011) présentent un outil avancé d'aide à la décision (*advanced decision support system*) dont la fonction est de proposer de nouveaux itinéraires pour les avions, dans les situations où un avion est perturbé, dans le but de minimiser les effets négatifs des perturbations.

En ce qui concerne le recouvrement de l'horaire des équipages, les auteurs Wei et al. (1997) se sont intéressés au problème en essayant de rétablir les horaires des équipages tout en s'intéressant à la légalité des équipages lors de situations irrégulières. Lettovsky et al. (2000) ont développé une solution basée sur des stratégies d'embranchement, qui fournit, presque en temps réel, un plan de relance pour la réaffectation des équipages afin de rétablir un horaire d'équipages perturbé. Également, Yu et al. (2003) propose un système d'aide à la décision, appelé *CrewSolver* et développé pour Continental Airlines, ayant pour but de générer de façon optimale, ou presque, un plan de rétablissement pour l'équipage lors de situations irrégulières. Enfin, à l'aide d'un algorithme génétique, les auteurs Guo et al (2005) traitent le problème de rétablissement des horaires d'équipages comme un modèle de partitionnement, où une liste de vols est donnée et doit être affectée à un certain nombre de membres de l'équipage.

En ce qui concerne le rétablissement, ou recouvrement, des correspondances des passagers, dans la littérature, les articles trouvés sont très récents et généralement ne traitaient pas seulement du recouvrement des passagers, sans poser des actions sur les horaires de vol. Par contre, Kohl et al. (2004) soulignent que les objectifs de la gestion des perturbations sont de : respecter la promesse faite au client, minimiser les coûts réels supplémentaires des équipages, des compensations, des hôtels et des accommodations pour les passagers et les équipages, des billets d'avion sur d'autres compagnies aériennes, et finalement retourner à la planification prévue le plus tôt possible.

Traditionnellement, dans l'industrie aérienne, les compagnies se souciaient principalement de rétablir l'horaire des avions. Cependant, la pression sur la compétitivité des compagnies les pousse désormais à rétablir simultanément l'ensemble des opérations liées aux avions, aux équipages et aux passagers. Teodorovic et Stojkovic (1995) ont développé un modèle heuristique basé sur le principe du « premier arrivé, premier sorti » (FIFO) et d'une approche séquentielle basée sur la programmation dynamique. Plusieurs fonctions objectifs sont énumérées

et chacune d'entre elles une priorité est associée. La résolution débute en trouvant une solution à la fonction objectif ayant la première priorité et ensuite les autres sont résolues séquentiellement. Ainsi, celui-ci permet de produire un nouvel horaire de vols, une nouvelle rotation de l'équipage et des avions. Également, la maintenance et les heures d'opérations des aéroports sont prises en compte. Mathaisel (1996) présente une application avec des interfaces graphiques, combinée à des fonctions d'optimisation pour l'affectation des avions à des vols, la maintenance, les équipages et les portes d'embarquement. Avec toutes ces composantes, cela crée un système de prise de décisions efficace pour le contrôle des horaires. Si les coûts sont mis à jour, cette application permet d'obtenir des résultats réalisables et optimaux quant à l'affectation des avions et des équipages, lorsque des problèmes opérationnels perturbent l'exécution de l'horaire planifié. Par contre, on ne tient pas compte des inconvénients occasionnés aux passagers. Stojkovic et al. (2002) considèrent le problème du *Day of Operations Scheduling* (DAYOPS) consistant à déterminer les changements à apporter en temps réel aux horaires des compagnies aériennes lorsque des perturbations surviennent. L'objectif de ce problème est de minimiser les inconvénients à la clientèle et les coûts pour la compagnie aérienne. Leur contribution a été de modéliser et de résoudre de manière optimale en temps réel le DAYOPS lorsque des perturbations mineures se produisent. Leur modèle consiste plus précisément, à préserver l'horaire des vols et l'itinéraire des équipages et seulement les arrivées et les départs peuvent être modifiés en même temps que la durée des vols, le service au sol, la planification de la maintenance et les vols de correspondance des passagers. Bratu et Barnhart (2006) présentent des modèles et algorithmes permettant de développer simultanément des plans de recouvrement pour les avions, les équipages et les passagers en déterminant quels seront les vols à retarder et à annuler. L'objectif est de minimiser les coûts opérationnels et d'estimer les coûts qu'occasionnent les retards et des perturbations du point de vue des passagers. Soulignons que dans leur résolution, ils incluent également les réglementations liées aux équipages et les exigences en maintenance des avions. Toutefois, leur modèle qui tient compte des coûts de retards sur les passagers ne peut pas être utilisé en temps réel compte tenu du temps de résolution trop élevé. Lan et al. (2005) proposent deux nouvelles approches afin de minimiser la perturbation des passagers. La première, formulée comme un problème de programmation linéaire mixte avec des données d'entrées générées aléatoirement, vise à réduire la propagation du retard en réaffectant les avions perturbés sur d'autres vols. La seconde est de considérer les

passagers ratant leur vol, dû à un temps de correspondance insuffisant, en retardant le départ de certains vols. Castro et Oliveira (2007) ont mis sur pieds un système distribué à base d'agents qui représentent les divers rôles existant dans le centre de contrôle opérationnel aérien (*Airline Operations Control Center*). Celui-ci considère plusieurs bases opérationnelles, et pour chaque type de problèmes opérationnels, il y a plusieurs agents logiciels spécialisés qui mettent en œuvre des approches heuristiques, des modèles mathématiques de recherche opérationnelle, ainsi que des algorithmes d'intelligence artificielle. Ces agents spécialisés rivalisent pour trouver la meilleure solution à chaque problème. Bien que cette méthode permette de trouver des solutions admissibles, elle n'intègre pas l'impact sur les avions, les équipages et les passagers en un seul problème. Chaque problème est résolu de manière individuelle. Abdelghany et al. (2008) présentent un outil d'aide à la décision afin de rétablir les horaires des compagnies aériennes lors d'opérations irrégulières appelé *DStar (Decision Support Tool for Airlines schedule Recovery)*. Le modèle d'optimisation cherche à trouver le plan optimal d'échange entre équipages et avions. Les principales contributions de cet outil sont les suivantes : il intègre des décisions pour les multiples ressources aériennes, telles que les pilotes et les agents de bord par exemple, avec des contraintes d'horaires différentes, il fournit de nouveaux plans de vol et il récupère les vols avec des problèmes de ressources en fonction de leur heure du départ. Il permet d'obtenir, presque en temps réel, un plan afin de rétablir la situation. Cet outil considère la légalité des équipages. Bien que selon plusieurs auteurs les retards soient utilisés de manière stratégique, par exemple pour minimiser les conséquences des perturbations, dans d'autres cas, les retards doivent être résolus à leur tour. Selon Babic et al. (2011) les résultats de perturbations sont des retards et des annulations de vol. Beatty et al. (1998) proposent le concept du multiplicateur de retard (*delay multiplier*). Celui-ci est basé sur la longueur du retard initial et le moment dans la journée où il survient. Le concept du multiplicateur de retard peut être considéré comme la valeur, qui, lorsqu'elle est multipliée par le retard initial, permet d'estimer les retards potentiels en aval. En raison de sa complexité, l'effet des opérations sur les passagers, du fret et de la disponibilité des portes n'ont pas été considérés. Wang et al. (2003) démontrent comment leur modèle peut être appliqué afin de mieux comprendre la propagation de retards à partir d'aéroports spécifiques du système d'espace aérien national (NAS). Ainsi, ils étudient l'effet du retard sur l'horaire planifié des vols. D'un autre côté, Abdelghany et al. (2004) présentent un modèle, utilisant l'algorithme du plus court chemin, permettant de projeter en aval l'impact de retards et signale quels seront les

impacts de ceux-ci sur les avions et les équipages en introduisant des irrégularités dans les opérations. En réponse à leur modèle, générant des retards sur les vols, cela permettra aux contrôleurs aériens de réagir et de créer des solutions. Bien que le modèle soit très pertinent, plusieurs variables, telles que le temps de taxi (*taxi time*) et les temps de vol, sont considérées comme des variables aléatoires. Partant de ce fait, plusieurs auteurs se sont consacrés à la résolution des problèmes liés aux retards et à leurs coûts. Cook et al. (2004) ont développé une méthode permettant de calculer les coûts de retard par segment de vol décrits comme suit : les retards au sol, pendant le roulage (*taxiing*) et pendant le vol. Pour chacun des segments, trois scénarios de coûts (faibles, de base, élevés) et deux catégories de retard (moins de 15 minutes et plus de 65 minutes) ont été considérés. Les coûts de retard (évalués en coût marginal) impliquaient, par segment de vol, les coûts du carburant et de la maintenance, les coûts supplémentaires liés à l'équipage et aux passagers, et d'autres types de coûts tels que le stationnement, les redevances aéroportuaires, la manutention, etc. En fait, leur modèle est très pertinent puisqu'il englobe plusieurs types de coûts. Par contre, pour chacun d'entre eux, ils ont ajouté des multiplicateurs fixes de retard (un ratio) en euros par minute. Également, les auteurs ont proposé deux méthodes de calculs des coûts. La première ne tient pas compte de la dépendance entre chacun des types de coûts (chaque catégorie de coût est bien distincte) et la seconde englobe l'ensemble des coûts. Cook et al. (2009) ont développé un outil d'aide à la décision pour la gestion des coûts de retard avant le départ et pendant que l'avion est en vol. Un outil dynamique représentant l'accélération de l'avion (*cost index*) permet de comparer le carburant supplémentaire consommé dû à une accélération par rapport à l'impact environnemental. L'estimation dynamique des coûts de retard des passagers, le rattrapage du retard et le contrôle du trafic aérien sont les principales contraintes. Ainsi, les opportunités à court terme pour économiser du carburant et/ou réduire les impacts environnementaux sont identifiés. L'aspect très intéressant invoqué par ces auteurs est l'environnement. Par contre, il serait très intéressant d'y ajouter l'impact du retard sur les passagers et les équipages. Dans un même ordre d'idées, Dunbar et al. (2010) introduisent une nouvelle approche permettant de calculer et de minimiser le coût de la propagation du retard, en réaménageant l'horaire des avions. Afin de compléter leur modèle, ce dernier devrait considérer les passagers. Ball et al. (2010) présentent un rapport analysant une variété de composantes des coûts causés par les retards de vol, incluant les coûts pour les compagnies aériennes, les coûts liés aux passagers, le coût de la demande

perdue, ainsi que l'impact indirect sur l'économie des États-Unis. Cette étude emploie plusieurs méthodes novatrices pour évaluer l'ampleur de ces coûts. En particulier, les estimations des coûts liés aux passagers, qui reconnaissent que les annulations de vol et les correspondances manquées peuvent entraîner des retards importants de passagers. D'un autre côté, Jafari et Hessameddin Zegordi (2011) se sont intéressés au problème en créant un modèle mathématique permettant le recouvrement des avions et des passagers simultanément. Leur modèle examine la possibilité de décalage de vols (*flight re-timing*), l'échange entre avions, le *ferrying*, l'utilisation d'avions de réserve, l'annulation et la réaffectation des passagers afin de générer un plan efficace de rétablissement de l'horaire de vols. Ainsi, il a pour but de minimiser les coûts opérationnels quant au rétablissement de l'horaire des avions, aux annulations et retards de vols et à la réaffectation des passagers. Certaines limitations font partie du modèle. Le délai maximum autorisé pour un seul vol, le temps minimum requis pour chaque vol et chaque avion, ainsi que le temps minimum de correspondance des passagers sont fixes. Leur modèle demeure très pertinent, par contre les équipages n'ont pas été considérés. Inspiré par Cook et al. (2009), le modèle que nous proposons dans ce travail introduit la notion d'accélération. Cette dernière est cependant considérée comme une variable de décision. Plus précisément, une accélération (en minutes) correspond à un ajustement de vitesse calculé à l'aide des données du plan de vol. La pertinence d'une accélération, dans notre cas, peut permettre de rétablir l'horaire planifiée au départ. Également, comme plusieurs auteurs l'ont souligné, les avions, les équipages et les passagers demeurent les principales ressources affectées par un retard. Ainsi, dans le cadre du projet les coûts pour chacune de ces catégories seront considérés. Nous proposons un modèle énumératif prenant la forme d'un arbre de décisions à trois niveaux. Chaque niveau de cet arbre considère un ensemble discret et fini de décisions alternatives concernant un sous-ensemble spécifique de variables de décision. Par exemple, un chemin entre la racine (c.-à-d. le haut de l'arbre) et une feuille (c.-à-d. chaque point en bas de l'arbre) représente l'ensemble des décisions associées à un scénario (solution) possible. Le premier niveau de cet arbre présente les différentes possibilités discrètes d'accélération de l'avion sur le vol en retard, c'est à dire le vol sur lequel un retard est initialement observé. Le deuxième niveau concerne l'accélération des vols de correspondance des passagers du vol en retard. Finalement, le troisième niveau porte sur les passagers à réaffecter sur d'autres vols lorsque la correspondance n'a pu s'effectuer. En pratique, il existe, un quatrième niveau qui considère l'ensemble des décisions alternatives à prendre pour la gestion du prochain

vol sur lequel sera affecté l'avion associé au vol en retard. Ce niveau implique une modélisation des décisions similaire à celle du premier niveau. Autrement dit, les niveaux 1, 2 et 3 représentent l'ensemble des décisions de gestion d'un seul et même niveau de récursivité.

Une fois que toutes les combinaisons de solutions possibles sont générées, les coûts de chacune d'entre elles sont calculés. Ceux-ci se divisent en trois catégories : les coûts supplémentaires de carburant liés à une accélération, les coûts supplémentaires des équipages et les coûts liés aux passagers englobant les compensations de base, pour la nourriture, pour les hôtels ainsi que les coûts de réaffectation des passagers.

En ce qui concerne les coûts de carburant, il est possible d'accélérer le vol en retard et les vols de correspondances ainsi que le prochain vol du même avion et les vols de correspondances qui lui sont associés. Ceux-ci sont évalués en dollars/kg de carburant consommé.

En ce qui concerne les coûts supplémentaires des équipages ils sont calculés en fonction du nombre d'heures supplémentaires travaillées (évalué par un taux horaire) et également, une probabilité d'illégalité des équipages est prise en compte. Celle-ci permet d'ajouter des coûts d'illégalité.

En ce qui concerne les coûts de réaffectation des passagers, une probabilité de manquer la correspondance est ajoutée et calculée en fonction de données historiques. Celle-ci permet de tenir compte des temps de correspondance serrés pour lesquels il serait possible aux passagers d'embarquer sur leur prochain vol, et donc de déterminer pour quel passager les compensations (de base, pour la nourriture et pour les hôtels) seront versées ainsi que de procéder à leur réaffectation sur d'autres vols. Si le temps d'attente entre deux vols est supérieur à 48 heures, alors le passager est réaffecté sur une autre compagnie aérienne. Également, notre modèle permet non seulement d'énumérer les passagers à réaffecter, s'il y a lieu, mais il offre une solution de réaffectation. En ce sens, il énumère quels passagers seront réaffectés et sur quel vol.

Le prochain chapitre, présente le modèle d'optimisation développé ainsi que tous les coûts qui ont été considérés dans l'étude.

CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU MODÈLE

Dans le présent chapitre, le modèle utilisé pour résoudre la problématique est présenté. La section 3.1 présente la structure du modèle. La section 3.2 explique de manière approfondie comment les décisions alternatives de gestion sont générées. Finalement, la section 3.3 décrit l'ensemble des coûts considérés, tant au niveau de l'impact d'un retard qu'au niveau de l'accélération d'un vol.

3.1 Modèle général

Cette section présente le modèle général des décisions de gestion d'un retard et de leurs relations entre elles. Afin de simplifier les explications, notons X le vol (ou segment) (α, β) entre les villes α et β et Y_i (où $i=1, \dots, n$) les vols (ou segments) en partance de la ville β pour lesquels les passagers du vol X ont une correspondance. De la même manière, notons Z_i , un vol (ou segment) similaire à Y_i (mêmes villes de départ et d'arrivées), et pouvant servir à réaffecter un passager manquant sa correspondance sur Y_i . Dans le cadre général de ce modèle, Z_i peut être similaire à Y_i sans nécessairement avoir le même trajet. Par exemple, un passager planifié pour le segment Y_i , pourrait éventuellement être réaffecté sur un trajet différent offert par la compagnie aérienne et ayant la même destination finale désirée par le passager. Finalement, notons X' le vol en partance de β auquel l'avion du vol X est immédiatement affecté après le vol X . Ce modèle prend la forme d'un arbre de décisions à trois niveaux de décisions. Chaque niveau de cet arbre considère un ensemble discret et fini de décisions alternatives concernant un sous-ensemble spécifique de variables de décision, tel qu'illustré à la Figure 3.1. Par exemple, un chemin entre la racine (c.-à-d. le haut de l'arbre) et une feuille (c.-à-d. chaque point du bas de l'arbre) représente l'ensemble des décisions associées à un scénario possible. Le premier niveau de cet arbre présente les différentes possibilités discrètes d'accélération du vol X , c'est à dire le vol sur lequel un retard est observé. En d'autres termes, ce modèle ne considère qu'un sous-ensemble spécifique de scénarios d'accélération du vol X séparé de σ minutes dans l'exemple de la Figure 3.1.

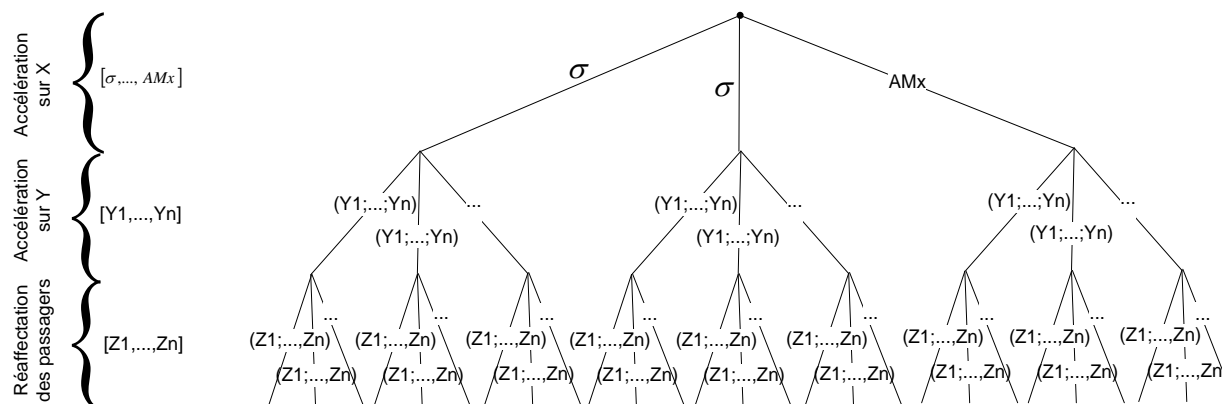


Figure 3.1 Modèle général

Le deuxième niveau concerne l'accélération des vols de correspondance, soit Y_i , et le troisième niveau porte sur les passagers à réaffecter sur d'autres vols, c'est à dire Z_i , lorsque la correspondance n'a pu être faite. Les sous-sections qui suivent décrivent chacun de ces niveaux.

Au premier niveau de l'arbre de décisions, on ne considère que les différentes accélérations possibles pour l'avion du vol X. Le niveau maximal d'accélération (noté AM_x) est fonction du type d'avion et de la durée du vol. Au second niveau, on considère l'ensemble des alternatives consistant à retarder le départ du vol Y_i et à l'accélérer dans les airs afin de rattraper ce retard et éviter de provoquer des retards en cascade à l'arrivée de Y_i . Finalement, le troisième niveau décrit les décisions de réaffectation des passagers ayant manqué leurs correspondances vers Y_i à de nouveaux vols de correspondance, c'est-à-dire les vols Z_i .

En pratique, il existe, un quatrième niveau qui considère l'ensemble des décisions alternatives à prendre pour la gestion du vol X' et pour ses vols de correspondances soient Y'_i . Nous verrons plus tard que ce niveau implique une modélisation des décisions similaire à celle du premier niveau. Autrement dit, les niveaux 1, 2 et 3 représentent l'ensemble des décisions de gestion d'un seul et même niveau de récursivité. Ainsi, à cause de la propagation de l'impact potentiel d'un retard sur les vols dépendants, ces trois niveaux de décisions peuvent théoriquement concerner chacun des vols affectés par le retard initial. Dans le cadre de l'application présentée à la Figure 3.1, seuls deux niveaux récursifs ont été modélisés (vols X, Y_i , X' et Y'_i).

Afin de simplifier le modèle du problème de gestion des retards, un ensemble d'hypothèses supplémentaires à celles déjà proposées ont été posées. Ainsi:

- Toutes des décisions d'accélération des vols ont été discrétisées, afin de ne considérer qu'un sous-ensemble fini de décisions d'accélération alternatives. Dans le cadre des exemples graphique présentés, les accélérations possibles ont été considérées à toutes les minutes.
- On ne permet pas de retarder le départ d'un vol Y_i si on ne peut pas rattraper ce retard par l'accélération maximale de l'avion. Tel que discuté ci-dessus, ceci a pour but d'éviter de créer un effet domino qui aurait pour conséquence d'engendrer des retards sur d'autres vols.
- Tous les vols Z_i sur un horizon de 48 heures sont considérés. Au-delà de cette période, les passagers seront réaffectés sur des vols appartenant à d'autres compagnies aériennes.

3.2 Explication du modèle

Les explications du modèle proposé sont divisées en deux grandes sections. L'explication du modèle débutera par l'analyse du vol X pour se terminer avec l'analyse du vol X'. À chaque vol correspond premièrement un horaire utilisé par les compagnies aériennes. Ensuite, en fonction des conditions de vols (en temps normal cela inclut principalement les conditions météorologiques), un plan de vol est créé pour chaque vol afin de définir comment se déroulera ce dernier. Air Canada classe les retards de deux façons : les retards au départ et les retards à l'arrivée. Un retard au départ pourrait, par exemple, être causé par un bris mécanique et un départ à l'arrivée pourrait être causé par de mauvaises conditions météorologiques pendant le vol. Lorsqu'un retard a lieu sur le vol X (ce retard correspond ici à un retard estimé en fonction des conditions du vol X et éventuellement des conditions au sol), le nouveau temps d'arrivée est égale au temps planifié plus le retard estimé R_x (voir Figure 3.2). Afin de minimiser l'impact financier de ce retard, ce vol a la possibilité d'être accéléré d'une certaine quantité A_x , jusqu'à concurrence du nombre de litres de carburant qu'il y a à bord de l'avion ainsi que sa vitesse maximale, AM_x . (on fait ici un abus de langage car en réalité l'accélération représente le nombre de minutes qu'on peut rattraper grâce à une accélération de l'avion). Cette quantité de carburant dépend du type d'appareil, du temps de vol, des conditions météorologiques, etc. Chez Air Canada, cette information est connue lorsque le plan de vol est créé. Ainsi, lorsqu'une décision

d'accélération du vol X est prise, le nouveau temps d'arrivée est égale au temps planifié plus le retard estimé R_x , moins l'accélération A_x considérée.

Ces informations sont décrites au niveau 1 de la Figure 3.2. Chaque branche de l'arbre représente ainsi une décision d'accélération alternative. Bien qu'il soit possible d'estimer différents niveaux d'accélération, seules les accélérations à toutes les minutes (par exemple) seront considérées à ce niveau. Ceci permet de diminuer considérablement le nombre de combinaisons de décisions possibles sans toutefois affecter le niveau de précision des décisions. Par exemple, si le vol X est en retard de 30 minutes et que le nombre de litres de carburant permet d'avoir une accélération maximale de 15 minutes, on considèrera les accélérations suivantes : 0 (aucune accélération) à 15 minutes par bonds de 1 minute. Dans ce cas, malgré un retard de 30 minutes, la possibilité d'agir sur ce retard, en accélérant, est de le réduire d'au plus 15 minutes. La Figure 3.2 représente le schéma d'une accélération où R_x représente le retard.

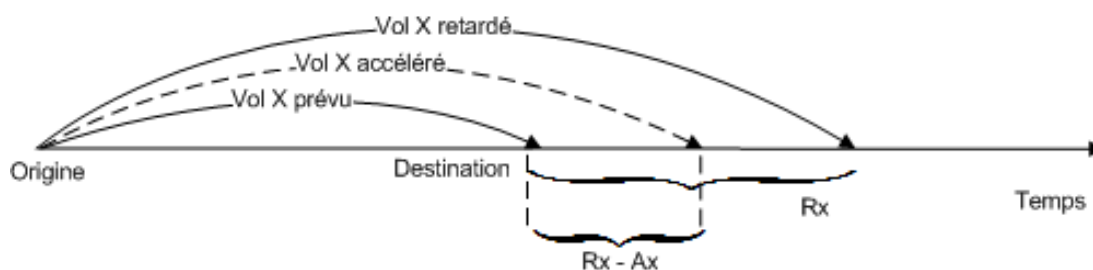


Figure 3.2 Accélération sur le vol X

Prendre une décision d'accélération du vol X nécessite de considérer les prochains vols (correspondances) des passagers à bord du vol X. En effet, dans le cas où tous les passagers à bord habitent à la destination du vol X (aucune correspondance) et qu'un retard survient, outre l'insatisfaction des passagers causée par une heure d'arrivée retardée et qu'aucun n'impact est observé sur le prochain vol du même avion, aucune raison ne peut motiver une compagnie aérienne d'accélérer. Autrement dit, l'accélération du vol X a pour but de permettre de respecter l'horaire planifié des passagers à bord qui ont une correspondance.

Suite aux accélérations possibles décrites dans le niveau 1, il est également possible de retarder le départ des vols Y_i et de les accélérer par la suite de façon à récupérer en vol leur retard pour éviter des retards en cascade. Ainsi, par hypothèse, un retard d'un vol Y_i est permis uniquement si ce dernier peut être récupéré en vol grâce à l'accélération de l'avion. Ces décisions, qui sont influencées par les décisions prises au niveau 1, sont modélisées au deuxième niveau. Chaque

branche appartenant au niveau 2 décrit, pour chaque accélération A_X du vol X, correspond à l'ensemble des décisions alternatives concernant les retards/accélérations de chaque vol Y_i . En effet, la compagnie aérienne dans une telle situation doit prendre une décision pour chaque vol Y_i qu'elle contrôle. Par exemple, si peu ou pas de passagers à bord du vol X ont une correspondance sur le vol Y_4 , il n'est peut-être pas justifié financièrement de retarder et accélérer ce vol. Cette décision est donc contextuelle aux conditions de retard du X et des temps de correspondance de chaque vol Y_i .

Ainsi, lorsqu'un passager a une correspondance, ce dernier a un temps de correspondance (TC), schématisé par la Figure 3.3. Ce temps correspond à la différence entre le départ du vol suivant et l'arrivée du vol qui le précède, selon l'itinéraire du passager. En fonction de la configuration des portes de chaque aéroport, les passagers en correspondance ont un temps de correspondance minimal (TCM) pour se rendre à leur prochain vol. En général, Air Canada établit le temps de correspondance minimal à l'aide des facteurs suivants : l'origine du premier vol, la destination du vol suivant et l'aspect physique de l'aéroport. Ainsi, le TCM est différent pour chaque origine-destination. Lorsque le temps de correspondance spécifique d'un passager est plus grand ou égale au TCM, alors ce dernier aura le temps nécessaire afin d'effectuer sa correspondance. Dans certains cas, l'inspection des passagers lorsqu'ils arrivent aux douanes, peut aussi être un facteur qui pourrait faire varier le TCM.

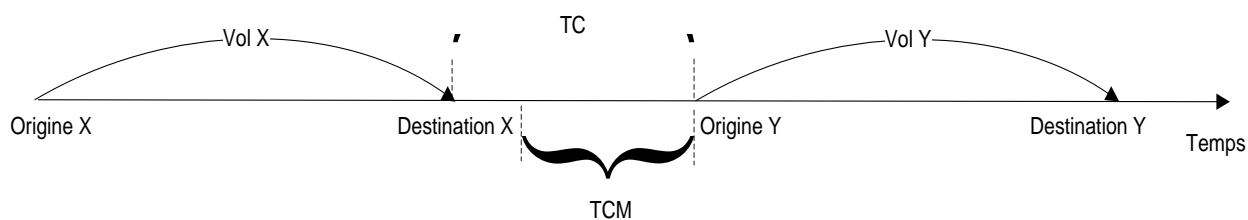


Figure 3.3 Temps de correspondance minimal (TCM)

Par exemple, supposons que le vol X arrive en retard et que les passagers de ce vol aient des correspondances respectives sur 6 autres vols que nous appellerons : Y_1 , Y_2 , Y_3 , Y_4 , Y_5 et Y_6 . La Figure 3.4 schématise cet exemple et permet de voir l'effet du retard sur le temps de correspondance minimal des correspondances. Ici, les passagers en correspondance vers tous les vols vont pouvoir faire leur correspondance, à l'exception du vol Y_1 , où le temps pour aller de la porte d'arrivée du vol X vers la porte de départ du vol Y_1 est inférieur à TCM_{Y_1} .

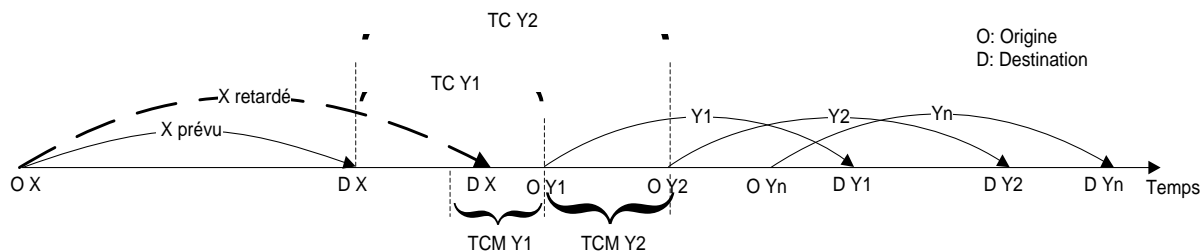


Figure 3.4 Schéma d'un retard sur X et ses correspondances Y

Dans un contexte où il est nécessaire de retarder les vols en correspondance d'un temps permettant de satisfaire uniquement le temps de correspondance minimum, le niveau 2 permet de décrire les retards/accélérations possibles sur ces correspondances (Y_i) pour rattraper le retard.

Dans le but de mieux comprendre les décisions de rattrapage du retard à considérer, nous proposons une classification de l'état possible des correspondances en fonction de la situation, et notamment des temps de correspondance minimum à respecter. Le Tableau 3.1 présente cette classification qui permet ainsi de connaître les options d'accélération possibles pour chaque correspondance afin de rattraper le retard.

Tableau 3.1 Classification des vols de correspondance en type 0, 1 et 2

Type de la correspondance	Impact du retard	Temps de correspondance minimal (TCM)	Accélération sur X (en minutes)	Accélération sur Y (en minutes)	Réaffectation des passagers
0	Nul	Respecté	Aucune		Aucune
1	Moyen	Respecté pour une accélération A_x donnée	Possible et permet de rattraper entièrement le retard		Aucune
2	Élevé	Non respecté malgré l'accélération maximum A_x	Possible mais ne permet pas de faire la correspondance		Nécessaire

Premièrement, si une correspondance est à l'état 0 pour un retard de X donné, cela signifie que les passagers ayant la correspondance considérée pourront prendre leur vol sans problème. De la même manière, si la correspondance est à l'état 1, cela signifie que les passagers ayant cette correspondance ne pourront prendre leur vol que si X est accéléré et/ou Y est retardé et accéléré.

Enfin, le type 2 signifie qu'avec la possibilité d'accélérer au maximum le vol X et au maximum le vol Y, le passager devra être réaffecté à un autre vol ou sur une autre compagnie aérienne dans certains cas. Il est important de noter que cette classification est fonction de l'accélération du vol X considérée. De manière générale, plus l'accélération du vol X est grande, moins il est nécessaire de retarder/accélérer les vols de correspondance.

Une fois l'état de la correspondance connu pour une accélération de X donnée, les décisions de retarder/accélérer les vols de correspondance Y_i dont l'état est 1 sont modélisées par des variables binaires (1 représente la décision de retarder/accélérer Y_i , 0 représente la décision de ne rien faire). Il est en effet inutile de retarder/accélérer les vols de correspondance dont l'état est 0, et nous ignorons volontairement le retard/accélération des vols de correspondance dont l'accélération maximum ne permet pas de rattraper tout le retard nécessaire pour couvrir le retard de X. Afin d'illustrer cela, considérons l'exemple suivant où, pour une accélération nulle du vol X, les correspondances Y_1 et Y_2 sont de type 2, les correspondances Y_3 , Y_4 et Y_5 sont de type 1, et la correspondance Y_6 est de type 0. Ainsi, pour chacun des vols Y_3 , Y_4 et Y_5 , il est possible soit de les retarder/accélérer, soit de ne rien faire. Il est donc possible d'énumérer toutes les combinaisons admissibles pour une accélération donnée sur le vol X. Ainsi, pour une accélération de X spécifique, le nombre de combinaisons des décisions possibles concernant les Y_i est 2^n , n étant le nombre de correspondances où l'accélération est possible. La Figure 3.5 illustre une des combinaisons possibles pour le vecteur de décisions où, par exemple, tous les vols Y_3 , Y_4 et Y_5 sont accélérés. En réalité, le nombre réel de combinaisons sera inférieur au nombre de combinaisons possibles. En effet, si l'état du vol est de type 0 (les correspondances pourront s'effectuer) ou 2 (la correspondance est impossible même en accélérant), la variable binaire associée à ce vol sera toujours égale à 0, Ainsi, si m vols parmi les n ont un état 0 ou 2, alors le nombre réel de vecteurs sera 2^{n-m} .

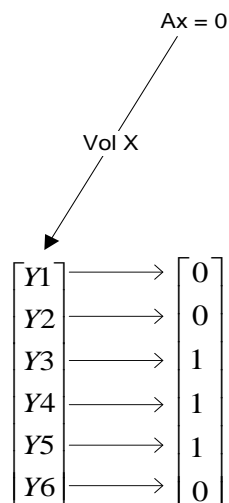


Figure 3.5 Exemple d'un vecteur de variables binaires

L'exemple présenté à la Figure 3.6, indique la possibilité de 8 combinaisons (ici $n = 6$ et $m = 3$, alors $2^{n-m} = 2^3 = 8$). Compte tenu que ces combinaisons sont en pratiques peu nombreuses, on peut les énumérer et fixer ainsi la valeur des variables binaires. Chaque combinaison décrit ainsi une branche du niveau 2 associée à une accélération donnée du vol X (niveau 1). Le nombre de combinaisons totales, lorsque toutes les itérations sont terminées, est représenté par la somme de toutes les branches de l'arbre de chacune des accélérations du vol X. En analysant la première combinaison de la Figure 3.6, les variables des vols Y_3 , Y_4 et Y_5 prennent la valeur 1, cela signifie que le départ de ces vols de correspondances sera retardé et que l'avion devra accélérer pour rattraper ce retard. Les passagers éviteraient ainsi d'être réaffectés à un autre vol. En revanche, dans la combinaison 4, les paramètres prennent tous la valeur 0, signifiant qu'aucune accélération ne sera faite sur les vols de correspondances. La lecture de la combinaison 2, en intégrant le vol X devient donc, pour une accélération sur X égale à 0, il est possible d'accélérer les correspondances Y_3 et Y_4 .

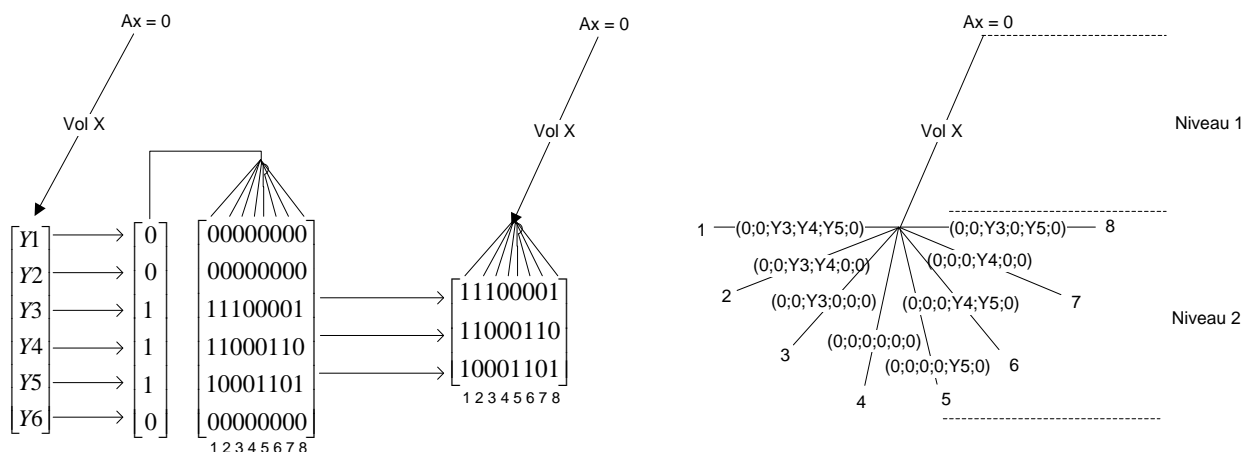


Figure 3.6 Création des combinaisons de X et de ses correspondances

Une fois les niveaux 1 et 2 traités, le niveau 3 considère le cas des passagers qui manquent leur correspondance sur le vol Y_i et qui doivent être réaffectés sur les vols Z_i . Dans la classification des types d'état, le type 2 associé à certains vols de correspondances, permet d'identifier les passagers qui devront être réaffectés. Ainsi, dans cet exemple, les correspondances Y_1 et Y_2 étaient de type 2 et les passagers de ces vols seront donc réaffectés. Dans la Figure 3.7, le niveau 3 est ajouté à l'arbre de décisions afin d'avoir un schéma général du modèle.

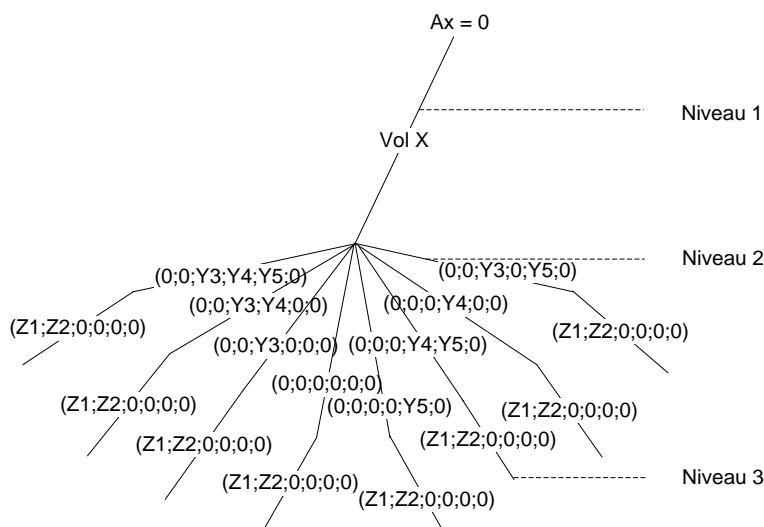


Figure 3.7 Schéma de tous les niveaux combinés

Dans le cadre de l'utilisation de cet arbre de décisions, en combinant les niveaux deux et trois, il est possible de faire des itérations pour chaque accélération de X pour calculer les coûts pour

chaque solution potentielle. En d'autres termes, suite à un changement d'accélération sur le vol X (niveau 1), il est possible qu'une correspondance de type 1 devienne de type 0 et celle de type 2 devienne de type 1. À chacune des branches du niveau 1, le tableau des types de correspondance est systématiquement remis à jour. Par conséquent, pour chaque branche d'accélération du vol X, on peut obtenir un sous-ensemble de solutions. En intégrant tous ces sous-ensembles sur chaque accélération de X, on peut obtenir toutes les solutions possibles. En se référant à l'exemple énuméré ci-dessus, mais en considérant une accélération sur le vol X égale à 5 minutes, la Figure 3.8 présente l'exemple d'une itération. Dans celle-ci, les passagers de la correspondance Y_1 doivent être réaffectés, les vols Y_2 et Y_3 sont de type 1 et les vols Y_4 , Y_5 et Y_6 sont de type 0. Plus l'accélération sur le vol X augmentera, plus le nombre de correspondances ratées diminuera, et lorsque l'accélération maximale de X sera atteinte, l'horaire prévu au départ sera rétabli.

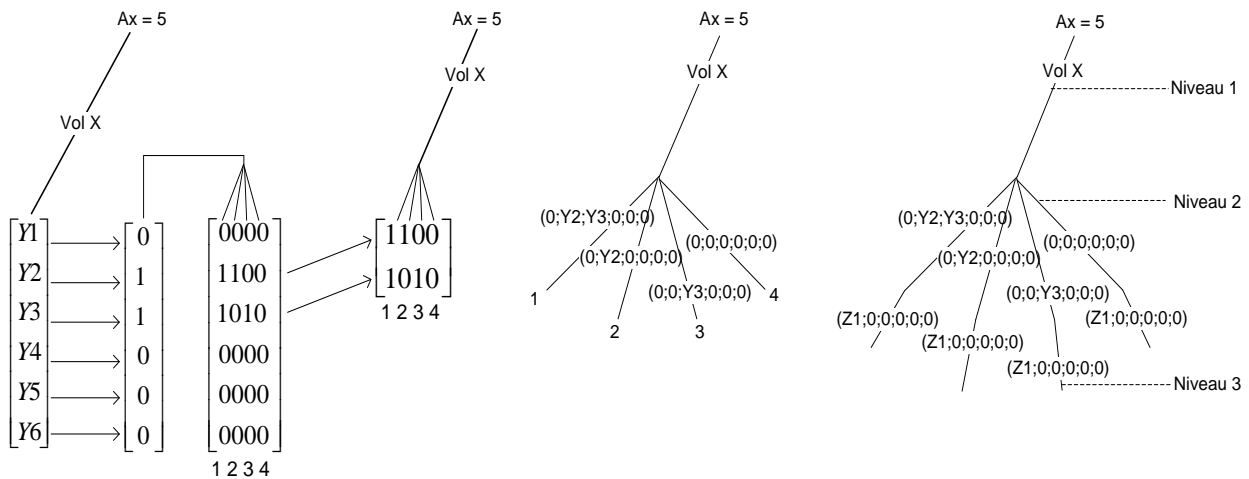


Figure 3.8 Exemple d'une itération du modèle

En combinant les deux branches d'accélération de X discutées ci-dessus (c'est à dire aucune accélération et une accélération de 5 minutes), on obtient les deux branches de gauche sur l'arbre des décisions illustré à la Figure 3.9. Ce processus itératif continuera tant que la valeur de l'accélération maximale de X ne sera pas atteinte. De cette manière, l'ensemble des solutions possibles sera énuméré.

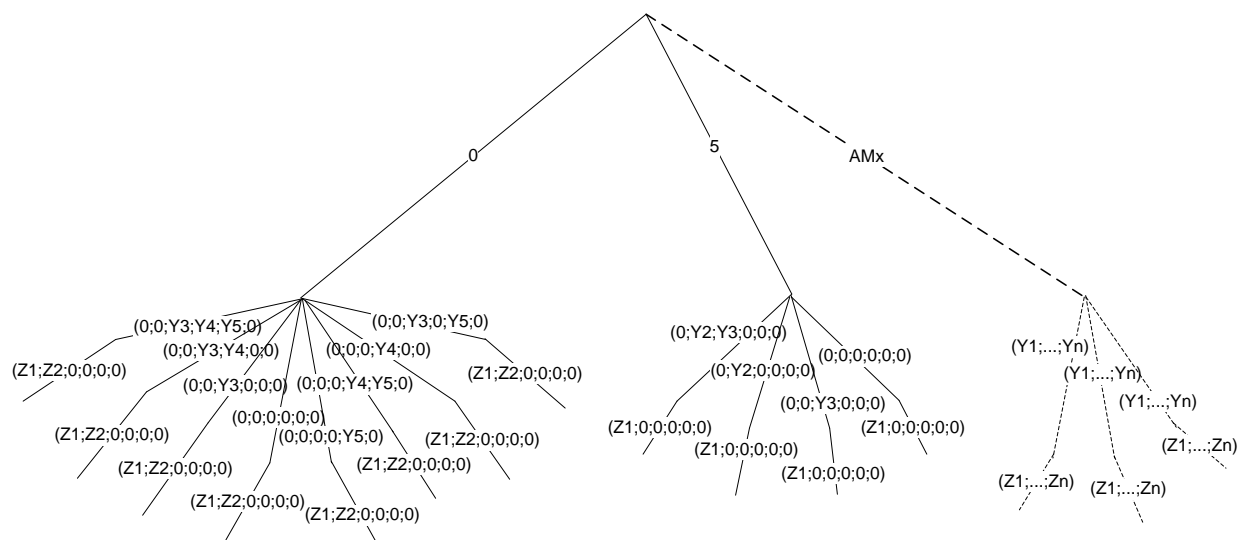


Figure 3.9 Modèle combiné avec plusieurs itérations

Les trois niveaux précédents concernaient les décisions prises sur le vol X, les vols de correspondances Y_i et la réaffectation des passagers n'ayant pu assurer leur correspondance sur les Z_i . Toutefois, une autre caractéristique n'a pas encore été traitée. En effet, l'avion effectuant le vol X est par la suite affecté à un autre vol. Partant de ce fait, on ajoute à cet arbre un quatrième niveau qui gère les décisions qui doivent être prise pour ce second vol qui a été défini comme étant X'.

Air Canada définit la durée d'escale (*turn around time*) comme étant le temps nécessaire pour effectuer le débarquement et l'embarquement des passagers, des bagages et du cargo entre deux vols d'un même avion. Ce temps inclut également le nettoyage de l'avion, le remplissage de l'eau et du carburant. Il est déterminé en fonction du lieu de correspondance et du type d'avion. Celui-ci est différent pour chaque origine-destination et doit également être respecté. Il est similaire au temps de correspondance minimal des passagers. Ainsi, plus le retard sur le vol X sera grand, plus il risque d'avoir un impact sur la durée d'escale et sur le vol X'. Afin de connaître quel est l'impact du retard du vol X sur le vol X', le calcul suivant est effectué :

$$\text{Retard sur le vol } X' = (\text{Heure de départ prévue du vol } X' - \text{Heure d'arrivée prévue du vol } X) + \text{Retard sur le vol } X + \text{Durée d'escale} - \text{Accélération sur le vol } X$$

Supposons que l'heure de départ du vol X' soit prévue à 15h00, que l'heure d'arrivée du vol X est prévue à 14h00, qu'il y a un retard de 30 minutes sur le vol X, que la durée d'escale est de 45

minutes et qu'il n'y a aucune accélération sur le vol X. Partant de cet exemple, l'heure de départ vol X' devra être déplacée à 15h15, soit 15 minutes de plus que ce qui était prévue. À cet effet, les possibilités de rattraper le retard sur le vol X' sont liées à deux options : l'accélération du vol X et l'accélération du vol X'. Ainsi, à chaque fois que les vols X ou X' sont accélérés, le retard sur le vol X' diminue de la longueur de cette l'accélération.

Dans l'exemple énuméré plus haut, si l'accélération sur le vol X passait de 0 à 15 minutes, malgré un retard de 30 minutes, il n'y aurait aucun changement quant à l'heure de départ prévue sur le vol X', soit 15h00.

Il est également possible de combiner une accélération de 10 minutes sur le vol X et une accélération de 5 minutes sur le vol X' pour arriver au même résultat. Une fois que le retard sur le vol X' est calculé en fonction des décisions affectant l'arrivée du vol X, le quatrième niveau d'évaluation peut être créé. Évidemment, les décisions qui seront prises sur le vol X' dépendent de celles prises sur le vol X. Ainsi, le retard calculé agit comme paramètre d'entrée à l'arbre de décisions qui sera créé pour le vol X'. Les trois niveaux de décisions seront répétés, comme ils l'ont été pour le vol X, en tenant compte des décisions prises sur le vol X, avec les niveaux correspondants : les accélérations possibles du vol X', les accélérations des vols de correspondances Y'_i ainsi que les correspondances devant être réaffectées, notées Z'_i .

Lorsque l'arbre de décisions est créé (voir Figure 3.10) pour le vol X', la solution $S[X']$ comprenant les décisions à prendre sur le vol X', les Y'_i et les Z'_i ayant les coûts les plus faibles (le calcul des coûts sera expliqué dans la prochaine section) est ajoutée à toutes les feuilles de l'arbre qui correspondent à l'accélération donnée du vol X.

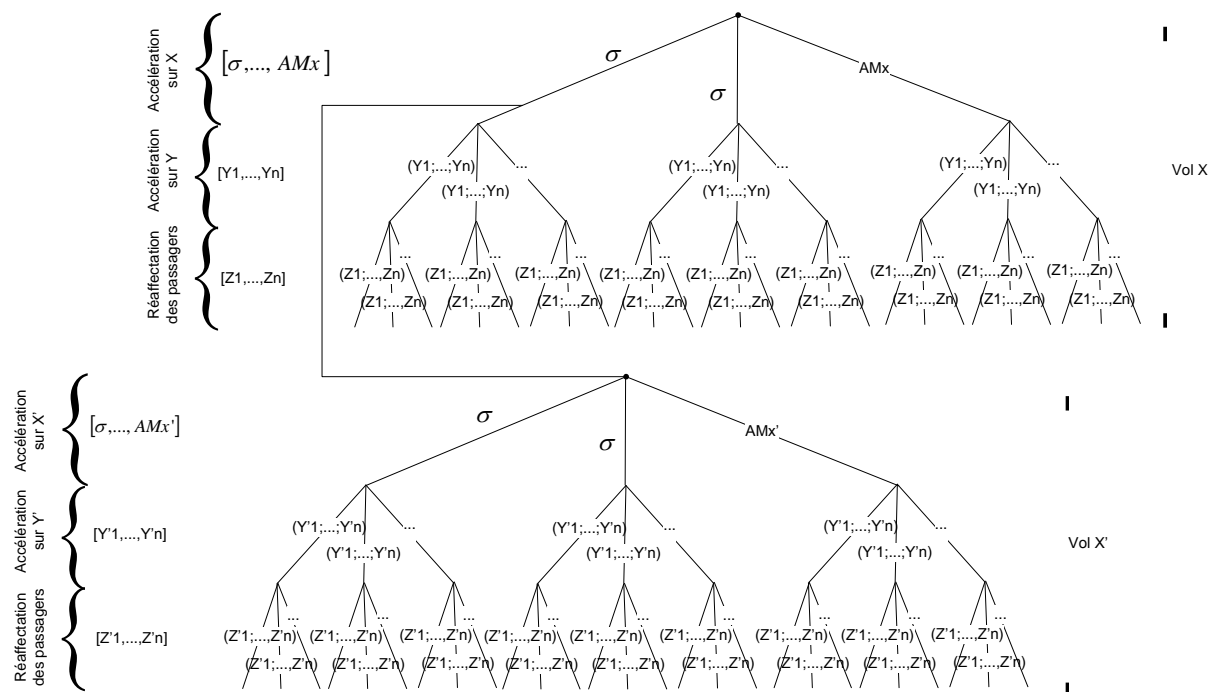


Figure 3.10 Combinaison du vol X et du vol X'

Ce modèle inclut donc 6 niveaux de décisions et est principalement utilisé afin d'énumérer l'ensemble des scénarios possibles dans le but de rattraper un retard. Chaque scénario décrit les actions possibles. Chaque scénario est représenté par un chemin partant de la racine de l'arbre de décisions et se terminant à une feuille de ce dernier.

Afin de mieux illustrer les scénarios, des valeurs fictives ont été ajoutées sur les arêtes de l'arbre présenté dans la Figure 3.11. Ainsi, il y a 8 scénarios. Le scénario 1 se lit comme suit : aucune accélération n'est faite sur le vol X, les accélérations sont de respectivement 15, 20 et 25 minutes pour les correspondances Y_3 , Y_4 , et Y_5 , et pour les correspondances Y_1 et Y_2 il y a respectivement 2 et 1 passagers qui seront réaffectés sur les vols Z_1 et Z_2 . Pour chacun des scénarios, les solutions du vol X' ayant les coûts les plus faibles, pour chaque retard du vol X, sont ajoutées à la suite des solutions du vol X.

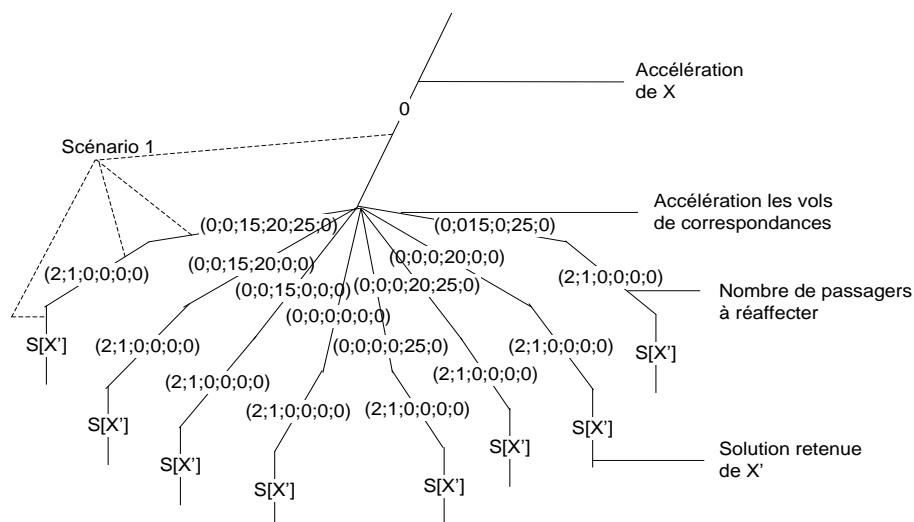


Figure 3.11 Présentation des scénarios possibles pour aucune accélération sur le vol X

La solution retenue pour X' ($S[X']$) est construite de manière similaire à celle de X . Elle décrit l'accélération sur le vol X' , les accélérations des vols de correspondances Y'_i ainsi que les passagers devant être réaffectés sur les vols Z'_i (voir Figure 3.12)

Lorsque l'ensemble des scénarios est généré, il devient possible d'attribuer des coûts à chacun d'entre eux. La section suivante présente comment les coûts sont considérés. Elle présentera les coûts de carburant pour les accélérations, autant sur les vols X et X' et leurs vols de correspondances Y_i et Y'_i , les coûts des équipages ainsi que les coûts des passagers. La prochaine section présente comment ces coûts sont calculés.

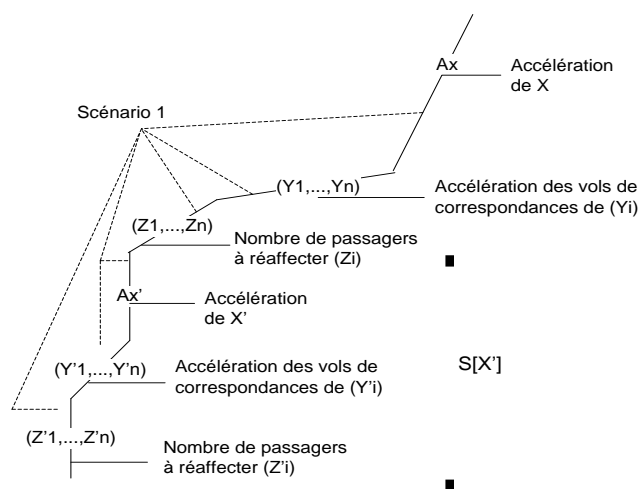


Figure 3.12 Représentation de la solution du vol X'

Lorsque l'ensemble des scénarios est généré, il devient possible d'attribuer des coûts à chacun d'entre eux. La section suivante présente comment les coûts sont considérés. Elle présentera les coûts de carburant pour les accélérations, autant sur les vols X et X' et leurs vols de correspondances Y_i et Y'_i , les coûts des équipages ainsi que les coûts des passagers. La prochaine section présente comment ces coûts sont calculés.

3.3 Évaluation des coûts

La création d'un modèle général représentant l'ensemble des solutions admissibles est la première partie de la résolution de la problématique. Cependant, chacune des solutions doit être liée à des coûts afin d'en déterminer son impact monétaire. Afin d'adapter le modèle aux contraintes réelles se trouvant chez Air Canada, dans les prochaines sous-sections les types de coûts qui ont été considérés dans cette étude et les hypothèses qui ont été posées sont décrits. Les principaux coûts qui sont à l'étude sont les coûts liés aux carburants, aux passagers et aux équipages.

3.3.1 Coûts liés au carburant

Les coûts de carburant sont liés aux accélérations possibles sur les vols X, X' et leurs correspondances Y et Y'. Plusieurs informations contenues dans le plan de vol de chacun des vols permettent d'évaluer le coût du carburant pour une série d'accélérations possibles jusqu'à l'accélération maximale. Les informations contenues dans celui-ci sont énumérées comme suit : la compagnie qui opère le vol, le numéro et la date du vol, l'origine et la destination, le type d'appareil, le temps requis pour l'avion pour se rendre au décollage (*Taxi out*) et pour se rendre à la porte après l'atterrissage (*Taxi in*) et le temps de vol complet planifié incluant le temps requis pour l'avion de se rendre au décollage, la montée, la vitesse de croisière (vitesse de l'avion lorsqu'il atteint l'altitude), la descente et le temps pour se rendre à la porte après l'atterrissage. À l'exception de ces informations, dans le plan de vol, les informations qui permettent de créer une courbe liée aux coûts de carburants sont les suivantes:

TV_{α}^{plan} : Temps de vol en minutes basé sur la vitesse de croisière planifiée dans le plan de vol (*Flown time*)

QC_{α}^{plan} : Quantité de carburant consommée en kilogrammes à la vitesse planifiée dans le plan de vol (*Flown fuel*)

TV_{α}^{acc} : Temps de vol en minutes estimé pour une vitesse prévue afin de déterminer la vitesse lors d'accélération (*Optimal time*)

QC_{α}^{acc} : Quantité de carburant consommée en kilogrammes durant la croisière à une vitesse prévue afin de déterminer la vitesse lors d'accélération (*Optimal fuel*)

Les autres informations nécessaires à la création du modèle mathématique du coût du carburant sont les suivantes :

A_v : Accélération sur le vol v où $v \in \{X, X', Y_1, \dots, Y_n, Y'_1, \dots, Y'_n\}$

α : Coût du carburant en dollars par kilogramme

CTC : Coût total du carburant lié aux accélérations en dollars

Le modèle mathématique du coût lié au carburant est le suivant :

$$CTC(A_v) = (QC_v^{acc} - QC_v^{plan}) * \alpha$$

$$A_v = TV_v^{plan} - TV_v^{acc}$$

$$QC_v^{acc} = f_v(A_v)$$

$$QC_v^{plan} = f_v(0)$$

Ainsi, il est possible de créer un graphique représentant une courbe de consommation du carburant telle qu'illustrée à la Figure 3.13. Le nombre de courbes variera selon le nombre de vols à l'étude.

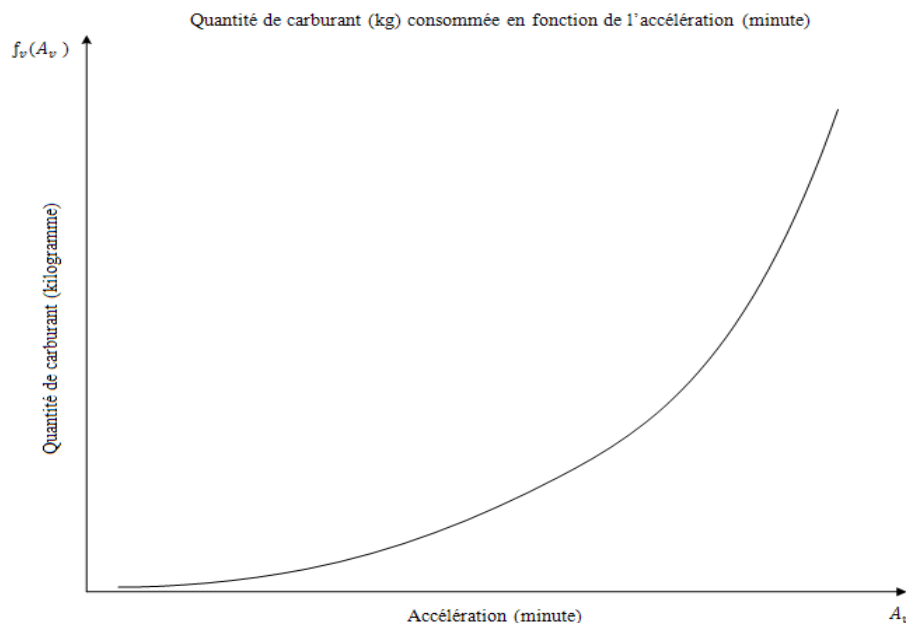


Figure 3.13 Relation entre la quantité de carburant consommée en fonction de l'accélération

3.3.2 Coûts liés aux passagers

Lorsque les accélérations ne suffisent pas à rattraper le retard, certains passagers se voient réaffecter à des prochains vols. Principalement, une réaffectation est effectuée lorsque le temps de correspondance minimal (TCM) n'est pas respecté. Par contre, cela ne signifie pas nécessairement que tous les passagers réaffectés le seront. Par exemple, en supposant qu'un passager ait un TCM de 30 minutes et qu'à cause du retard, celui-ci n'a que 29 minutes pour embarquer dans son prochain vol, il pourrait en réalité avoir le temps de s'y rendre. On appellera temps de correspondance disponible (TCD) la valeur du TCM lorsqu'il est affecté par le retard. Dans l'exemple précédent, le temps de correspondance disponible est de 29 minutes. En d'autres termes, la théorie veut que lorsque que le TCM n'est pas respecté, on suppose que tous les passagers ratent leur correspondance. Ce nombre sera représenté par $NP_{k,v}$ dans modèle des coûts qui sera élaboré plus bas. En pratique, ce n'est pas le cas. En effet, plus le temps de correspondance disponible est inférieur au TCM, plus la probabilité qu'un passager soit réaffecté à un prochain vol sera grande. Nous allons donc intégrer cette probabilité dans le calcul des coûts. Le calcul de cette probabilité (basé sur des données historiques) est fourni par Air Canada et ne fait pas partie de ce mémoire. Afin d'illustrer la notion de probabilité, imaginons un exemple où un TCM de 40 minutes est normalement nécessaire pour que les 20 passagers

affectés à une correspondance puissent embarquer sur leur prochain vol. Si le TCM est supérieur au temps de correspondance disponible, alors on présume que 100% des 20 passagers pourront faire leur correspondance sans problème. Toutefois, si le temps de correspondance disponible est de 35 minutes et que nous savons qu'en fonction des données historiques, 5 % des passagers ratent leur correspondance lorsqu'il n'y a que 35 minutes pour une correspondance, alors on peut considérer que 5 % du nombre de passagers au lieu de 100% théorique sera effectivement réaffecté, donc 1 passager seulement. En fait, cette étape vise principalement à estimer le nombre de passagers pour lequel des coûts supplémentaires seront versés.

De ce fait, les compensations sont versées aux passagers par rapport à la longueur du temps d'attente avant d'être réaffecté à un prochain vol. Le temps d'attente d'un passager est représenté par la différence de temps entre l'heure de départ du vol suivant et l'heure d'arrivée du vol qui le précède. Dans certains cas, les temps d'attente peuvent être très élevés et dans d'autres cas, très faibles. Par exemple, certains vols sont offerts à une fréquence très élevée, voire jusqu'à 24 fois par jour. Dans ces cas, le passager doit attendre au plus 1 heure avant son prochain vol. D'autres, par contre, sont offerts une fois par semaine. Lorsque les vols sont offerts à des fréquences très faibles, une réaffectation lorsque des retards sont très élevés peut même amener à un remboursement du billet d'avion. De plus, les coûts sont choisis en fonction de la classe de la cabine (*cabin class*) des passagers. Les coûts liés aux passagers se divisent en quatre grandes catégories : les compensations de base, pour la nourriture, pour les hôtels et les coûts de réaffectation sur d'autres compagnies aériennes. Les compensations sont offertes en fonction des intervalles de temps d'attente que subissent les passagers. Aucune compensation n'est versée pour un temps d'attente inférieur à 120 minutes. En ce qui concerne les compensations liées aux hôtels, elles ne sont pas versées dans tous les cas. La compensation pour les hôtels est versée au passager seulement lorsque le prochain vol qu'on peut lui réaffecter est le lendemain. Par exemple, si un passager doit attendre 250 minutes et que son départ pour le prochain vol est fixé à 18h30 aucune compensation d'hôtel n'est versée. En revanche, si son départ pour le prochain vol est le lendemain à 6h30, la compensation pour l'hôtel est versée. La compensation est un montant fixe et n'est pas cumulative. Finalement, la réaffectation des passagers est possible pour une période maximale de 48 heures, après cette période, ils sont réaffectés sur d'autres compagnies aériennes. Pour chaque origine-destination, les coûts de réaffectation varient. Également, lorsque

les passagers sont réaffectés, ils ne sont pas nécessairement tous réaffectés sur les mêmes vols, cela dépend de la capacité des vols et des places disponibles.

Voici le modèle mathématique des coûts liés aux passagers :

$NP_{k,v}$: Nombre de passagers de classe k où $k = \{Y, J\}$ qui manquent leur correspondance théoriquement sur le vol v où $v \in \{Y_1, \dots, Y_n, Y'_1, \dots, Y'_n\}$

Y : Classe économique

J : Classe affaire

$P_{k,v}$: Proportion des passagers de classe k qui manquent leur correspondance sur le vol v

$NPC_{k,v}$: Nombre de passagers de classe k qui recevront des compensations étant donné qu'ils ont manqué leur correspondance sur le vol

v : Heure d'arrivée du vol v où $v \in \{X, X'\}$

HD_v : Heure de départ du vol v où $v \in \{Y_1, \dots, Y_n, Y'_1, \dots, Y'_n\}$

$t_{v\alpha}$: Temps d'attente en minutes du passager avant d'être réaffecté sur son prochain vol v où $v \in \{Z_1, \dots, Z_n, Z'_1, \dots, Z'_n\}$

Variables de décisions :

$$\delta_{Cb,k}^{ti} = \begin{cases} 1, & \text{si } t_{i-1} \leq t \leq t_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\delta_{Cn,k}^{ti} = \begin{cases} 1, & \text{si } t_{i-1} \leq t \leq t_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\delta_{Ch,k}^{ti} = \begin{cases} 1, & \text{si } t_{i-1} \leq t \leq t_i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\delta_{Cr,k}^t = \begin{cases} 1, & t \geq 48 \text{ heures} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

Cb_k^{ti} : Compensation de base (Cb) en dollars versés aux passagers de la classe k en fonction du temps d'attente t où $i = \{0, 1, 2, \dots, I\}$

Cn_k^{ti} : Compensation pour la nourriture (Cn) en dollars versés aux passagers de la classe k en fonction du temps d'attente t où $i = \{0, 1, 2, \dots, I\}$

Ch_k^{ti} : Compensation pour l'hôtel (Ch) en dollars versés aux passagers de la classe k en fonction du temps d'attente t où $i = \{0, 1, 2, \dots, I\}$

Cr_k^{ti} : Coût de réaffectation sur une autre compagnie aérienne (Cr) en dollars payés par passager de la classe k en fonction du temps d'attente t où $i = \{0, 1, 2, \dots, I\}$

CTP: Coûts total en dollars liés aux compensations versées aux passagers et à leur réaffectation sur une autre compagnie aérienne

Le graphique de la Figure 3.14 est un exemple illustrant la manière dont les coûts sont calculés pour les compensations de base, où $T = \{0, 60, 120, 180, \dots\}$. En fait, les coûts liés à la nourriture et pour l'hôtel sont très similaires à celui-ci, puisque tous les coûts sont attribués par intervalle de temps. En ce qui concerne les coûts de réaffectation sur une autre compagnie aérienne, ceux-ci dépendent de l'origine-destination et de la classe de la cabine du passager.

Tout d'abord, le nombre de passagers totaux du vol v qui manquent leur correspondance est évalué comme suit :

$$NPC_{k,v} = NP_{k,v} * P_{k,v}$$

Ensuite, le temps d'attente est calculé afin de connaître dans quel intervalle d'attente en minutes, le passager du vol α se retrouve. Celui-ci est représenté comme suit :

$$t_v = HD_v - HA_v$$

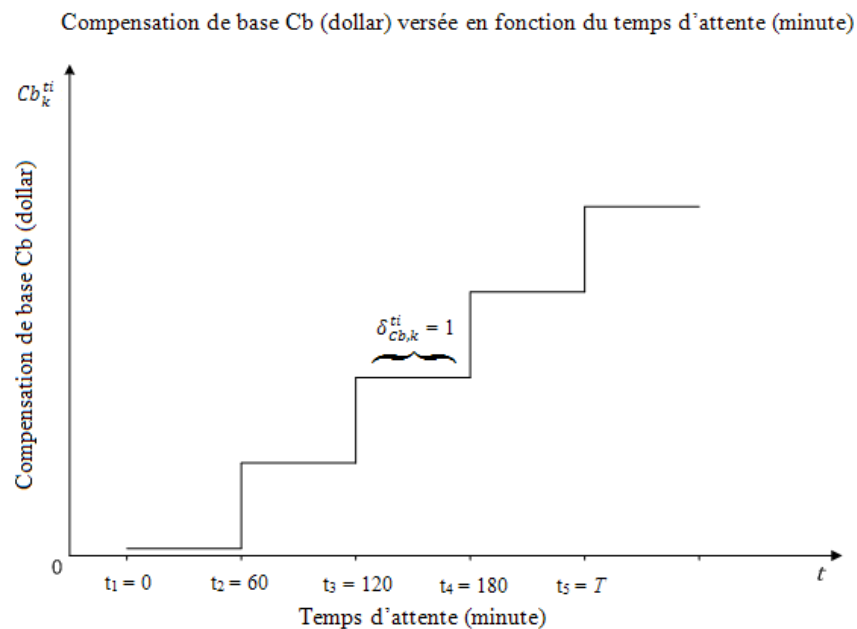


Figure 3.14 Représentation de l'attribution des compensations de base

Finalement, il est possible de déterminer quels seront les coûts attribués aux passagers en sommant les coûts des compensations de base pour la nourriture et pour l'hôtel de chaque passager comme suit :

$$CTP = NP_{\delta,k,v} * \sum_{\forall ti \in T} (\delta_{Cb,k}^{ti} * Cb_k^{ti}) + (\delta_{Cn,k}^{ti} * Cn_k^{ti}) + (\delta_{Ch,k}^{ti} * Ch_k^{ti}) + (\delta_{Cr,k}^t * Cr_k^{ti})$$

3.3.3 Coûts liées aux équipages

Les coûts liés aux équipages sont calculés en fonction du retard observé sur le vol X qui sera versé en temps supplémentaire de service de deux catégories de personnel: le personnel navigant et le personnel de service. Les données fournies par Air Canada concernant le personnel navigant incluent le type d'avion, le temps de vol, la route utilisée (si c'est un vol au Canada, vers les États-Unis, l'Asie, l'Atlantique, etc.), le nombre de capitaines, le nombre de premiers officiers (*first officer*) et le nombre de pilotes de relève (*relief pilot*) nécessaires.

Pour chaque type d'avion et chaque vol, ces informations varient. Concernant le personnel de service, les informations utilisées pour calculer leurs coûts sont les suivantes : le type d'avion, la configuration de l'avion (le nombre de sièges disponibles pour chacune des classes), le temps de vol, la route utilisée, le nombre de directeurs de service (*service director*) et le nombre d'agents de bord nécessaire. Pour chacune des catégories et chaque type d'avion, un coût global incluant tous les membres en service régulier est attribué à chaque minute de retard supplémentaire. Ces coûts ont été donnés par Air Canada et ils sont calculés en fonction de données historiques. Ils incluent l'ancienneté du personnel, des qualifications détenues (selon le type d'appareil aérien), du nombre d'heures travaillées, du nombre minimal d'heures à payer, des conventions collectives, etc. Par exemple, s'il y a un retard de 30 minutes, un coût supplémentaire de 30 minutes multiplié au taux horaire évalué pour l'ensemble des membres de l'équipage d'un type d'avion est ajouté.

Dans certain cas, des membres de l'équipage deviennent illégaux (le nombre total d'heures de vol ou le nombre total d'heures consécutives travaillées est dépassé). Afin de considérer cette situation, des coûts supplémentaires d'illégalité ont été ajoutés et ils sont les mêmes qu'en service régulier. Par contre, compte tenu que ce n'est pas tout l'équipage qui deviendra illégal et seulement certains d'entre eux, une probabilité de devenir illégal, faisant partie de nos hypothèses, générée aléatoirement entre 0 et 100 %, a été ajouté au modèle pour chaque type d'avion. Par exemple, pour un Airbus A320, si le retard est de 30 minutes, que le taux horaire de l'équipage en service régulier est de 150 \$ (coût fictif) par heure de service et que la probabilité

qu'un membre d'équipage devienne illégal est de 20 %, alors 15 \$ supplémentaires sont ajoutés aux coûts des équipages pour un montant total de 165 \$.

Dans le modèle de coût présenté ci-dessous, le coût du personnel navigant inclut celui des capitaines, des premiers officiers et des pilotes de relève et le coût des agents de bord inclut celui des agents de bord et des directeurs de service.

Le modèle mathématique pour calculer les coûts des équipages est le suivant :

R_v : Retard en minutes sur le vol v où $v = \{X, X'\}$

RA_v : Retard en minutes suite à une accélération en minutes sur le vol v

$CP_{v,\gamma}$: Coût horaire en dollars du personnel navigant, en service régulier, sur le vol v avec un type d'avion $\gamma = \{Embraer, A319, A320, A321, A330, B767, B777\}$

$A = Airbus$ et $B = Boeing$

$PIP_{v,\gamma}$: Probabilité en pourcentage liée à l'illégalité du personnel navigant sur le vol v avec un type d'avion γ

$CA_{v,\gamma}$: Coût horaire en dollars du personnel de service, en service régulier, sur le vol v avec un type d'avion γ

$PIA_{v,\gamma}$: Probabilité en pourcentage liée à l'illégalité du personnel de service sur le vol v avec un type d'avion γ

CTE : Coût total en dollars liés aux équipages

Il est nécessaire de connaître la durée du retard en minutes sur lequel les honoraires supplémentaires seront calculés. Ainsi, celui-ci se calcule comme suit :

$$RA_v = R_v - A_v$$

La formule représentant les coûts totaux liés aux équipages est décrite comme suit :

$$CTE = \frac{RA_v}{60} * (CP_{v,\gamma} + CA_{v,\gamma}) + (CP_{v,\gamma} * PIP_{v,\gamma}) + (CA_{v,\gamma} * PIA_{v,\gamma})$$

Finalement, l'évaluation des coûts totaux (CT) incluant chacune des catégories de coûts, soit le carburant, les passagers et les équipages, se calcule comme suit :

$$\begin{aligned}
CT = & (QC_v^{acc} - QC_v^{plan}) * \alpha + NP_{\delta,k,v} * \sum_{ti \in T} (\delta_{Cb,k}^{ti} * Cb_k^{ti}) + (\delta_{Cn,k}^{ti} * Cn_k^{ti}) + \\
& (\delta_{Ch,k}^{ti} * Ch_k^{ti}) + (\delta_{Cr,k}^t * Cr_k^{ti}) + \frac{RA_\alpha}{60} * (CP_{v,\gamma} + CA_{v,\gamma}) + (CP_{v,\gamma} * PIP_{v,\gamma}) + (CA_{v,\gamma} * \\
& PIA_{v,\gamma})
\end{aligned}$$

Également, elle peut être simplifiée comme suit :

$$CT = CTC + CTP + CTE$$

Dans ce chapitre, nous avons illustré la procédure utilisée afin d'énumérer tous les scénarios possibles pour réagir au retard d'un vol. Nous avons également décrit la structure de coûts utilisée. Dans le prochain chapitre, nous décrivons les composantes principales du prototype développé à l'aide de Visual Basic utilisé dans le cadre des expérimentations.

CHAPITRE 4 IMPLÉMENTATION

Dans cette étude, l'utilisation de Visual Basic Application (VBA) a permis d'implémenter un prototype permettant de valider et de tester le modèle et l'approche d'optimisation développée. Bien que le modèle soit complexe, cette application permet, par son approche énumérative de l'ensemble des solutions, de connaître le scénario (solution) optimal offert à Air Canada lorsqu'un retard survient. La section 4.1 présente le processus utilisé, la section 4.2 explique quelles sont les données nécessaires au fonctionnement du processus (intrants) et finalement la section 4.3 explique comment le processus fonctionne depuis son initialisation jusqu'à la création de l'ensemble des solutions.

4.1 Présentation du processus

La Figure 4.1 présente le processus utilisé afin d'énumérer l'ensemble des solutions. Chaque étape agit de manière spécifique. L'étape *Calculs* est centrale puisque toutes les autres activités découleront d'elle. La Figure 4.1 permet de schématiser l'ensemble des données utilisées lors de l'application et d'illustrer leurs fonctions. Tout d'abord, les intrants sont les données nécessaires au fonctionnement de l'application. L'étape *Transformation* utilise les intrants pour effectuer les calculs nécessaires à la création et l'évaluation des divers scénarios. Les résultats de ces calculs sont sauvegardés sur différentes feuilles Excel identifiées à cet effet.

Finalement, les extrants représentent l'ensemble des scénarios possibles. Il est important de comprendre qu'une feuille Excel est un lieu où l'information est entreposée, traitée ou enregistrée. Tous les intrants sont disponibles sur des feuilles Excel. La transformation effectue le traitement des données et les enregistre sur d'autres feuilles Excel. Finalement, les extrants sont les feuilles où l'information est enregistrée.

Dans le cas du processus, on y retrouve 25 feuilles (chaque boîte est une feuille et chaque tiret dans les cases des intrants en est une également, en excluant initialisation). La section 4.2 décrit les intrants. C'est l'étape cruciale à la compréhension du fonctionnement du processus. La section 4.3 explique le processus de résolution. La section 4.4 décrit les améliorations possibles que l'on pourrait apporter au modèle.

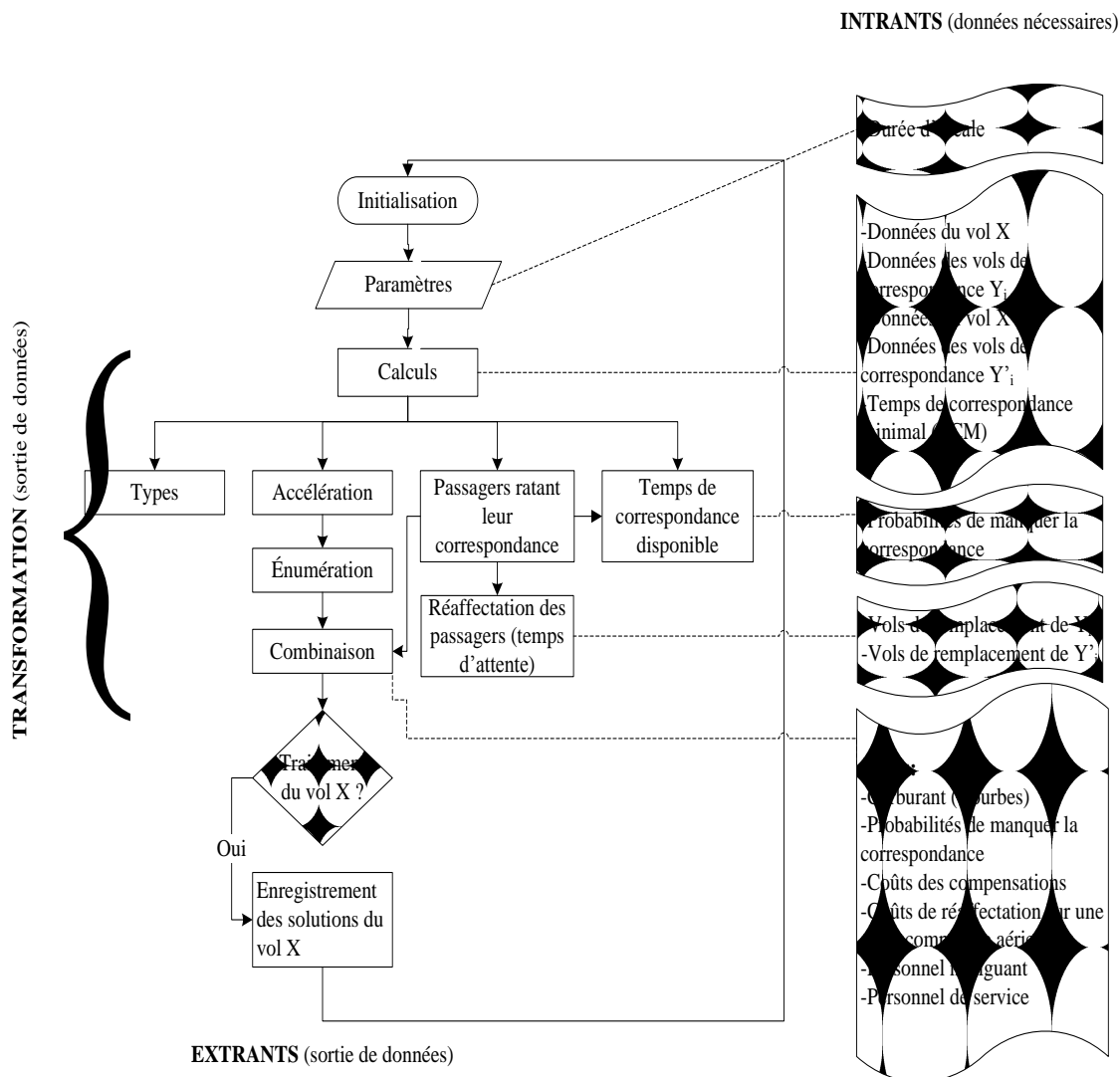


Figure 4.1 Processus utilisé lors de l'application

4.2 Description des intrants

Les feuilles Excel décrivant les intrants sont au nombre de 15. Bien que chacune d'entre elles soit utilisée à différent moment de l'application, elles demeurent toutes nécessaires à son fonctionnement. Avant de débiter l'explication de chacune des feuilles Excel liées aux intrants, voici la définition de quatre termes qui sont utilisés afin de classer chacun des vols :

La **route** est utilisée lors du calcul des coûts des équipages puisque pour un même avion il est possible de faire plusieurs destinations différentes. Elle est choisie en fonction de l'origine et la destination de l'avion lors d'un vol. Elle peut prendre les valeurs suivantes : Amérique du nord,

Amérique du Sud, Europe, Asie et Japon. Par exemple, dans le cas d'un *Boeing 767* où l'origine est Montréal et la destination Vancouver, la route sera Amérique du nord. Il est important de noter que la route est considérée seulement pour les vols X et X'.

Le *service* est utilisé lors du calcul des compensations versées aux passagers et permet également de choisir la probabilité que le passager rate sa correspondance. Dépendamment d'une origine-destination les coûts et les probabilités varieront. Ainsi, le service classe une origine-destination, dans les catégories suivantes : Canada, États-Unis, Atlantic, Pacifique et Pacifique du Sud/Amérique Latine/Caraïbes. Par exemple, si l'origine et la destination d'un vol sont respectivement Montréal-Toronto, dans le cas où des compensations sont versées aux passagers, elles seront choisies en fonction d'un service Canada. Il en va de même pour les probabilités de rater la correspondance, elles sont choisies en fonction de ce même service.

Le *code-région* permet d'attribuer, pour chaque correspondance, le temps de correspondance minimal (TCM). Tout d'abord, chaque vol est classé dans les catégories suivantes : Canada, États-Unis et International (excluant Canada et États-Unis) décrivant la *région*. Ensuite, la combinaison des régions du premier vol (X) et du vol suivant (Y_i) ainsi que le lieu de correspondance permettent de choisir quel sera le TCM pour chacun des vols. Par exemple si les vols X et Y_1 ont comme régions respectives Canada et International, alors le code-région est Canada-International. Si on ajoute le lieu de correspondance, qui pourrait être Montréal par exemple, alors pour ce vol un TCM de 45 minutes (fictif) sera attribué.

Pour la présentation des feuilles, nous suivons le même ordre que celui utilisé dans le programme informatique.

1- Feuille « *Paramètres* »

La feuille Paramètres contient l'information sur le retard des vols X (R_X) et X' ($R_{X'}$) ainsi que leurs accélérations maximales respectives soient AM_X et $AM_{X'}$. Elle contient également la valeur des accélérations maximales pour chacune des correspondances de chacun des vols, soit les AM_{Y_i} pour le vol X et les $AM_{Y_i'}$ pour le vol X'.

2- Feuilles « *Données du vol X/Données du vol X'* »

Les informations contenues dans ces feuilles concernent les vols X et X'. Elles décrivent le type d'avion, la date de départ, le numéro de vol, l'heure de départ, l'heure d'arrivée, l'origine, la

destination, le nombre de passagers en classe Y (économique) et en classe J (affaires), la route, le service et la région.

3- Feuille « *Données des vols de correspondance Y_i et Y'_i* »

Les informations contenues dans ces feuilles portent sur les vols de correspondance (Y_i et Y'_i) et sont énumérées comme suit : le type d'avion, la date de départ, le numéro de vol, l'heure de départ, l'heure d'arrivée, l'origine, la destination, le nombre de passagers en classe Y (économique) et en classe J (affaires), la classe de la cabine des passagers et le nombre de passagers appartenant à celle-ci, le service, la région et le code-région.

4- Feuille « *Temps de correspondance minimal (TCM)* »

La feuille TCM décrit pour chaque code-région et lieu de correspondance le temps de correspondance minimal.

5- Feuille « *Probabilités de manquer la correspondance* »

Cette feuille décrit pour chaque temps de correspondances disponibles (TCD) (en minutes) et pour chaque code-région quelle est la probabilité en pourcentage de manquer la correspondance.

6- Feuille « *Vols de remplacement de Y_i /Vols de remplacements de Y'_i* »

Les informations contenues dans ces feuilles décrivent, pour chacune des correspondances, la date du prochain vol, le numéro de vol, l'heure de départ et le nombre de places disponibles pour chacune des classes, soit Y et J.

7- Feuille « *Réaffectation des passagers (Z_i)/Réaffectation des passagers (Z'_i)* »

Les informations contenues dans ces feuilles décrivent, pour chacune des correspondances, la date de départ prévue, le numéro de vol, l'heure de départ prévue, l'heure d'arrivée prévue, l'origine, la destination, la classe de la cabine, le nombre de passagers, la date de départ modifiée, le nouveau numéro de vol, l'heure de départ modifiée, l'heure d'arrivée modifiée et le temps d'attente.

8- Feuille « *Courbes du carburant* »

Dans cette feuille, on retrouve les valeurs qui permettent de créer les courbes pour chacun des vols à l'étude, qui seront ensuite utilisées lors du calcul des coûts de carburant dans le cas d'accélération.

9- Feuille « *Coûts des compensations* »

Dans cette feuille, on retrouve les facteurs considérés afin de verser les compensations aux passagers ratant leur correspondance. Ils se décrivent comme suit : la région, le service, la classe de la cabine, le temps d'attente (en minutes) et les compensations de base, pour la nourriture et pour l'hôtel tous en dollars.

10- Feuille « *Coûts de réaffectation sur une autre compagnie aérienne* »

Dans cette feuille, on retrouve pour chaque origine-destination et pour chaque classe de la cabine des passagers, soit Y et J, le coût de réaffectation sur une autre compagnie aérienne pour chacune d'entre elles.

11- Feuille « *Coûts du personnel naviguant* »

Cette feuille décrit tous les types d'avion, les temps de vol, les routes, le nombre de capitaines, le nombre de premiers officiés, le nombre de pilotes de relève et les probabilités de devenir illégal et les coûts rattachés à l'illégalité des équipages.

12- Feuille « *Coûts du personnel de service* »

Cette feuille décrit tous les types d'avion, la configuration de l'avion (le nombre de sièges disponibles pour chacune des classes), les temps de vol, les routes, le nombre de directeurs de service, le nombre d'agents de bord nécessaire et les probabilités ainsi que les coûts de devenir illégal.

13- Feuille « *Durée d'escale* »

Celle-ci ne concerne que le prochain vol du même avion, soit la relation entre les vols X et X'. Elle décrit pour chaque lieu d'arrivée du vol X et du type d'avion la durée d'escale nécessaire.

La section suivante décrit le fonctionnement du processus de résolution depuis l'étape d'initialisation, la création des scénarios, l'évaluation de leurs coûts jusqu'à la création du tableau synthèse des résultats. Afin d'alléger le texte et d'en faciliter la compréhension, on procède comme au chapitre 3, c'est-à-dire qu'on débute par l'explication de la résolution du vol X et par la suite le traitement du vol X' sera présenté. Il est important de noter que toutes les valeurs se trouvant dans les figures de la section 4.3 sont fictives et portent sur 5 vols de correspondances du vol X.

4.3 Processus de résolution

4.3.1 Initialisation

Cette étape effectue une séquence d'initialisations permettant de remettre l'application à son état d'origine. Cette étape est nécessaire afin de faire efficacement nos tests. En effet, elle sert à effacer l'ensemble du contenu des feuilles Excel où il y a eu des sorties de données. Les feuilles ainsi effacées sont *Paramètres*, *Calculs*, *Types*, *Accélération*, *Énumération*, *Combinaison*, *Passager ratant leur correspondance*, *Temps de correspondance disponible*, *Réaffectation des passagers* et *Enregistrement de la solution du vol X*.

4.3.2 Paramètres

Le modèle débute avec l'inscription (dans la feuille *Paramètres*) par l'utilisateur, des paramètres d'entrées (voir Figure 4.2). Celle-ci porte sur le vol X et ses 5 vols de correspondance.

Paramètres	
Vol X	
<i>Retard (minutes)</i>	50
<i>Accélération maximale (minutes)</i>	20
Vol X'	
<i>Retard (minutes)</i>	20
<i>Accélération maximale (minutes)</i>	10
Vols de correspondance (Y et Y')	
<i>Vols de correspondances</i>	<i>Accélération maximale</i>
Y1	35
Y2	7
Y3	7
Y4	48
Y5	18

Figure 4.2 Exemple de la feuille *Paramètres*

4.3.3 Calculs effectués

Pour chacun des vols de correspondances, des calculs (à l'intérieur de la feuille *Calculs*) sont effectués afin de les traiter et de les classer en fonction du retard. Dans le Tableau 4.1, les valeurs utilisées pour réaliser ces calculs ont été transformées en variables (afin de faciliter la compréhension) et les feuilles Excel (présentées précédemment) utilisées afin d'effectuer chacun

d'entre eux sont également présentées. Il est important de comprendre que certains calculs effectués dans la feuille *Calculs* seront utilisés afin de faire d'autres calculs qui seront également ajoutés dans cette feuille. Les calculs sont présentés selon l'ordre dans lequel ils sont effectués. De plus, certains d'entre eux sont des calculs simples alors que d'autres sont des procédures.

Tableau 4.1 Contenu du tableau de la feuille *Calculs*

<i>Calculs</i>			
Variables	Explication	Lire dans la feuille	Colonne utilisée à l'intérieur de la feuille Calculs
Y_i	Vol de correspondance	<i>Données des vols de correspondances Y_i</i>	
HD_{Y_i}	Heure de départ des Y_i	<i>Données des vols de correspondances Y_i</i>	
TC	Temps de correspondance	<i>Données sur le vol X (HA_X)²</i>	
TCM	Temps de correspondance minimal	- <i>Données sur le vol X</i> - <i>Données des vols de correspondances Y_i</i> - <i>Temps de correspondance minimal</i>	
HDM_{Y_i}	Heure de départ maximale (sans accélération)		-TCM - HD_{Y_i}
$HDMA_{Y_i}$	Heure de départ maximale (avec accélération)	- <i>Paramètres</i>	- HDM_{Y_i} - AM_{Y_i}
TM	Temps manquant pour effectuer la correspondance	- <i>Paramètres</i> - <i>Données sur le vol X (HA_X)</i>	- $HDMA_{Y_i}$ - HDM_{Y_i}
TA	Type d'accélération	- <i>Paramètres</i> - <i>Données sur le vol X (HA_X)</i>	-TM - HDM_{Y_i} - $HDMA_{Y_i}$
A_{Y_i}	Accélération sur les Y_i	<i>Paramètres</i>	-TA -TM
PRC	Nombre de passagers qui ratent leur correspondance	- <i>Données des vols de correspondances Y_i</i>	TA
TCD	Temps de correspondance disponible	- <i>Paramètres</i> - <i>Données sur le vol X (HA_X)</i>	HD_{Y_i}

² HA_X représente l'heure d'arrivée du vol X qui se trouve dans la feuille *Données sur le vol X*.

Il est à noter que dans certaines procédures HA_X , R_X et A_X représentent respectivement l'heure d'arrivée du vol X, le retard et l'accélération sur le vol X.

Y_i Chaque correspondance est nommée Y_i où i correspond au nombre de correspondances considérées. Cela permet d'en faire le suivi pendant l'application.

HD_{Y_i} L'heure de départ de chacune des correspondances est ajoutée. Ensuite, les correspondances sont classées en ordre croissant de leur heure de départ.

TC Il est calculé comme suit : $HD_{Y_i} - HA_X$

TCM Celui-ci est attribué en fonction du premier (X), du deuxième vol (Y_i) et du lieu de correspondance.

HDM_{Y_i} Elle est calculée comme suit : $HD_{Y_i} - TCM$

$HDMA_{Y_i}$ Elle est calculée comme suit : $HDM_{Y_i} + AM_{Y_i}$

La procédure qui suit permet d'obtenir les valeurs suivantes : TA, TM et TCD. Également, les commentaires sont écrits en caractères italiques.

Procédure TA-TM-TCD

(

SI $HDMA_{Y_i} - (HA_X + (R_X - A_X) / (24 * 60)) < 0$ **DONC**

TA = 2 (*Type d'accélération = 2*)

TM = 0 (*Temps manquant pour effectuer la correspondance*)

TCD = 0 (*Temps de correspondance disponible*)

AUTRE

SI $HDM_{Y_i} - (HA_X + (R_X - A_X) / (24 * 60)) \geq 0$ **DONC**

TA = 0 (*Type d'accélération = 0*)

TM = 0 (*Temps manquant pour effectuer la correspondance*)

TCD = TCM (*Temps de correspondance disponible*)

AUTRE

TA = 1 (*Type d'accélération = 1*)

TM = $HDM_{Y_i} - (HA_X + (R_X - A_X) / (24 * 60))$ (*Temps manquant pour effectuer la correspondance*)

TCD = $TCM - |(TM * 24 * 60)|$ (*Temps de correspondance disponible*)

FIN SI

FIN SI

)

Procédure A_{Yi}

(

SI TA= 1 DONC

$$A_{Yi} = |TM|$$

SINON

$$A_{Yi} = 0$$

FIN SI

)

Procédure PRC

(

SI TA = 2 DONC

$$PRC = NP^3$$

SINON

$$PRC = 0$$

FIN FI

)

La Figure 4.3 est une représentation globale, avec des valeurs fictives, de la feuille *Calculs*, lorsque les calculs sont effectués, pour 5 vols de correspondance dans ce cas. La valeur des variables suivantes sont données en minute : le TC, le TCM, le TM, l' A_{Yi} et le TCD.

Il est important de souligner que dans le tableau de la Figure 4.3, certaines valeurs sont fixes, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas pendant l'application. Celles-ci sont énumérées comme suit : Y_i , HD_{Yi} , TC, TCM, HDR_{Yi} et $HDRA_{Yi}$. En revanche, toutes les autres sont dynamiques. Elles sont donc modifiées pendant l'application. Une fois que les valeurs sont calculées dans la feuille *Calculs*, les feuilles suivantes sont créées: *Types*, *Accélération*, *Énumération*, *Passager ratant leur correspondance* et *Temps de correspondance disponible*. À l'intérieur de celles-ci, les informations seront entreposées.

Ainsi, à chaque fois que l'accélération du vol X est augmentée, les 5 dernières colonnes du tableau de la Figure 4.3 sont recalculées en fonction de celle-ci.

³ Nombre de passagers dans la feuille *Données des vols de correspondances Y_i* .

Calculs

Y_i	HD_{Y_i}	TC	TCM	HDR_{Y_i}	$HDRA_{Y_i}$	TM	TA	A_{Y_i}	PRC	TCD
Y_1	3:45 PM	40	30	3:15 PM	3:50 PM	0:29:00	1	0:29	0	0:30:00
Y_2	4:15 PM	70	30	3:45 PM	3:52 PM	0:00:00	0	0:00	0	0:31:00
Y_3	4:25 PM	80	30	3:55 PM	4:02 PM	0:00:00	0	0:00	0	0:41:00
Y_4	5:30 PM	145	30	5:00 PM	5:48 PM	0:00:00	0	0:00	0	0:46:00
Y_5	11:30 PM	505	30	11:30 PM	11:18 PM	0:00:00	0	0:00	0	0:46:00

Figure 4.3 Exemple de la feuille *Calculs*

Ensuite, les valeurs sont transposées dans les feuilles et dans les colonnes appartenant à l'accélération et à la correspondance. Par conséquent, dans chacune de ces feuilles, les accélérations possibles du vol X, A_X , sont énumérées jusqu'à l'accélération maximale, soit AM_X . Toutes les autres feuilles ont la même forme. Seul leur nom est différent.

De plus, uniquement les correspondances affectées par le retard sont énumérées. Par exemple, il se peut que sur 5 correspondances, seules 3 d'entre elles soient énumérées puisque le retard causé sur le vol X n'affecte que celles-ci. Il est à noter que les accélérations possibles, dans les exemples qui suivent, sont incrémentées par bond de 5 minutes.

Les prochaines figures sont des exemples lorsqu'il y a des sorties de données dans les feuilles *Types*, *Accélération*, *Énumération*, *Passager ratant leur correspondance* et *Temps de correspondance disponible*. Supposons que l'accélération maximale du vol X soit de 10 minutes et que les correspondances affectées par le retard soient Y_1 et Y_2 . Dans le feuille *Types* (voir Figure 4.4) les correspondances sont regroupées en trois classes (notées 0, 1 et 2) où 0 signifie que la correspondance n'est pas affectée par le retard, 1 signifie qu'en accélérant les vols X et/ou Y_i il est possible de rattraper la correspondance et 2 signifie que même en accélérant les vols X et Y_i la correspondance est ratée.

Types

Accélération sur le vol X	0	5	10
Vol de correspondance			
Y ₁	2	1	1
Y ₂	2	1	0

Figure 4.4 Exemple de la feuille ***Types***

Dans la feuilles ***Accélération*** (voir Figure 4.5), pour les correspondances ayant comme type 1 dans la feuille ***Types***, il y a l'accélération (en minutes) nécessaire pour rattraper le retard.

Accélération

Accélération sur le vol X	0	5	10
Vols de correspondance			
Y ₁	0	34	24
Y ₂	0	4	0

Figure 4.5 Exemple de la feuille ***Accélération***

Dans la feuille ***Énumération*** (voir Figure 4.6), on transforme en vecteur binaire les valeurs pour lesquelles il doit avoir une accélération représentées dans la feuille ***Accélération***. En d'autres mots, toutes les accélérations ayant une valeur différente de 0 sont transformées en 1 et toutes les autres restent à 0. Par exemple, dans la Figure 4.5, pour une accélération du vol X de 5 minutes, Y₁ devrait accélérer de 35 minutes afin de rattraper sa correspondance. Ainsi, dans la Figure 4.6, cette valeur prendra la valeur 1.

Énumération

Accélération sur le vol X	0	5	10
Vols de correspondance			
Y ₁	0	1	1
Y ₂	0	1	0

Figure 4.6 Exemple de la feuille ***Énumération***

Dans la feuille ***Passager ratant leur correspondance*** (voir Figure 4.7), pour les correspondances de type 2, il y a le nombre de passagers à réaffecter. Dans cet exemple, pour les correspondances Y₁ et Y₂, un seul passager devra être réaffecté. Bien qu'à cette étape on suppose que 100% de ces passagers rateront leur correspondance, lors du calcul des coûts on ajoutera la probabilité de manquer la correspondance. Ce pourcentage ne peut que réduire le nombre de passager auxquels les compensations sont versées. (Ceci sera détaillé plus en profondeur dans les pages suivantes.)

Passagers ratant leur vol de correspondance

Accélération sur le vol X	0	5	10
Vols de correspondance			
Y ₁	1	0	0
Y ₂	1	0	0

Figure 4.7 Exemple de la feuille ***Passagers ratant leur correspondance***

Dans la feuille ***Temps de correspondance disponible*** (voir Figure 4.8) on retrouve, pour les passagers ayant raté leur correspondance, leur temps de correspondance disponible (en minutes).

Temps de correspondance disponible

Accélération sur le vol X	0	5	10
Vols de correspondance			
Y ₁	26	30	30
Y ₂	28	30	30

Figure 4.8 Exemple de la feuille ***Temps de correspondance disponible***

Une fois que toutes ces feuilles sont créées, la feuille ***Combinaisons***, qui représente l'ensemble des solutions admissibles, est créée. La feuille ***Énumération*** dans laquelle les accélérations ont été transformées en vecteur binaire (comme à la Figure 3.5 du chapitre 3) est alors appelée par une sous-routine qui permet d'énumérer tous les scénarios de solutions admissibles, dans la feuille ***Combinaisons***.

Ainsi, pour une accélération donnée du vol X, le nombre de combinaisons des décisions possibles concernant les vols Y_i est 2ⁿ, n étant le nombre de correspondances où l'accélération est possible. En utilisant la feuille ***Énumération*** de l'exemple précédent (Figure 4.6) on obtient le premier tableau de Figure 4.9. Pour aucune accélération sur le vol X, aucune correspondance ne peut être accélérée (2⁰) (donc elles gardent la valeur 0), pour une accélération du vol X de 5 minutes nous obtenons 4 (2²) combinaisons de solutions possibles et pour une accélération du vol X égale à 10 nous en obtenons 2 (2¹) pour un total de 6 combinaisons de solutions possibles pour cet exemple. Une fois que les combinaisons de solutions possibles sont générées, une sous-routine remet la valeur de l'accélération (en minutes) dans les cases correspondantes (voir le deuxième tableau de la Figure 4.9).

Combinaisons Stade 1

Accélération sur le vol X	0	5	5	5	5	10	10
Vols de correspondance							
Y ₁	0	1	1	0	0	1	0
Y ₂	0	1	0	1	0	0	0

Accélération sur le vol X	0	5	5	5	5	10	10
Vols de correspondance	Accélération sur les Y_i						
Y ₁	0	34	34	0	0	24	0
Y ₂	0	4	0	4	0	0	0

Figure 4.9 Exemple de la feuille *Combinaisons* Stade 1

Ensuite, à la feuille *Combinaisons* une procédure ajoute, pour chacune des accélérations du vol X, le nombre de passagers ratant leur correspondance provenant de la feuille *Passager ratant leur correspondance* (voir Figure 4.10).

Combinaison Stade 2

Accélération sur le vol X	0	5	5	5	5	10	10
Vols de correspondance	Accélération sur les Y_i						
Y ₁	0	34	34	0	0	24	0
Y ₂	0	4	0	4	0	0	0
Passager ratant leur correspondance							
Y ₁	1	0	0	0	0	0	0
Y ₂	1	0	0	0	0	0	0

Figure 4.10 Exemple de la feuille *Combinaisons* Stade 2

Dans cet exemple, nous avons supposé que le passager de Y₁ et celui de Y₂ étaient réaffectés sur des vols ayant la capacité de les embarquer. Dans d'autres cas, où le nombre de passagers à réaffecter est très élevé, il se peut qu'ils ne soient pas tous réaffectés sur le même vol, dû à un manque de places disponibles. En fait, la période maximale de réaffectation des passagers a été fixée à 48 heures. Jusqu'à cette période les passagers pourront être réaffectés sur un autre vol opéré par Air Canada. Une fois cette période dépassée, ils sont réaffectés sur le vol d'une autre compagnie aérienne.

À la suite des valeurs décrites à la Figure 4.10, on y inscrit également les coûts liés au carburant, aux équipages et aux passagers. Tout d'abord, les coûts liés au carburant sont calculés en fonction de l'accélération de chacun des vols, soit le vol X et ses correspondances. Pour chacun d'entre eux une courbe de coût de carburant a été créée à l'aide des données obtenues par Air Canada. Celles-ci sont empiriques et ne couvrent pas tout l'espace des accélérations possibles. Ainsi, afin de pouvoir quantifier les coûts de carburant pour chaque accélération possible, un lissage linéaire par morceaux a été réalisé en divisant les points en trois groupes, pour chacune des courbes à l'étude, et en traçant une courbe de régression linéaire pour chacun de ces groupes de points sans créer de discontinuités entre les courbes de régression. Ainsi, une sous-routine calcule le coût lié au carburant pour chacun des vols en fonction de l'accélération à effectuer. Toutes les valeurs reliées aux courbes du carburant pour chacun des vols se trouvent dans la feuille *Courbes du carburant*.

Ensuite, le coût de l'équipage (personnel navigant et personnel de service) est ajouté au reste des valeurs du tableau et il est calculé en fonction du retard et de l'accélération du vol X ($R_X - A_X$). Les informations contenues dans les feuilles *Coûts du personnel navigant* et *Coûts du personnel de service* permettent donc à une procédure de choisir les valeurs correspondantes aux coûts. À l'intérieur de celles-ci, il y a les probabilités de devenir illégal et c'est également à ce moment que les coûts liés à l'illégalité des équipages sont calculés.

Finalement, les coûts liés aux passagers sont calculés. La feuille *Temps de correspondance disponible* est utilisée conjointement avec la feuille *Probabilités de manquer la correspondance* afin d'identifier le pourcentage des passagers qui peuvent prendre leur vol de correspondance et ceux qui le ratent. En fonction du temps de correspondance disponible, on trouve la probabilité de manquer la correspondance. Les coûts des compensations sont calculés seulement sur les passagers qui ratent leur vol. Dans la feuille *Vols de remplacement de Y_i* , on retrouve tous les vols suivants pour chaque Y_i . Ainsi, une procédure utilise les valeurs de cette feuille pour créer la feuille *Réaffectation des passagers Z_i* . Ainsi, les passagers sont réaffectés le plutôt possible sur les prochains vols. Dans la feuille *Réaffectation des passagers Z_i* (voir Figure 4.11) les temps d'attente avant d'être réaffecté sont calculés en soustrayant l'heure de départ modifiée et l'heure de départ prévue pour chacun des vols en tenant compte également des dates de départ modifiées et prévues. Dans le cas de la Figure 4.11, les passagers des correspondances 1 et 2 ont comme temps d'attente respectif 995 et 915 minutes. Tant que la période maximale de

48 heures avant d'être réaffecté n'est pas atteinte, le temps d'attente est inscrit. Dans le cas où ce temps est dépassé, il serait inscrit ACA (autre compagnie aérienne).

Réaffectation des passagers Z_i

Vol	Date de départ prévue	# de vol	Heure de départ prévue	Heure d'arrivée prévue	O	D	Classe de la cabine	Nombre de passagers	Date de départ modifiée	# de vol modifié	Heure de départ modifiée	Heure d'arrivée modifiée	Temps d'attente (minute)
Z1	11/15/2010	123	3:45 PM	4:21 PM	YHZ	YYG	Y	1	11/16/2010	456	8:25 AM	9:01 AM	995
Z2	11/15/2010	789	4:15 PM	6:56 PM	YHZ	YYG	Y	1	11/16/2010	950	8:25 AM	11:06 AM	915

Figure 4.11 Exemple de la feuille ***Réaffectation des passagers Z_i***

avec O : Origine D : Destination

Une sous-routine utilise ce temps d'attente afin de verser les coûts liés aux compensations de base, pour la nourriture et pour l'hôtel (se trouvant dans la feuille ***Coûts des compensations***). En ce qui concerne les passagers ayant plus de 48 heures d'attente avant d'être réaffecter, ceux-ci sont associés à des coûts de réaffectation sur une autre compagnie aérienne se trouvant dans la feuille ***Coûts de réaffectation sur une autre compagnie aérienne***. En ajoutant tous ces coûts fictifs (à titre représentatifs) à la feuille ***Combinaisons*** stade 2 (Figure 4.10) nous obtenons la Figure 4.12. Dans cet exemple, la solution du vol X ayant le coût le plus faible, évaluée à 1100 \$ se lit comme suit : pour aucune accélération du vol X, aucun vol de correspondance n'est accéléré, les coûts liés à l'équipage s'élèvent à 900 \$ et les coûts liés aux passagers sont de 200 \$.

Une fois que la feuille ***Combinaisons*** stade 3 (Figure 4.12) est créée pour le vol X, elle est copiée dans une autre feuille appelée ***Enregistrement de la solution du vol X***. Ensuite, une réinitialisation du processus est faite afin de remettre l'application à son état d'origine et à ce moment l'analyse du vol X' débute. Les paramètres d'entrés du vol X' sont les mêmes que ceux du vol X. Ainsi, la feuille ***Durée d'escale*** permet de calculer le retard sur le vol X' ($R_{X'}$) comme suit :

$$(\text{Heure de départ prévue du vol X}' - \text{Heure d'arrivée prévue du vol X}) + \text{Retard sur le vol X} + \text{Durée d'escale} - \text{Accélération sur le vol X}.$$

Une fois, que ce calcul est effectué, il est entré dans la feuille ***Paramètres*** pour représenter le retard sur le vol X'. L'accélération maximale du vol X' ($AM_{X'}$) est également entrée par l'utilisateur et est connue grâce aux informations contenues dans le plan de vol de X'.

Combinaisons Stade 3

Accélération sur le vol X	0	5	5	5	5	10	10
Vols de correspondance	Accélération sur les Y_i						
Y ₁	0	34	34	0	0	24	0
Y ₂	0	4	0	4	0	0	0
Passager ratant leur correspondance							
Y ₁	1	0	0	0	0	0	0
Y ₂	1	0	0	0	0	0	0
Coûts liés au carburant							
Vol X	0	500	500	500	500	1000	1000
Y ₁	0	3400	3400	0	0	2900	0
Y ₂	0	400	0	400	0	0	0
Coûts totaux liés au carburant (dollars)	0	4300	3800	900	500	3900	1000
Coûts liés aux équipages							
Personnel navigant	500	400	400	400	400	300	300
Personnel de service	400	300	300	300	300	200	200
Coûts totaux liés aux équipages (dollars)	900	700	700	700	700	500	500
Coûts liés aux passagers							
Compensations							
Y ₁	100	0	0	0	0	0	0
Y ₂	100	0	0	0	0	0	0
Autre compagnie aérienne							
Y ₁	0	0	0	0	0	0	0
Y ₂	0	0	0	0	0	0	0
Coûts totaux liés aux passagers (dollars)	200	0	0	0	0	0	0
Coût total de la solution du vol X (dollars)	1100	5000	4500	1600	1200	4400	1500

Figure 4.12 Exemple de la feuille *Combinaisons* Stade 3

Ensuite, le traitement des feuilles *Données du vol X'*, *Données des vols de correspondances Y'_i* et *Vols de remplacement de Y'_i* se fait de la même façon que pour celles du vol X. La création des solutions du vol X' se fait de la même manière que celles du vol X. Pour chaque accélération du vol X (i.e. A_X), on évalue les divers scénarios possibles pour le vol X'. À chaque fois que le retard sur le vol X' est diminué, par des accélérations du vol X, le scénario pour X' ayant les coûts les plus faibles est choisi et greffé à toutes les solutions du vol X correspondant à l'accélération A_X . Ainsi, à la feuille *Enregistrement de la solution du vol X* on ajoute le vecteur associé à la solution du vol X' ($S[X']$) qui contient les mêmes composantes que celui du vol X. Finalement, on somme les coûts de chacune des solutions, soit celles de X et de X', afin d'obtenir

le coût total d'une solution. En fait, le seul élément de la $S[X']$ qui est ajouté dans la solution totale du vol X est son coût.

Une fois que l'ensemble des solutions est créé, cela permet d'avoir une description complète des actions à poser afin de limiter l'impact du retard et de connaître également l'impact monétaire de la décision choisie.

Finalement, on présente ici les paramètres qui ont été utilisés dans l'instance qui a servi de test pour l'application:

1. L'avion qui opérait les vols X et X' était un Airbus 321;
2. Le vol X avait 7 vols de correspondance et le vol X' en avait 14;
3. L'accélération maximale du vol X était de 8 minutes et celle du vol X' était de 3 minutes;
4. L'accélération possible sur le vol X a été augmentée à toutes les 1 minutes;
5. Les accélérations maximales de toutes les correspondances, soit les Y_i et les Y'_i , ont été calculées en fonction des valeurs obtenues dans les plans de vol de chacun de ces vols;

Dans la section suivante, on décrit les améliorations qui pourraient être apportées au modèle.

4.4 Améliorations possibles

Bien que le modèle décrit dans les sections précédentes permet d'obtenir un ensemble de solutions, en réalité il se peut que certaines d'entre elles soient réalisables à de plus faibles coûts que d'autres. En ce sens, dans un cas où Air Canada dispose de toutes les ressources humaines, matérielles et financières lui permettant de poser les actions de tous les scénarios, il est fort possible qu'elle optera pour les solutions à moindre coûts. Ainsi, il pourrait être pertinent au modèle d'ajouter certaines contraintes dès le départ afin d'éviter des générations de solutions qui ne seront jamais choisies. Par exemple, si le moment où un retard n'affecte aucunement les passagers ayant des vols de correspondance, serait connu dès le départ, il serait possible d'éviter tout l'ensemble de solution relié à cette situation.

Ensuite, les coûts des équipages pourraient être représentés par un coût par membre et non un coût global pour tous les membres. En ce sens, pour chacun des membres de l'équipage il y aurait des données quant à son ancienneté, à ses des qualifications (selon le type d'appareil aérien), au nombre d'heures travaillées, au nombre minimal d'heures à payer, à la convention collective, etc.

Ainsi, le coût des équipages serait personnalisé à chaque membre et il serait par exemple possible de connaître quel est le réel coût du pilote pour un retard donné sur le vol X. Également, en ayant ces informations, les probabilités liées à l'illégalité des équipages se seraient alors éliminées puisqu' il serait possible de connaître le nombre total d'heures travaillées et juger s'il est dépassé, et si tel est le cas, alors on pourrait dire par exemple, que l'agent de bord sur le vol X est illégal et conformément à la convention collective qui le régit la solution choisie aurait un coût en elle-même. Cela suppose cependant des systèmes d'information avancé permettant d'avoir une information précise presque en temps réel sur l'état des heures travaillées de tout le personnel.

Le code peut également subir un nettoyage au niveau des routines, éliminer les répétitions et donc être optimisé.

La présentation et l'explication du processus terminée, la prochaine section fait état des résultats d'expérimentations effectuées à l'aide de cette application.

CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre présente un ensemble d'expériences et une analyse des résultats obtenus dans le cadre de ces expérimentations. La section 5.1 décrit la structure de l'expérimentation et les paramètres d'entrée utilisés. La section 5.2 présente et analyse les résultats obtenus pour chacun des scénarios et se termine par une analyse globale de ceux-ci. Également, nous présenterons l'analyse de trois types de solution pour une simulation. La première décrit une solution pour laquelle aucune accélération n'est observée, une autre où l'accélération est à son maximum et finalement, la solution optimale retenue pour cette simulation.

5.1 Plan d'expérience

Afin de tester la performance et la pertinence de l'outil proposé, un ensemble d'expériences ont été réalisées. Ces expériences sont divisées en quatre scénarios. Pour chacune des simulations (expériences) effectuées, les paramètres d'entrée sont les suivants : la longueur du retard en minutes, l'accélération maximale du vol X (en minutes) et le nombre de passagers ayant des vols de correspondance. Chaque scénario comporte 10 simulations représentées par 10 paramètres de retard identiques pour chacun des scénarios. Ainsi, les 10 retards (en minutes) choisis sont les suivants : 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240 et 300. Les quatre scénarios proviennent de la variation de deux paramètres. D'abord, l'accélération maximale du vol X sera testée pour deux valeurs : 8 minutes (représentant la situation de base) et 34 minutes étant la valeur de l'accélération maximale la plus élevée parmi les accélérations maximales de ses vols de correspondance. Dans le calcul des coûts du carburant du vol X, pour les scénarios ayant comme accélération maximale de 34 minutes, nous avons utilisé la courbe du vol de correspondance ayant cette accélération. De plus, deux valeurs seront testées en ce qui a trait au nombre de passagers ayant des vols de correspondance: 42 passagers, représentant la situation de base, et 84 passagers étant le double du nombre de passagers établi au départ. Au total, le nombre de simulations est de 40, représenté par les 10 durées de retard testées et ce pour les 4 scénarios. Les heures de départ des vols de correspondance du vol X ont été devancées, puisque dans la situation initiale aucun vol ne ratait sa correspondance avant 60 minutes de retard. Cette modification s'applique pour chacun des scénarios. Également, dans le cadre de nos simulations, tous les vols

de remplacement sont fixés au lendemain. Par exemple, si un passager doit être réaffecté sur un autre vol, il se voit réaffecté seulement le lendemain. Le

Tableau 5.1 représente les paramètres d'entrée des 4 scénarios utilisés lors des simulations. À ceux-ci, il est important d'ajouter les 10 valeurs de retard étudiées. Ainsi, la lecture du scénario 1 se fait comme suit : l'accélération maximale du vol X est de 8 minutes et 42 passagers auront des vols de correspondance pour chacun des retards à l'étude.

Tableau 5.1 Description des scénarios

Scénarios	Accélération maximale du vol X (en minutes)	Nombre de passagers ayant des vols de correspondance
1	8	42
2	8	84
3	34	42
4	34	84

La section suivante fait état des résultats obtenus lors des 40 simulations et présente une analyse approfondie de ceux-ci.

5.2 Résultats et analyses de l'expérimentation

Toutes les simulations présentent les résultats pour le vol X et pour ces vols de correspondance, pour chaque retard et ce pour 4 catégories distinctes :

1. Les coûts carburant;
2. Les coûts liés aux équipages (incluant le personnel navigant et le personnel de service);
3. Les coûts liés aux passagers (incluant les compensations de base, pour la nourriture et pour les hôtels, ainsi que les coûts de réaffectation des passagers sur d'autres compagnies aériennes);
4. Le coût total de la solution du vol X (incluant les coûts du vol X').

Pour chacune des simulations, la solution optimale est présentée et analysée. Les sous-sections suivantes présentent et analysent les résultats obtenus pour chacun des scénarios. Pour chacun d'entre eux, un tableau récapitulatif des solutions obtenues est présenté pour le vol X. Pour chaque scénario, trois états ont été constatés :

État 1 : Cet état décrit la situation où le type des vols de correspondance est 1, soit le cas où une accélération d'un des vols (X ou les vols de correspondance) permettrait de rattraper complètement le retard.

État 2 : Cet état comprend des vols de correspondance ayant le type 1 et d'autres ayant le type 2 (ce dernier type signifie que les passagers ratent leur vol de correspondance) simultanément.

État 3 : Cet état présente les solutions où les vols de correspondance sont tous de type 2 (malgré une accélération possible sur X ou sur les vols de correspondance).

En théorie, un quatrième état existe, et fait référence aux vols de correspondance de type 0, c'est-à-dire ceux qui ne sont pas affectés par le retard, et qu'aucune accélération ni sur le vol X ni sur les vols de correspondance est nécessaire. Par contre, dans le cadre de nos simulations, cet état n'apparaît jamais. De ce fait, pour chaque scénario, une analyse des solutions obtenues est présentée en fonction des états présentés ci-haut. Également, l'analyse des scénarios 1 et 2 et celle des scénarios 3 et 4 seront faites conjointement puisqu'un des paramètres d'entrée, soit l'accélération maximale du vol X, demeure inchangé pour chaque paire. Les Tableau 5.2 Tableau 5.3 Tableau 5.4 et Tableau 5.5 présentent les résultats obtenus dans le cadre des simulations effectuées pour les quatre scénarios à l'étude. À titre d'exemple, la lecture de la solution du scénario 1, pour un retard de 10 minutes se lit comme suit : les coûts du carburant sont évalués à 2.10 \$, les coûts des équipages sont de 464.62 \$, il n'y a aucun coût lié aux passagers et le coût total de la solution est de 466.72 \$.

Tableau 5.2 Résultats du *scénario 1*

SCÉNARIO 1				
Accélération maximale du vol X : 8 minutes				
Nombre de passagers ayant des vols de correspondance : 42 passagers				
Retard sur le vol X (en minutes)	Coût du carburant	Coût des équipages	Coûts des passagers	Coût total
10	2.10 \$	464.62 \$	- \$	466.72 \$
20	19.17 \$	542.59 \$	- \$	1,011.08 \$
30	19.17 \$	629.00 \$	- \$	1,184.12 \$
40	237.16 \$	680.91 \$	- \$	1,505.93 \$
50	237.16 \$	767.43 \$	748.02 \$	2,800.99 \$
60	237.16 \$	853.95 \$	2,259.06 \$	4,485.07 \$
120	19.17 \$	1,407.67 \$	11,490.25 \$	22,492.71 \$
180	19.17 \$	1,926.68 \$	11,620.25 \$	24,344.43 \$
240	19.17 \$	2,445.89 \$	11,620.25 \$	29,365.71 \$
300	19.17 \$	2,965.00 \$	11,620.25 \$	30,623.93 \$

Tableau 5.3 Résultats du *scénario 2*

SCÉNARIO 2				
Accélération maximale du vol X : 8 minutes				
Nombre de passagers ayant des vols de correspondance : 84 passagers				
Retard sur le vol X (en minutes)	Coût du carburant	Coût des équipages	Coûts des passagers	Coût total
10	2.10 \$	464.62 \$	- \$	466.72 \$
20	19.17 \$	542.29 \$	- \$	1,011.08 \$
30	125.18 \$	611.70 \$	- \$	1,255.52 \$
40	19.17 \$	715.52 \$	748.02 \$	2,105.17 \$
50	237.16 \$	767.43 \$	1,496.04 \$	3,549.01 \$
60	329.08 \$	845.30 \$	5,022.13 \$	7,322.76 \$
120	19.17 \$	1,407.67 \$	23,010.50 \$	34,012.96 \$
180	19.17 \$	1,926.78 \$	23,270.50 \$	35,994.68 \$
240	19.17 \$	2,445.89 \$	23,270.50 \$	41,015.96 \$
300	19.17 \$	2,965.00 \$	23,270.50 \$	42,274.18 \$

Tableau 5.4 Résultats du *scénario 3*

SCÉNARIO 3				
Accélération maximale du vol X : 34 minutes				
Nombre de passagers ayant des vols de correspondance : 42 passagers				
Retard sur le vol X (en minutes)	Coût du carburant	Coût des équipages	Coûts des passagers	Coût total
10	6.09 \$	464.62 \$	- \$	470.72 \$
20	31.49 \$	533.83 \$	- \$	1,010.09 \$
30	31.49 \$	620.35 \$	- \$	1,183.13 \$
40	102.62 \$	680.92 \$	- \$	1,375.38 \$
50	625.97 \$	680.92 \$	- \$	2,272.74 \$
60	625.97 \$	767.43 \$	748.02 \$	3,193.80 \$
120	31.49 \$	1,399.02 \$	11,490.25 \$	22,491.72 \$
180	31.49 \$	1,918.13 \$	11,620.25 \$	24,343.44 \$
240	31.49 \$	2,437.24 \$	11,620.25 \$	29,364.72 \$
300	31.49 \$	2,956.34 \$	11,620.25 \$	30,622.94 \$

Tableau 5.5 Résultats du *scénario 4*

SCÉNARIO 4				
Accélération maximale du vol X : 34 minutes				
Nombre de passagers ayant des vols de correspondance : 84 passagers				
Retard sur le vol X (en minutes)	Coût du carburant	Coût des équipages	Coûts des passagers	Coût total
10	6.09 \$	464.62 \$	- \$	470.72 \$
20	31.49 \$	533.83 \$	- \$	1,010.09 \$
30	74.50 \$	605.05 \$	- \$	1,191.53 \$
40	513.02 \$	611.70 \$	- \$	1,647.36 \$
50	309.24 \$	724.17 \$	748.02 \$	2,790.55 \$
60	1,052.79 \$	724.17 \$	748.02 \$	3,534.10 \$
120	31.49 \$	1,399.02 \$	23,010.50 \$	34,011.97 \$
180	31.49 \$	1,918.13 \$	23,270.50 \$	35,993.69 \$
240	31.49 \$	2,437.24 \$	23,270.50 \$	41,014.97 \$
300	31.49 \$	2,956.35 \$	23,270.50 \$	42,273.19 \$

Pour l'analyse des simulations, nous avons procédé comme suit. Tout d'abord, l'analyse des coûts du carburant, des équipages et des passagers est présentée. Ensuite, l'analyse du coût total

de chacune des paires est présentée. Finalement, une analyse globale, de l'ensemble des scénarios, est exposée.

Analyse des résultats pour les scénarios 1 et 2

Les figures 5.1 et 5.2 schématisent les coûts du carburant, des équipages et des passagers pour les scénarios 1 et 2. La segmentation du graphique en numéros représente les états 1, 2, et 3. En ce qui concerne le scénario 1, l'état 1 est représenté pour les retards de 10 à 40 minutes. Nous pouvons donc affirmer, que pour les 40 premières minutes, des accélérations sont nécessaires pour rattraper les vols de correspondance et minimiser le coût de la solution du prochain vol de X, soit X'. Dans le même ordre d'idées, l'état 1, pour le scénario 2, est écourté de 10 minutes et est représenté pour les retards de 10 à 30 minutes. À 30 minutes de retard, les coûts du carburant, pour le scénario 2 augmentent. Cela est expliqué par le nombre accru de passagers ayant des correspondances, ce qui a pour effet, pour une probabilité donnée de rater sa correspondance, d'augmenter la proportion de passagers ratant leur correspondance (expliqué à la section 3.3.2). Ainsi, dans notre étude de cas, il y a sur le vol Y6, 16 passagers dans le scénario 1, et 32 dans le scénario 2. La probabilité choisie en fonction du temps de correspondance disponible suite à un retard de 30 minutes était de 1.96 %. Ainsi, en combinant le nombre de passagers sur le scénario 1 à cette probabilité nous obtenons 0, signifiant qu'aucun passager ne rate son vol de correspondance, et donc que le coût des compensations est nul. Pour le scénario 2, nous obtenons 0.63 passager, donc 1 passager sur les 32 ratera son vol de correspondance. Dans le scénario 2, le coût pour ce passager s'élève à 374.01 \$ alors que les coûts de carburant sont plus faibles et se chiffrent à 125.18 \$. Pour ce scénario la solution optimale est ainsi d'accélérer certains vols, dont X et Y6, à la place de verser des compensations aux passagers, puisque le coût de celles-ci est plus élevé. De la même façon, nous pouvons remarquer qu'aucune compensation n'est versée aux passagers pour cet état et ce, pour les deux scénarios.

L'état 2 est un mélange de vols de correspondance ayant les types 1 ou 2. Ainsi, sur certains vols il y a seulement une augmentation du coût du carburant (type 1) tandis que sur d'autres vols, l'accélération n'est plus possible et que dans ces cas, certains passagers ratent leur vol de correspondance. Dans ces cas, des compensations (de base, pour la nourriture, l'hôtel et la réaffectation sur d'autres vols) sont versées à certains passagers. Cet état est présent pour le scénario 1 de 50 à 120 minutes de retard et pour le scénario 2 de 40 à 120 minutes de retard.

Également, à 120 minutes de retard, dans les deux scénarios, les coûts moyens du carburant diminuent considérablement à 19.17 \$, signifiant qu'il ne vaut plus la peine d'accélérer certains vols puisqu'on préfère verser des compensations aux passagers et dans certains cas, les réaffecter sur d'autres vols. Dans les deux scénarios, l'état 3 débute à 180 minutes de retard et caractérise les vols de correspondance de type 2. Ainsi, à 180 minutes de retard, presque tous les passagers ratent leur vol de correspondance. Le coût du carburant de 19.17 \$ représente ici une accélération de 2 minutes sur le vol X. Cette petite accélération permet d'obtenir une meilleure solution pour le vol X'. En effet, dans le cas du scénario 1, si aucune accélération n'est effectuée sur le vol X à 180 minutes de retard, le coût total de la solution du vol X' est de 10 795.53 \$, dont 2.10 \$ (correspond à une accélération de 1 minute sur X') en carburant, 1 848.92 \$ pour les équipages et 8 944.51 \$ pour les passagers. Dans notre cas, une accélération de 2 minutes du vol X pour un coût de 19.17 permet de réduire la solution du vol X' de 17.20 \$ pour un coût total de 10 778, 33 \$. Ainsi, cette différence de coût s'explique en raison des équipages qui passent de 1 848.92 \$ à 1 831.72\$ (tous les autres coûts demeurant les mêmes).

Dans un autre ordre d'idées, plus le retard sur le vol X est considérable, moins la différence entre l'ensemble des solutions et la solution optimale est grand. À titre d'exemple, à 180 minutes pour le scénario 1, la solution ayant les coûts totaux les plus élevés s'élève à 24 657.41 \$ et la solution optimale est de 24 344.53 \$. La différence entre ces deux solutions n'est que de 312.98 \$. Ainsi, le coût de l'accélération chiffré à 19.17 \$ permet d'économiser 312.98 \$. De ce fait, les coûts moyens liés aux passagers augmentent drastiquement atteignant la valeur la plus élevée de 11 620.25 \$ pour le scénario 1 et de 23 270.50 \$ pour le scénario 2.

En ce qui concerne les coûts des équipages, et ce pour les deux scénarios, ils dépendent de la longueur du retard, puisqu'ils sont calculés en fonction d'un taux horaire par minute de retard. Ainsi, plus le retard augmente, plus ces coûts augmentent.

À 40 minutes de retard, les coûts de carburant pour le scénario 1 sont de 237.16 \$, les coûts des équipages sont de 680.91 \$ et aucun coût n'est lié aux passagers. Pour le même retard, le scénario 2 agit différemment. Ainsi, pour celui-ci les coûts de carburant sont de 19.17 \$, les coûts des équipages sont de 715.52 \$ et les coûts des passagers sont de 748.02 \$. Dans ce cas, nous pouvons remarquer que des accélérations peuvent également permettre de diminuer les coûts des équipages.

De façon générale, nous pouvons affirmer qu'à l'intérieur des simulations effectuées dans les scénarios 1 et 2, il y a une relation entre le coût du carburant et les coûts liés aux passagers. Ainsi, plus les coûts de carburant sont élevés, bien qu'ils restent généralement faibles par rapport aux autres coûts au niveau des solutions optimales observées, et malgré les longueurs de retard étudiées, plus les passagers ont la chance de rattraper leur vol de correspondance. L'inverse est aussi vrai. Les changements dans la dominance des coûts se font de manière graduelle puisqu'en passant d'un état à l'autre, la longueur du retard est augmentée, faisant ainsi passer certains vols de correspondance du type 0 au type 1, pour migrer ensuite au type 2.

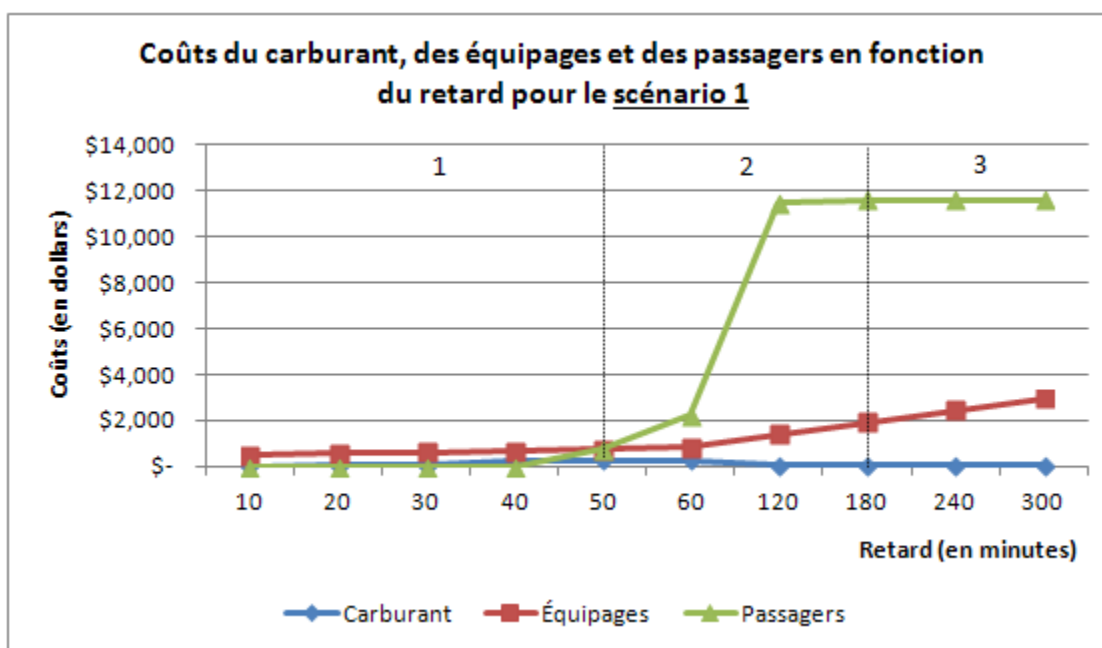


Figure 5.1 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 1

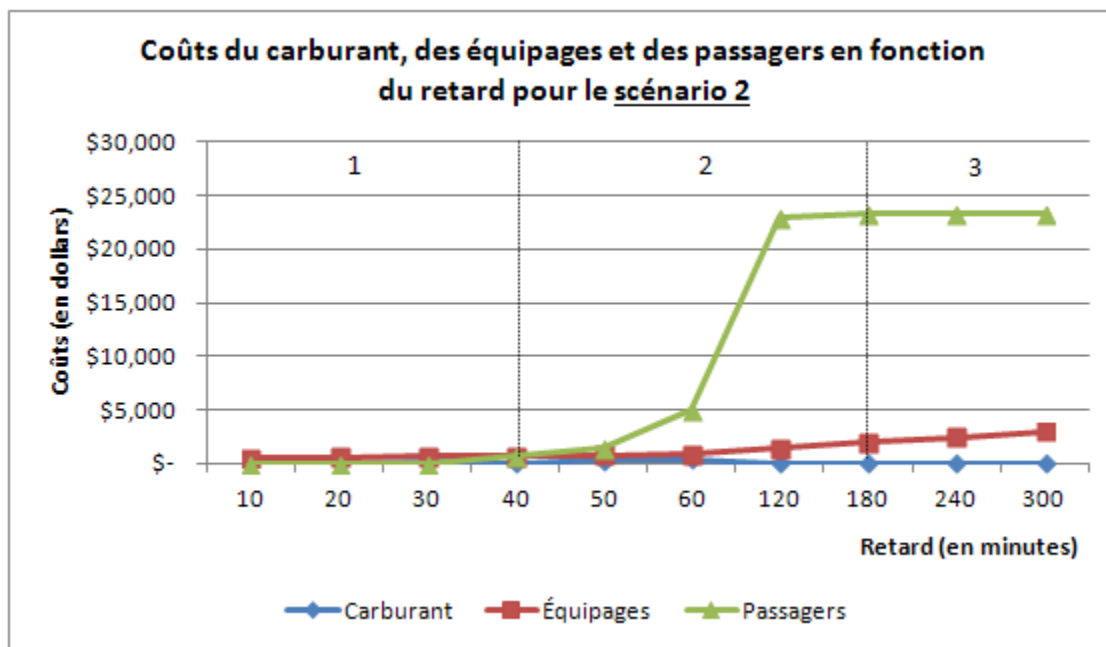


Figure 5.2 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 2

La Figure 5.3 quant à elle représente le coût total de la solution optimale pour chaque scénario. Il apparaît ainsi que pour ces scénarios, plus le retard augmente plus les coûts augmentent. Dans les deux cas, à partir d'un retard de 60 minutes les coûts augmentent considérablement. Le coût total de la solution du scénario 1, pour un retard de 300 minutes, est de 30 623.93 \$ et pour le scénario 2 elle se situe à 42 274.18 \$, soit une augmentation de 27.56 %. Cette situation est, entre autre, due au fait que dans le scénario 2 les passagers sur les vols de correspondances sont doublés, et donc que les coûts liés aux passagers sont plus élevés. Également, dans toutes les solutions, pour chacun des scénarios, les coûts les plus faibles associés au vol X' sont inclus dans le coût total de chacune d'entre elles. De ce fait, il est important d'accorder une importance au vol X', qui est le prochain vol du même avion que le vol X, compte tenu des coûts élevés qui en découlent.

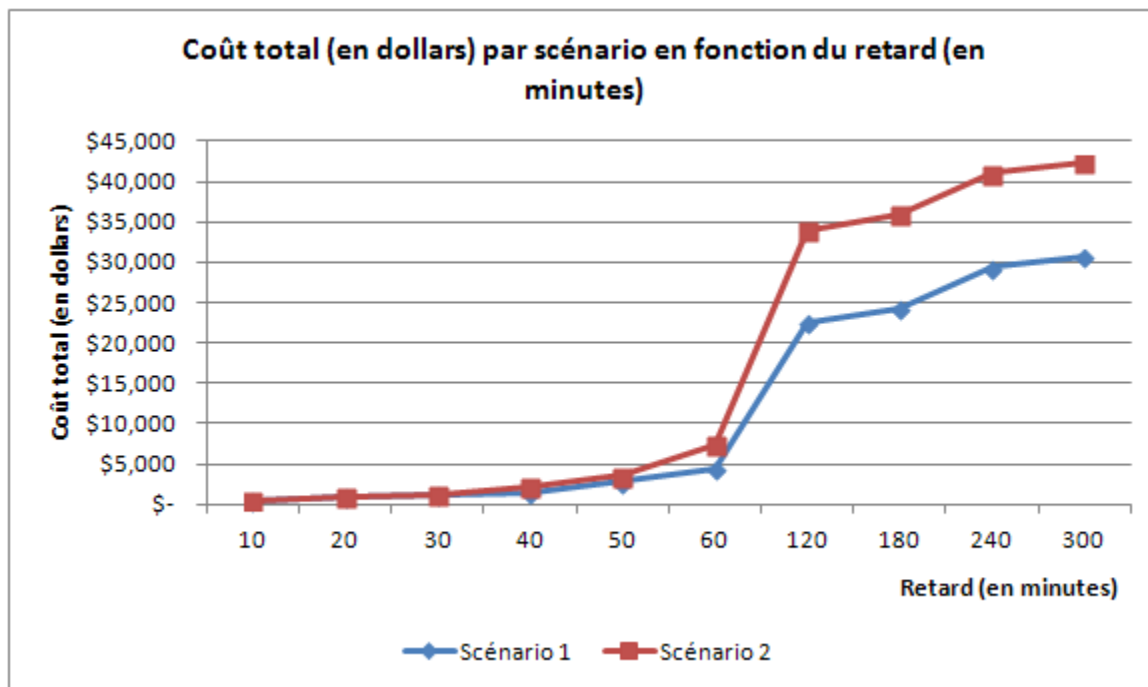


Figure 5.3 Coûts total en fonction du retard pour les scénarios 1 et 2

Analyse des résultats pour les scénarios 3 et 4

Les figures 5.4 et 5.5 présentent les coûts de carburant, des équipages et des passagers pour les scénarios 3 et 4. Pour le scénario 3, l'état 1 apparaît pour les retards de 10 à 50 minutes. À ce stade, les coûts du carburant augmentent, signifiant qu'il y a des accélérations sur les vols de correspondance additionnées à celles du vol X. Cet état décrit la situation où les accélérations permettent de rattraper entièrement le retard. En ce qui concerne le scénario 4, cet état est présent de 10 à 40 minutes de retard. L'état 2, caractérisé par des vols de correspondance de type 1 et 2 est présent pour les scénarios 3 et 4 respectivement pour les retards allant de 50 à 120 minutes et de 40 à 120 minutes.

En ce qui a trait aux coûts du carburant, ils restent encore une fois généralement plus faible par rapport aux autres coûts, et atteignent la valeur la plus élevée à 50 minutes de retard, pour le scénario 1 se situant à 625.97 \$. À 60 minutes de retard ceux-ci atteignent la valeur de 1052.79 \$ pour le scénario 2. Cette décision d'accélération aussi importante du vol X est dû au nombre de passagers qui est doublé dans le scénario 4, dans lequel il est préférable d'accélérer le vol X que de verser des compensations aux passagers. Cependant, à 120 minutes de retard, il y a une baisse significative des coûts moyens du carburant, contrairement aux coûts moyens liés aux passagers

qui atteignent presque la valeur la plus élevée. À partir de ce moment, il n'est ainsi plus nécessaire d'accélérer le vol X pour rattraper les vols de correspondance puisque le retard devient trop important (pas assez temps pour rattraper leur correspondance).

Par contre, à partir de 120 minutes pour les scénarios 3 et 4, les coûts de carburant sont de 31.49 \$, correspondant à une accélération de 3 minutes sur le vol X. Encore une fois, cette accélération permet de diminuer les coûts sur le vol X'. En ce sens, dans le scénario 4 à 180 minutes de retard, le coût total de la solution du vol X' est de 9 570.76 \$ dont 6.09 \$ en carburant (correspond à une accélération de 1 minute sur X'), 1 303.85 \$ pour les équipages et 8 261.02\$ pour les passagers. Dans le cas où aucune accélération n'est effectuée sur le vol X, le coût total de la solution du vol X' s'élève à 9 605.00 \$, pour un coût supplémentaire de 34.04 \$. Celui est caractérisé par une augmentation des coûts de carburant de 25.40 \$ (correspond à une accélération de 3 minutes sur X') et des équipages de 8.64 \$. En ce qui à trait aux coûts des passagers ils demeurent les mêmes d'un cas à l'autre. Ainsi, à partir de 180 minutes, presque tous les passagers manquent leur vol de correspondance, caractérisant ainsi l'état 3. Par conséquent, les coûts des compensations pour les passagers s'élèvent à 11 620.25 \$ pour le scénario 3 et à 23 270.50 \$ pour le scénario 4.

En ce qui concerne les coûts liés aux équipages, pour les retard de 40 et 50 minutes pour le scénario 3, ils sont exactement les mêmes et atteignent la valeur de 680.92 \$. Une situation semblable survient au scénario 4, pour les retards de 50 et 60 minutes, les coûts des équipages sont de 724.17 \$. Cette situation s'explique dans les deux cas par les accélérations faites sur le vol X.

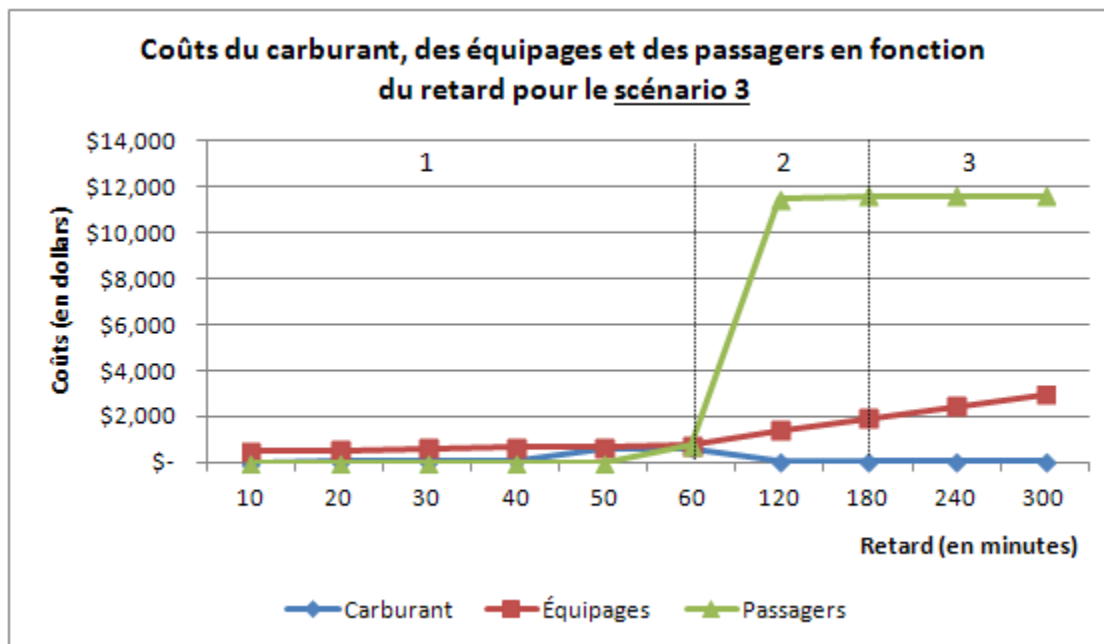


Figure 5.4 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 3

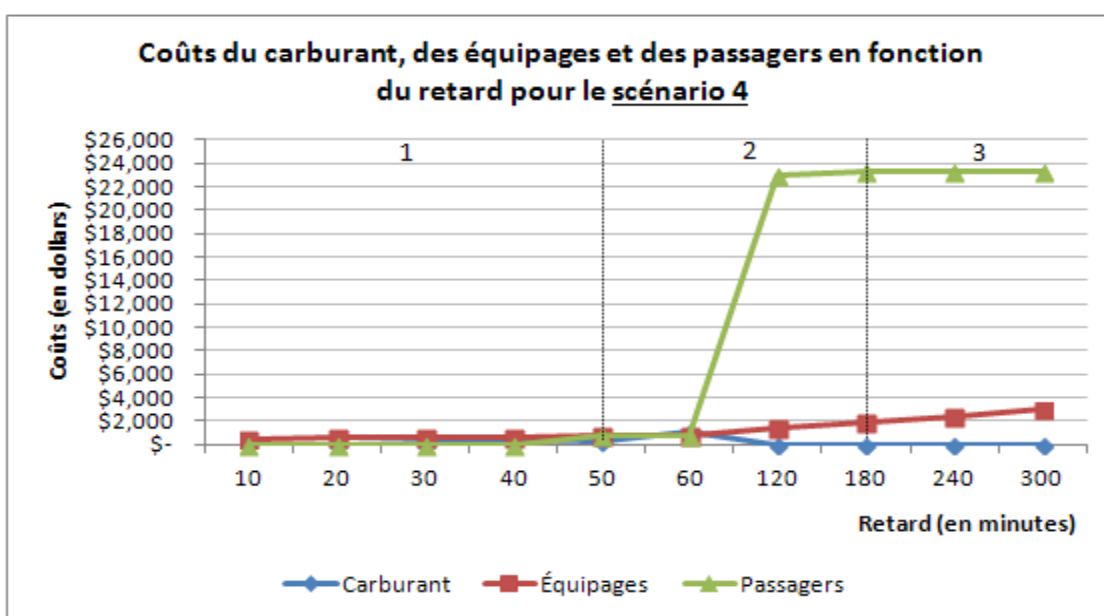


Figure 5.5 Coûts du carburant, des équipages et des passagers en fonction du retard pour le scénario 4

La Figure 5.6 présente les coûts totaux pour les scénarios 3 et 4. Dans les deux cas, à partir de 60 minutes de retard, les coûts totaux augmentent. En ce qui concerne le scénario 3, les coûts les

plus élevés, soit pour un retard de 300 minutes, sont de 30 622.25 \$ et pour le scénario 4 ils sont de 42 273.19 \$. Dans les deux scénarios, à ce stade de retard, les coûts du carburant sont très faibles, mais représentent une accélération faite sur le vol X dans le but de diminuer le coût des solutions sur le vol X'.

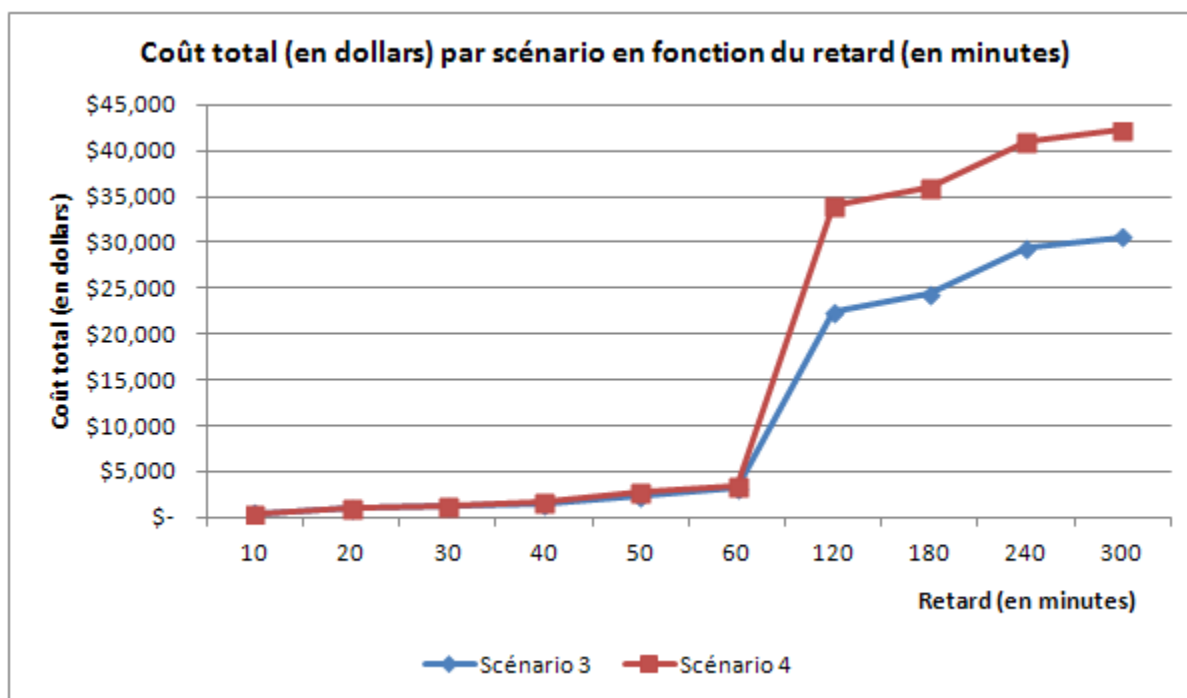


Figure 5.6 Coûts total en fonction du retard pour les scénarios 3 et 4

Analyse générale des résultats des simulations

Une fois que l'analyse des scénarios est terminée, il est nécessaire de souligner les tendances générales des résultats. En ce qui concerne les scénarios 1 et 4, l'état 1 survient au même moment, pour les retards de 10 à 40 minutes. L'accélération maximale sur le vol X dans le scénario 1 est de 8 minutes contrairement à 34 minutes pour le scénario 4. Dans ce cas, l'accélération plus élevée du scénario 4 permet de maintenir la situation (à la solution du scénario 1) bien que le nombre de passagers soit doublé.

En ce qui concerne les coûts du carburant, ils sont plus élevés dans les scénarios 3 et 4 puisque l'accélération maximale du vol X est plus élevée. Par contre, les différences des coûts de carburant dans les 4 scénarios sont expliquées par l'utilisation de courbes de carburant différentes pour chacun des vols (élaborée à la section 3.3.1 du chapitre 3).

Les coûts des équipages pour les scénarios 1 et 2 comparativement à ceux des scénarios 3 et 4 sont plus élevés. Il est possible d'expliquer cette différence par la longueur de l'accélération maximale du vol X qui est de 8 minutes pour les scénarios 1 et 2 et de 34 minutes pour les scénarios 3 et 4. En d'autres termes, la génération de l'ensemble des solutions est limitée à la durée de l'accélération maximale. Ainsi, plus elle est grande, plus elle permet de réduire, dans notre cas, les coûts d'équipages pour les scénarios 3 et 4.

De la même manière, il semble que les coûts les plus élevés soient liés aux compensations versées aux passagers ainsi qu'à leur réaffectation sur d'autres compagnies aériennes. Ainsi, à 60 minutes de retard, pour les 4 scénarios, une situation particulière intervient : les coûts du carburant sont les plus élevés et sont respectivement de 237.16 \$, 329.08 \$, 625.97 \$, 1052.79 \$. Ainsi, à ce moment, tous les vols ont été accélérés au maximum. À 120 minutes, pour les 4 scénarios, les coûts de carburant commencent à diminuer contrairement aux coûts liés aux passagers qui augmentent drastiquement. Nous pouvons donc constater, que plus la possibilité d'accélération est grande pour le vol X, plus les coûts du carburant sont élevés et plus les coûts liés aux passagers sont faibles. Une accélération maximale plus élevée sur le vol est avantageuse dans le sens où elle offre plus de possibilités au niveau des vols de correspondance de rattraper le retard. Également, une accélération maximale plus élevée combinée aux accélérations possibles sur les vols de correspondance permet une accélération totale plus grande.

Dans tous les scénarios étudiés, après un retard de 180 minutes tous les passagers ratent leurs vols de correspondance. Les coûts totaux des solutions du vol X, pour les scénarios 2 et 4 sont beaucoup plus élevés que les deux autres scénarios et sont respectivement de 42 274.18 \$ et de 42 273.19 \$. Bien que ceux-ci soient plus élevés, la différence entre les deux n'est pas considérable. La différence entre ces deux scénarios réside dans la longueur de l'accélération maximale du vol X, pour le scénario 4, et le nombre de passagers ayant des vols de correspondance qui a doublé pour les deux scénarios. Bien que dans le cas étudié, un retard ne survient que sur un vol en particulier, celui-ci peut également entraîner un retard sur les prochains vols du même avion surtout dans les cas où les heures de départs entre les vols sont très rapprochées. Un simple retard de 20 minutes peut ainsi avoir un effet boule de neige sur le déroulement du prochain vol. Dans le cadre de notre étude, nous pouvons affirmer que certaines accélérations sur le vol X permettent d'obtenir des solutions à meilleures coûts sur le vol X'.

Également, il est important de noter, dépendamment du nombre de passagers sur les vols de correspondance, les probabilités, dans certains cas, changent les résultats. Aussi, l'augmentation des coûts des équipages, dans tous les scénarios, est inévitable plus le retard augmente. Finalement, dans le

Tableau 5.6, les temps minimums (représentés par un retard de 10 minutes) et maximums (représentés par un retard de 300 minutes) de résolution de l'application en Visual Basic sont présentés. Pour l'ensemble de simulations, les temps de résolution demeurent de faible durée. Cela constitue un avantage lors de prises de décisions puisque celles-ci sont prises presque en temps réel.

Tableau 5.6 Temps de résolution minimum et maximum de l'application par scénario

Scénarios	Temps de résolution minimum	Temps de résolution maximum
1	4 secondes	28 secondes
2	4 secondes	29 secondes
3	5 secondes	1 minute 50 secondes
4	6 secondes	1 minute 50 secondes

Analyse de la situation actuelle dans l'industrie aérienne

Actuellement, les options offertes aux compagnies aériennes lors de retard sont de deux ordres : la compagnie peut décider d'accélérer, dans le but de rattraper le retard, ou peut décider de ne poser aucune action et donc, d'assumer tous les coûts qui en découlent. Dans le but de représenter cette situation, nous allons analyser 3 branches de l'arbre de décision pour un retard de 50 minutes : lorsqu'aucune accélération n'est utilisée dans le but de rattraper le retard et ce sur tous les vols à l'étude, lorsque tous les vols sur lesquels le retard à un impact sont accélérés et enfin, le résultat de la solution optimale obtenu à l'aide de l'application développée dans le cadre de ce projet. Nous allons présenter les résultats, de trois branches de l'arbre du scénario 1 (présentée dans le Tableau 5.2) lors d'un retard de 50 minutes. À titre de rappel, dans ce scénario l'accélération maximale du vol X était de 8 minutes et il y avait 42 passagers ayant des vols de correspondance. Chacune des solutions obtenues dans le Tableau 5.7 représente une branche,

parmi toutes celles énumérées dans l'arbre de décision pour un retard sur le vol X de 50 minutes. Par exemple, la solution correspondant à aucune accélération représente une des décisions possibles lorsque l'accélération sur la branche de l'arbre est égale à 0.

Tableau 5.7 Résultats des 3 branches de l'arbre pour un retard sur le vol X de 50 minutes

Branche	Coût du carburant	Coût des équipages	Coûts des passagers	Coût total
Aucune accélération	- \$	819.34 \$	1,885.05 \$	3,804.69 \$
Accélération maximale	4,003.07 \$	750.13 \$	748.02 \$	6,532.30 \$
Solution optimale	237.16 \$	767.43 \$	748.02 \$	2,800.99 \$

Dans le Tableau 5.7, les résultats obtenus sont représentés. Ainsi, nous pouvons voir que la solution de la branche de l'arbre lorsque tous les vols (seulement pour lesquels le retard sur le vol X à un impact) sont accélérés est la plus élevée. Dans ce cas précisément, l'accélération sur le vol X est de 8 minutes, et pour les correspondances 1, 2 et 4 les accélérations sont de respectivement 25, 25 et 14 minutes. Également, dans cette solution, les coûts du carburant sont les plus élevés. Il n'y a aucun coût du carburant pour la branche où l'accélération est égale à 0. Dans le même ordre d'idées, pour la solution optimale les coûts du carburant s'élèvent à 237.16 \$ représentant une accélération de 6 minutes sur le vol X. En ce qui concerne le coût des équipages, il est plus élevé lorsqu'il n'y a aucune accélération, puisqu'il est en fonction du retard sur le vol X. Ainsi, lorsque nous accélérons le vol X, dans le cas où l'accélération maximale est atteinte (8 minutes) et dans le cas de la solution optimale (6 minutes), les coûts des équipages sont plus faibles. En ce qui attrait aux coûts des passagers, ils sont plus élevés lorsqu'aucune accélération n'est utilisée et s'élèvent à 1 885.05 \$. Les coûts des passagers pour la solution optimale et lorsque l'accélération maximale est atteinte sont les mêmes. De façon générale, le coût total de la solution lorsque les vols sont accélérés est la plus élevée et se situe à 6 532.30\$ soit un coût supérieur de 2 727.61 \$ à comparer à la solution lorsqu'il n'y a aucune accélération et un coût supérieur de 3 731.31 \$ à comparer à la solution optimale. Nous pouvons dire que, dans ce cas précisément, le coût de la solution optimale est inférieur aux décisions que pourrait prendre une compagnie aérienne. Ainsi, nous pouvons affirmer qu'avec l'utilisation du modèle de décision présenté dans ce projet, les solutions optimales offrent une meilleure solution à de meilleurs coûts. La prochaine section conclue le projet en rappelant les faits saillants, les limites du modèle et les améliorations possibles dans le futur.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

En tout temps, l'industrie aérienne est sujette à un ensemble d'imprévus pouvant changer le cours des opérations planifiées et des ressources impliquées. La complexité des opérations de planification, autant au niveau des ressources matérielles, humaines et financières est mise au défi lorsque des retards surviennent sur certains vols. Pourtant, actuellement, les options offertes aux compagnies aériennes sont très limitées. Celles-ci peuvent décider d'accélérer un vol afin de rattraper partiellement ou complètement le retard ou, dans d'autres cas, elles peuvent prendre aucune mesure et donc assumer tous les coûts qui en découlent. L'objectif du projet à l'étude était de développer un ensemble d'outils d'analyse et d'aide à la décision qu'Air Canada pourra mettre en œuvre afin de prendre de meilleures décisions opérationnelles et financières quant à la gestion des vols accusant des retards. Afin de réaliser cet objectif, un modèle d'optimisation a été développé et présente des décisions de gestion d'un retard et de leurs relations entre elles. Ainsi, ce modèle énumératif prend la forme d'un arbre de décision à trois niveaux de décisions : les décisions d'accélération sur le vol affecté par le retard, les décisions quant aux accélérations sur ses vols de correspondance et enfin les décisions relatives à la réaffectation des passagers. À tous ces niveaux, des coûts sont ajoutés afin de connaître l'impact financier lié à la solution. Le but de cette optimisation est de choisir le scénario de moindre coût.

Plusieurs hypothèses ont été posées afin de simplifier et de rendre le modèle réalisable. Ainsi, afin de tester et de valider le modèle, un prototype, à l'aide de Visual Basic a été implémenté. Tous les intrants au fonctionnement de cette application ont été décrits et leurs interactions expliquées pendant la résolution. Ensuite, cette application a été testée sur des données inspirées de cas réels d'un vol et du prochain vol du même avion. Quatre scénarios ont été créés et testés à l'aide de l'application. Les résultats obtenus démontrent une variation importante des coûts en fonction du retard. Également, plus la longueur de l'accélération maximale sur un vol est grande, plus l'éventail de solutions intégrant des accélérations est grand, et plus il est possible de rattraper les vols de correspondance. Lorsque le nombre de passagers ayant des vols de correspondance augmente, les coûts liés à la réaffectation de ceux-ci deviennent considérables. Également, la considération de l'effet du retard sur le prochain vol du même avion est nécessaire à la minimisation des coûts de la solution choisie. Dans le même ordre d'idées, accélérer un vol lorsqu'un retard survient peut être très pertinents au rétablissement de la situation de départ, et dans certain cas, il est même possible de rattraper entièrement le retard.

Bien que les résultats obtenus soient très pertinents, le problème de la gestion des retards demeure très complexe. Également, le présent projet fait état des résultats obtenus à l'aide d'un cas précis d'Air Canada. Les coûts utilisés à l'intérieur du projet concernaient le carburant, les équipages et les passagers. Les courbes utilisées pour le calcul du carburant s'appliquent seulement aux vols de l'étude réalisée. En ce qui concerne les coûts liés à l'équipage, ils pourraient être décomposés de façon à refléter plus précisément la réalité, c'est à dire, ceux-ci seraient plus précis si on pouvait faire la somme des coûts de chaque employé plutôt que le coût d'un équipage en général. Mais obtenir cette information en temps réel peut être difficile. Les coûts liés aux passagers tels que les compensations de base, pour la nourriture, pour les hôtels ainsi que ceux liés aux réaffectations de passagers sur d'autres compagnies aériennes ont été décomposés et sont quant même très réalistes. Un des grands avantages de l'application qui a été développée en VBA est son temps de résolution raisonnable. En effet, tous les scénarios possibles peuvent être énumérés et évalués dans le pire des cas en moins de 2 minutes. Dans l'ensemble, le choix de la solution optimale pourrait être limité dès le départ afin d'éliminer les solutions trop dispendieuses. Tous les intrants nécessaires au fonctionnement de l'application sont de plusieurs ordres et englobent plusieurs départements de la compagnie aérienne. Ainsi, lorsque le retard survient, l'implication de plusieurs types de ressources est nécessaire au respect des changements et à la prise de décision.

Le modèle d'optimisation énumérant l'ensemble des décisions est l'une des contributions de ce projet. Également, celui-ci n'est pas complexe et ne nécessite pas de programmes spéciaux à sa résolution. La deuxième contribution, est l'application créée dans le but de tester le modèle et sa plus grande force est son temps de résolutions très faible. Ainsi, celle-ci pourrait être utilisée lors de situation irrégulière et ce, en temps réel.

Le projet de ce mémoire consiste en une version simplifiée de la réalité. Certains éléments pourraient être ajoutés afin d'augmenter le réalisme de l'outil. Il pourrait être pertinent de joindre tous les coûts afférents liés aux bagages des passagers lorsque les vols de correspondances sont ratés. En réalité, lorsqu'un passager rate son vol, on doit rediriger ses bagages vers le prochain vol ou encore lui redonner ses bagages si on le réaffecte sur un vol d'une autre compagnie. Un autre critère très important, est la disponibilité des portes afin d'accueillir les vols et d'entamer le débarquement des passagers, qui dans certain cas devient une contrainte des capacités aéroportuaires. L'accent pourrait également être mis, sur tous les aspects de l'équipage qui

demeurent très complexes, en raison des différentes conventions collectives impliquées et des nombreuses règles qu'elles contiennent. La validation de la légalité d'affecter un employé à un vol retardé demeure un défi de taille en temps réel.

RÉFÉRENCES

- Airline for America. (1995-2012) Annual and Per-Minute Cost of Delays to U.S. Airlines. Consulté le 20 janvier 2012, tiré de <http://www.airlines.org/Pages/Annual-and-Per-Minute-Cost-of-Delays-to-U.S.-Airlines.aspx>.
- Research and Innovative Technology Administration (RITA) (2012). Airline On-Time Statistics and Delay Causes. Consulté le 2 février 2012, tiré de http://www.transtats.bts.gov/OT_Delay/OT_DelayCause1.asp?pn=1.
- Abdelghany, K. F., S. S. Shah, et al. (2004). A model for projecting flight delays during irregular operation conditions. *Journal of Air Transport Management*, 10, 385-394.
- Abdelghany, K. F., A. F. Abdelghany, et al. (2008). An integrated decision support tool for airlines schedule recovery during irregular operations. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 825-848.
- Babic, O., M. Kalic, et al. (2011). The airline schedule optimization model: validation and sensitivity analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 1029-1040.
- Ball, M., C. Barnhart, et al. (2007). Air transportation: Irregular operations and control. *Handbook in Operations Research and Management Science*, 14, 1-73.
- Ball, M., C. Barnhart, et al. (2010). Total Delay Impact Study: A Comprehensive Assessment of the Costs and Impacts of Flight Delay in the United States. 91.
- Beatty, R., R. Hsu, et al. (1998). *Preliminary evaluation of flight delay propagation through an airline schedule*. Proceedings of the Second USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Orlando.
- Bratu, S. and C. Barnhart (2006). Flight operations recovery: New approaches considering passenger recovery. *Journal of Scheduling*, 9(3), 279-298.

- Castro, A. and E. Oliveira (2007). A distributed multi-agent system to solve airline operations problems. Proceedings of the ninth international conference on enterprise information systems, vol, Madeira, Portugal.
- Clausen, J., J. Hansen, et al. (2001). Disruption Management – Operations Research between Planning and Execution. *OR/MS Today*, 28(5), 40-43.
- Cook, A., G. Tanner, et al. (2004). Evaluating the true cost to airlines of one minute of airborne or ground delay. London, University of Westminster: 261.
- Cook, A. and G. Tanner (2009). The challenge of managing airline delay costs. Conference on Air Traffic Management (ATM) Economics.10. University of Belgrade.
- Cook, A., G. Tanner, et al. (2009). Dynamic cost indexing – Managing airline delay costs. *Journal of Air Transport Management*, 15(1), 26-35.
- Dunbar, M., G. Froyland, et al. (2010). Robust airline schedule planning : Minimizing propagated delay in an integrated routing and crewing framework. *Optimization online*.
- Gang, Y. (1998). Operations research in the airline industry. Kluwer Academic Publishers, 473.
- Guo, Y., L. Suhl, et al. (2005). "Solving the Airline Crew Recovery Problem by a Genetic Algorithm with Local Improvement, Operational Research.*An International Journal* 5(2), 241-249.
- Jafari, N. and S. Hessameddin Zegordi (2011). Simultaneous recovery model for aircraft and passengers. *Journal of the Franklin Institute*, 348(7), 1638-1655.
- Kohl, N., A. Larsen, et al. (2004). Airline disruption management - perspectives, experiences and outlook. *Journal of Air Transport Management*, 13, 149–162.

- Lan, S., J.-P. Clarke, et al. (2005). Planning for robust airline operations: Optimizing aircraft routings and flight departure times to minimize passenger disruptions. *Transportation Science*, 40(1), 15-28.
- Lettovsky, L., E. L. Johnson, et al. (2000). Airline crew recovery. *Transportation Science*, 34(4), 337-348.
- Mathaisel, D. F. X. (1996). Decision support for airline system operations control and irregular operations. *Computers Ops Res*, 23(11), 1083-1098.
- Rosenberger, J. M., E. L. Johnson, et al. (2003). Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, 37(4), 408-421.
- Stojkovic, G., F. Soumis, et al. (2002). An optimization model for a real-time flight scheduling problem. *Transportation Research Part*, 36A, 779-788.
- Teodorovic, D. and S. Guberinic (1984). Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. *European Journal of Operational Research*, 15(2), 178-183.
- Teodorovic, D. and G. Stojkovic (1995). Model to reduce airline schedule disturbances. *Journal of Transportation Engineering*, 14, 324-331.
- Wang, P. T. R., L. A. Schaefer, et al. (2003). Flight connections and their impacts on delay propagation. 22nd IEEE Digital Avion. Syst. Conf.
- Wei, G., G. Yu, et al. (1997). Optimization Model and Algorithm for Crew Management During Airline Irregular Operations. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1(3), 305-321.
- Yan, S. and D.-H. Yang (1996). A decision support framework for handling schedule perturbation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(6), 405-419.

Yu, G., M. Arguello, et al. (2003). A new era for crew recovery at Continental Airlines. *Interfaces*, 33, 5-22.