

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**OPTIMISATION DYNAMIQUE DE LA SÉLECTION DE VOLS PARTAGÉS D'UN
TRANSPORTEUR AÉRIEN**

MARC-ALEXANDRE LAMBERT LAROCHE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES)

JUIN 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

**OPTIMISATION DYNAMIQUE DE LA SÉLECTION DE VOLS PARTAGÉS D'UN
TRANSPORTEUR AÉRIEN**

Présenté par : LAMBERT LAROCHE Marc-Alexandre

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

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

M. LANGEVIN André, Ph. D., président

M. GAMACHE Michel, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. FRAYRET Jean-Marc, Ph. D, membre

Whether you think you can or you can't, you're right.

-Henry Ford

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier Michel Gamache qui, avant d'être mon directeur de recherche, a été le professeur qui, par la qualité de son enseignement, m'a transmis son intérêt pour la recherche opérationnelle. Merci Michel pour ta grande disponibilité, tes conseils toujours à propos et ta bonne humeur contagieuse.

Il va sans dire que l'industrie aérienne peut sembler très complexe pour un nouveau venu comme moi. Je tiens à remercier Jérôme-Olivier Ouellet, mon superviseur chez Air Canada, pour m'avoir encadré et orienté dans ce domaine. Merci Jérôme pour les multiples heures que tu as investies dans mon projet, pour tes idées et ton support constant.

Si ma maîtrise se démarque aujourd'hui de par son aspect concret, je dois remercier Jean-François Pagé, chef de section en recherche opérationnelle à Air Canada, qui a travaillé fort pour que mon projet puisse être effectué en partenariat avec Air Canada. Merci Jean-François pour ton appui dès le jour un et pour les efforts supplémentaires que tu as investis pour rendre mon environnement d'études des plus stimulants.

Je suis d'ailleurs très reconnaissant envers tout le groupe de recherche opérationnelle d'Air Canada de m'avoir considéré comme l'un des leurs durant deux ans. Merci Karine, Julie, Jacques, Jérôme et Jean-François. Vous avez à la fois contribué à mon développement professionnel, académique et personnel.

Avant de pouvoir modéliser quoi que ce soit, encore faut-il posséder des données. À ce niveau, je tiens à remercier Stéphanie Deneault pour le temps considérable qu'elle a consacré à la construction d'une grande quantité de données. Merci Stéphanie de l'apport crucial que tu as fourni à mon projet.

Un remerciement spécial aussi à François Soumis qui a su me donner des conseils judicieux juste au bon moment dans mon projet.

Sur une autre note, je tiens à remercier le FQRNT, le CRSNG et le groupe international d'Air Canada pour leur soutien financier à travers la bourse BMP-Innovation. Cette aide m'a été essentielle pour que je puisse concentrer toutes mes énergies à mon projet d'études.

Malgré que la composante académique ait été au centre de ma formation, ma maîtrise aura également été une opportunité incroyable de me développer socialement. Ce développement, je le dois principalement à l'AÉCSP qui m'a permis de vivre une multitude d'expériences enrichissantes. Et puisque l'AÉCSP, c'est d'abord et avant tout des gens, je tiens à remercier Maléna, Christine, Jonathan, Amandine, Joel, Kim, Michèle, Hugues, Jessica, Mathieu, Mojra, Simona, Amélie et Mireille pour avoir rendu mes années de maîtrise aussi agréables. J'ai appris beaucoup à votre contact et je suis fier que, tous ensemble, nous ayons contribué à améliorer significativement la vie étudiante aux cycles supérieurs à Polytechnique.

Un autre merci tout spécial à Maxime Desjardins-Carrière qui a été mon ami de tous les jours durant ma maîtrise.

Finalement, je garde mes plus grands remerciements pour mes deux parents qui m'encouragent dans mes études depuis que j'ai 4 ans et qui m'ont systématiquement appuyé de toutes les façons imaginables durant mon parcours. Gabrielle et Philippe, je vous dois toute la formation dont j'ai pu bénéficier au cours des 20 dernières années. Il s'agit là de plus de 25 000 heures d'études qui me suivront et me définiront tout au long de ma vie. Du fond du cœur, Merci.

RÉSUMÉ

Le partage de vols est une pratique désormais très répandue qui permet à un transporteur aérien d'apposer un de ses numéros de vol sur un vol exploité par une compagnie partenaire pour ainsi considérer ce dernier dans son propre réseau. Malgré qu'il ait été prouvé à maintes reprises que ce type de partenariat peut générer d'énormes revenus additionnels, il reste très complexe pour une compagnie aérienne de choisir quels vols partager avec quels partenaires. L'objectif du présent projet est de proposer un outil d'aide à la décision qui optimise les revenus d'un transporteur aérien en considérant deux aspects qui n'étaient pas expressément considérés dans la littérature : l'impact de rendre un vol partagé dans le réseau et les interactions qui existent entre les vols que l'on souhaite rendre partagés.

Pour ce faire, une méthode heuristique est développée. À chaque itération, la demande est répartie sur le réseau en fonction de la sélection de vols partagés et cette sélection est modifiée dans le but d'augmenter la profitabilité du transporteur. Pour accélérer la résolution, la demande est répartie sur des graphes réduits au lieu de considérer le réseau entier d'un transporteur. Un modèle mathématique de répartition de la demande est construit et validé à l'aide d'un logiciel existant afin d'être utilisé à l'intérieur de l'heuristique. De plus, une méthode de blocage du flot est employée pour assurer un plus grand réalisme.

Deux algorithmes basés sur l'heuristique développée sont appliqués pour optimiser la sélection de vols partagés d'Air Canada avec un partenaire et, en deuxième temps, avec deux partenaires. En comparaison avec deux méthodes actuellement utilisées, ces algorithmes proposent des sélections de vol qui génèrent beaucoup plus de revenus. Les résultats obtenus démontrent également qu'il existe une interaction claire entre les vols partagés choisis et qu'il est important de considérer cet effet dans l'optimisation de la sélection de vols partagés.

Toutefois, les algorithmes proposés nécessitent de très longs temps de résolution et rien n'assure leur convergence. Des recherches plus approfondies devront être menées pour accélérer la résolution de l'heuristique proposée, pour améliorer la précision du modèle de répartition de la demande utilisé et pour étudier plusieurs facteurs reliés à la gestion de vols partagés qui n'ont pas été considérés dans le présent projet.

ABSTRACT

Codesharing is now a widespread practice that allows an airline to put one of its flight numbers on a flight operated by a partner airline and consider it in its own network. Even though it has been repeatedly demonstrated that this type of partnership can generate important additional revenues, it is very complex for an airline to choose which flights to share with which partners. The objective of this project is to provide a decision support tool that maximizes the revenues of an airline considering two aspects that were not explicitly considered in the literature: the impact of adding a shared flight in the network and the interactions that exist between flights that are chosen to become codeshared.

Therefore, a heuristic is developed. At each iteration, the demand is distributed on the network considering the codeshare flight selection and this selection is modified in order to increase the profitability of the carrier. To speed up the resolution, the demand is distributed on reduced graphs instead of the full network. A mathematical model of demand distribution is built and validated using existing software before being used in the heuristic. In addition, a blocking flow method is used to ensure greater realism.

Two algorithms based on the developed heuristic are used to optimize the codeshare flight selection of Air Canada with one partner and with two partners. In comparison with two methods currently used, these algorithms propose codeshare flight selections that generate much greater revenues. The results also show that there is a clear interaction between selected flights and that it is important to consider this effect when optimizing the selection of codeshared flights.

However, the proposed algorithms require very long resolution times and their convergence is not guaranteed. Further research should be conducted to accelerate the resolution of the proposed heuristic, to improve the accuracy of the demand distribution model used and to investigate different factors related to codeshare management that were not considered in this project.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	VI
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	X
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES.....	XIII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Le partage de tronçons de vol	1
1.2 Complexité du problème	5
1.3 Modèle de répartition de la demande	6
1.4 Structure du mémoire	8
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	9
CHAPITRE 3 UNE NOUVELLE APPROCHE POUR LA SÉLECTION DES VOLS PARTAGÉS	14
3.1 Lacunes des versions précédentes	14
3.2 Objectifs du projet.....	16
3.3 Approche générale.....	17
3.4 Collaboration.....	19
CHAPITRE 4 CONSTRUCTION D’UN MODÈLE DE RÉPARTITION DE LA DEMANDE	20
4.1 Modèles existants	20

4.2	Approche générale.....	21
4.3	Modèle mathématique.....	24
4.4	Validation du modèle construit.....	28
4.5	Blocage du flot.....	32
CHAPITRE 5 HEURISTIQUE PROPOSÉE.....		34
5.1	Modélisation de l'effet de partage d'un vol.....	34
5.2	Calcul du revenu.....	40
5.3	Algorithmes.....	42
5.4	Hypothèses.....	48
5.5	Outils informatiques.....	50
5.6	Méthodes d'accélération.....	50
CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		52
6.1	Algorithmes de référence.....	52
6.2	Résolutions avec Continental Airlines.....	53
6.3	Résolutions avec Continental Airlines et United Airlines.....	57
6.4	Source d'erreur.....	58
6.5	Utilité de l'heuristique.....	62
CONCLUSION.....		65
BIBLIOGRAPHIE.....		67
ANNEXES.....		69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Attrait et abréviations anglophones des types de connexion.....	23
Tableau 2. Comparaison du modèle de répartition de la demande développé avec le logiciel d’Air Canada sur cinq graphes réduits.....	30
Tableau 3. Changement du flot de passagers par itinéraire avec le partage de CO1866	37
Tableau 4. Nouveaux itinéraires partagés du graphe réduit de CO1866.....	38
Tableau 5. Itinéraires avec la plus grande perte de demande avec le partage de CO1866	39
Tableau 6. Résultats des quatre algorithmes avec les vols de Continental Airlines	54
Tableau 7. Performance des algorithmes 1 et 2 par rapport aux algorithmes 3 et 4 avec les vols de Continental Airlines	54
Tableau 8. Résultats des algorithmes 2-3-4 avec les vols de Continental Airlines et United Airlines	57
Tableau 9. Performance de l’algorithme 2 par rapport aux algorithmes 3 et 4 avec les vols de Continental Airlines et United Airlines.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Étapes de construction d'un graphe réduit.....	18
Figure 2. Exemple de trois itinéraires qui utilisent les 2 mêmes vols.....	32
Figure 3. Exemple d'itinéraire AC-AC*-CO	35
Figure 4. Attribution initiale dans un marché avec 10 itinéraires	59
Figure 5. Méthode de répartition de l'excédent de la demande avec « Spill and Recapture »	60
Figure 6. Méthode de répartition de l'excédent de la demande avec le modèle mathématique.....	61

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- OA* Un vol d'une compagnie aérienne qui est exploité par une autre. Entre d'autres mots, il s'agit d'un vol qui est vendu par une compagnie aérienne, mais pour lequel le passager embarquera sur l'avion d'une autre compagnie aérienne.
- AC* Un vol d'Air Canada exploité par une autre compagnie partenaire. Entre d'autres mots, il s'agit d'un vol qui est vendu par Air Canada, mais pour lequel le passager embarquera sur l'avion d'une autre compagnie aérienne qui est partenaire avec Air Canada.

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – VALIDATION DU MODÈLE DE RÉPARTITION DE LA DEMANDE CONSTRUIT	69
ANNEXE 2 – APPLICATION DE L’ALGORITHME 1 AVEC CONTINENTAL AIRLINES	74
ANNEXE 3 – APPLICATION DE L’ALGORITHME 2 AVEC CONTINENTAL AIRLINES	75
ANNEXE 4 – APPLICATION DE L’ALGORITHME 2 AU CAS DE CONTINENTAL AIRLINES ET UNITED AIRLINES.....	76

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) établissait à 2 271 122 000 le nombre de passagers transportés par avion en 2008 et à 508 milliards les revenus générés par le transport aérien en 2007. Il va sans dire que cette industrie a une place prédominante dans l'économie mondiale. Au cours des deux dernières décennies, un nouveau phénomène a fait son apparition dans cette industrie et a révolutionné ses pratiques commerciales : le partage de tronçons de vol. Ce phénomène, beaucoup plus connu sous l'appellation anglaise « codesharing », est un type de partenariat entre compagnies aériennes qui s'est largement répandu autour du globe dans les deux dernières décennies. Le premier partage de tronçons de vol fut observé en 1986 entre British Island Airways et Air Florida (Oum 1996). Depuis, un très grand nombre de transporteurs aériens ont participé à de tels partenariats. À un point tel que des alliances ont été créées dans le but de favoriser les partenariats bilatéraux entre les compagnies aériennes membres. En date de 2008, la proportion annuelle de passagers dans le monde transportés par des compagnies membres d'une des trois alliances principales (Star Alliance, OneWorld ou SkyTeam) était de 55%¹.

1.1 Le partage de tronçons de vol

Il est question de partage de tronçons de vol lorsqu'une compagnie aérienne A vend des sièges sur le vol d'une compagnie B, moyennant un certain arrangement financier. Par exemple, sur

¹ Ce calcul est basé sur les données disponibles du trafic mondial disponible à travers l'« Air Transport Association of America » et le trafic des compagnies aériennes membres selon Star Alliance, OneWorld et SkyTeam. Les adresses consultées sont les suivantes :

<http://www.airlines.org/Economics/DataAnalysis/Pages/AnnualResultsWorldAirlines.aspx>, consulté le 13 mai 2010.

<http://www.staralliance.com>, consulté le 24 janvier 2009.

<http://www.oneworld.com>, consulté le 24 janvier 2009.

<http://www.skyteam.com>, consulté le 24 janvier 2009.

l'itinéraire *Los Angeles - Montréal*, United Airlines offre un vol *Los Angeles - Denver* et Air Canada en offre un *Denver - Montréal*. Ces deux compagnies ayant décidé de devenir partenaires sur cet itinéraire, il est possible d'acheter l'itinéraire complet auprès de l'une ou l'autre des compagnies. Pour ce faire, United Airlines appose un numéro de vol de type « UA1234 » sur le vol *Denver - Montréal* d'Air Canada et Air Canada appose un numéro de vol de type « AC4678 » sur le vol *Los Angeles - Denver* de United Airlines. Ainsi, les deux compagnies peuvent affirmer que l'itinéraire complet fait partie de leur réseau et se divisent les profits selon l'entente convenue entre les deux entreprises.

Les avantages commerciaux du partage de tronçons de vol sont nombreux. À la base, cela permet à un transporteur d'agrandir virtuellement son réseau aérien en choisissant ses partenaires et en proposant des connexions vers de nouveaux marchés, le tout sans avoir à ajouter un seul avion. Pour les clients de ce transporteur, il en résulte un plus grand nombre de destinations offertes. Pour un transporteur partenaire, en plus de recevoir une part des profits, ce type d'entente permet de desservir de nouveaux clients qui arrivent sur son réseau et généreront des revenus supplémentaires. L'idée derrière le partage de tronçons de vol est de mettre en commun l'inventaire de sièges de deux transporteurs sur des marchés stratégiques dans le but de présenter une offre qui répond mieux à la demande, selon une rétribution équitable des profits.

Ce faisant, un itinéraire qui devient partagé présente un meilleur service, parce qu'il existe une meilleure coordination entre les deux transporteurs et parce que la fréquence est augmentée. En effet, les deux transporteurs peuvent s'assurer que le délai de connexion entre deux vols est raisonnable, c'est-à-dire qu'un passager a assez de temps pour changer d'avion, mais qu'il n'ait pas à attendre son deuxième vol pendant des heures. De plus, en unissant leurs vols respectifs, les deux transporteurs vont augmenter la fréquence de vol sur l'origine-destination. Dans l'exemple ci-haut, si United Airlines offrait son vol *Los Angeles - Denver* quatre fois par semaine et Air Canada offrait également son vol *Denver - Montréal* quatre fois par semaine, il serait possible de synchroniser ces deux segments pour que les deux transporteurs, de leur côté, offre un itinéraire à deux connections *Los Angeles - Montréal* quatre fois par semaine. Cette nouvelle possibilité d'itinéraire viendrait s'ajouter aux autres connexions que les transporteurs ont dans ce marché.

De plus, le partage de tronçons de vol permet à une compagnie de rejoindre plus facilement les villes à l'extérieur de son pays d'origine. La grande majorité des accords bilatéraux entre pays empêche une compagnie étrangère d'effectuer un vol qui présente une origine et une destination dans le même pays. Cette pratique est connue sous le nom de « cabotage ». Toutefois, il est habituellement permis qu'une compagnie étrangère appose un de ses numéros de vol sur celui d'un transporteur domestique et contourne cette contrainte en créant un itinéraire partagé. Par conséquent, un transporteur peut offrir un vol entre une ville de son pays d'origine et une ville étrangère en laissant à un autre transporteur le soin d'effectuer les connexions supplémentaires à l'intérieur du pays étranger. À titre d'exemple, Air Canada effectue plusieurs vols du Canada vers une dizaine de villes européennes, de là les passagers poursuivent leur trajet sur des vols de Lufthansa et SAS, entre autres, pour se rendre dans toutes les autres grandes villes d'Europe.

Dès le début du partage de tronçons de vol, plusieurs observateurs craignaient que cette pratique ait pour effet d'augmenter les tarifs sur des marchés où quelques compagnies aériennes pourraient créer des partenariats qui réduiraient le niveau de compétition et aurait des effets néfastes pour le consommateur. Toutefois, plusieurs études ont prouvé qu'à l'intérieur d'un cadre réglementaire bien défini, cette pratique peut présenter des avantages significatifs pour les passagers comme pour les transporteurs.

Brueckner (2003) affirme que l'existence d'un itinéraire partagé sur un vol international entraîne une réduction de tarif entre 8% et 17% pour les itinéraires internationaux. En 2001, le même auteur, Brueckner (2001), démontre que la création d'alliances a pour effet de diminuer le tarif d'un itinéraire international origine-destination et d'augmenter, dans une moindre mesure, les tarifs des segments de vol composant cet itinéraire. Au final, il affirme que la valeur du consommateur et du transporteur est augmentée, car les effets positifs d'une alliance sont plus importants que ses effets négatifs.

Du côté des marchés domestiques, Bamberger et al. (2001) démontrent, à l'aide de deux exemples aux États-Unis, que les tarifs ont diminué et que le trafic a augmenté sur de nouveaux marchés où les deux partenaires créent un nouvel itinéraire comme sur les marchés déjà desservis par au moins un des deux partenaires. Gayle (2007) quant à lui étudie un partenariat majeur qui a été réalisé, soit celui de Continental, Delta et Northwest Airlines. Il soutient que la possibilité de

collusion est minime puisqu'il existe assez d'itinéraires alternatifs à ce partenariat et observe que les prix ont diminué dans la majorité des marchés touchés par ce partenariat.

Park (1997) ainsi qu'Hannegan et Mulvey (1995) ajoutent que les compagnies qui créent des alliances engrangent des profits supplémentaires qui sont perçus au détriment des autres compagnies concurrentes, conférant ainsi un avantage certain aux compagnies membres.

Certains bémols existent toutefois. Oum et al. (1996), Park (1997) ainsi que Chen et Gayle (2006) expliquent que les tarifs ont tendance à diminuer seulement sur les marchés où une alliance est complémentaire, c'est-à-dire lorsque les transporteurs impliqués sont concurrents sur très peu de marchés. Park (1997) arrive à la conclusion que la richesse collective augmente dans les marchés où il y a partage de tronçons de vol, mais il précise que cela est vrai seulement lorsqu'il existe une certaine densité de trafic sur un marché. Hannegan et Mulvey (1995) précisent que le potentiel de profitabilité de tels partenariats est intimement relié au degré d'intégration des opérations et du marketing que les compagnies partenaires réussissent à atteindre. Les précisions apportées par ces articles ne remettent toutefois pas en cause le potentiel de profits du partage de tronçons de vol.

Du point de vue d'un passager, plusieurs facteurs rendent le partage de tronçons de vol attrayant. Tout d'abord, un client fait affaire avec seulement une compagnie qui lui vend un itinéraire, au lieu d'acheter plusieurs billets auprès de plusieurs compagnies. Les transporteurs offrent donc un service à la clientèle pour l'ensemble du trajet et non seulement pour la fraction qu'ils exploitent. De plus, en partageant un itinéraire, les transporteurs se portent habituellement garants de la connexion entre les segments de vol. Précisément, cela veut dire que s'il y a un retard de vol sur un segment et que le client manque son vol suivant, la compagnie qui a vendu l'itinéraire s'assure de réassigner ce dernier sur un autre vol pour compléter l'itinéraire. Cela représente un avantage significatif dans l'industrie aérienne qui est fréquemment sujette à des retards de toutes sortes. Ainsi, pour le même prix, un passager aura tendance à acheter un itinéraire partagé au lieu de deux segments de vol séparés.

En d'autres mots, le partage de tronçons de vol devient rapidement intéressant pour les transporteurs comme pour les passagers. D'une part parce que les transporteurs n'ont rien ou presque rien à déboursier pour étendre leur réseau et pénétrer d'autres marchés et de l'autre parce

que les passagers se voient offrir un meilleur service et de meilleurs tarifs pour leurs déplacements.

1.2 Complexité du problème

Si la décision de partager des vols ou non semble évidente, le choix des vols à partager lui est tout sauf simple. Il est une chose de décider d'étendre son réseau avec de nouveaux partenariats, il en est une autre de choisir quels marchés pénétrer, avec quelles compagnies s'associer, quels vols choisir précisément et sous quelles conditions. En effet, les possibilités sont pratiquement infinies. Une compagnie doit soigneusement évaluer les partenariats possibles en analysant la complémentarité des réseaux respectifs et l'impact du partage sur la rentabilité du réseau domestique, la facilité d'intégration des opérations, l'impact d'un nouveau partenaire sur les partenaires déjà existants et les alliances, les lois en vigueur de chaque pays touché, les conventions collectives respectives, les effets sur le réseau de modifier l'offre de vols, et la liste pourrait encore s'allonger.

Parmi cette liste, il existe autant de facteurs subjectifs qu'il y en a d'objectifs. Le partage de tronçons de vol est un problème qui illustre parfaitement la symbiose qui doit exister entre l'évaluation de critères subjectifs et l'utilisation d'outils mathématiques. D'un côté, aucun humain ne pourrait optimiser *parfaitement* le partage de tronçons de vol d'une compagnie sur l'ensemble de son réseau. De l'autre, aucun outil mathématique ne pourrait prendre en considération *tous* les éléments qui influent dans le partage de tronçons de vol et proposer *la* meilleure solution. Il serait d'ailleurs farfelu d'essayer de quantifier exactement l'effet sur l'image d'une compagnie de s'associer à une autre compagnie tout comme il serait impossible de pondérer la qualité des relations entre deux compagnies. Par conséquent, une bonne façon d'aborder le partage de tronçons de vol est d'utiliser des outils mathématiques qui considèrent un maximum d'éléments objectifs et d'évaluer les critères subjectifs restants en se basant sur une expérience solide de l'industrie aérienne.

La section suivante vise à décrire les bases de tout modèle mathématique qui tente d'étudier un réseau aérien, c'est-à-dire la partie objective où les mathématiques appliquées peuvent contribuer à résoudre le problème du partage de tronçons de vol.

1.3 Modèle de répartition de la demande

Pour pouvoir étudier les effets du partage de tronçons de vol, il faut posséder les informations d'un réseau aérien et être capable de modéliser la répartition des passagers sur les vols existants. Le schéma suivant vise à clarifier le vocabulaire employé ici:

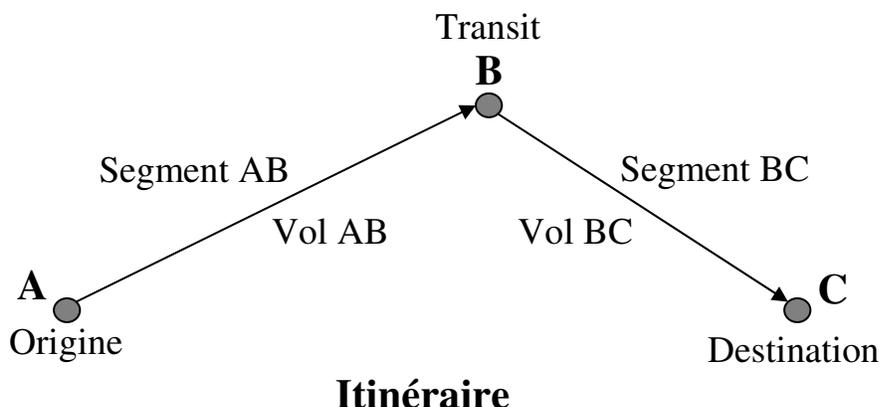


Figure 1: Itinéraire type ABC

Les modèles de simulation les plus utilisés actuellement dans l'industrie aérienne déterminent la demande sur chaque vol en fonction de la demande sur les itinéraires complets que parcourent les passagers, avec une origine, une destination et la plupart du temps, avec un ou plusieurs transits. Ce type de modèle est très bien décrit dans les articles O'Neal et al. (2007) ainsi que dans Coldren et Koppelman (2004) et se divise habituellement en trois phases.

La *première phase* consiste à extraire l'information disponible sur les vols de toutes les compagnies aériennes pour une série de marchés « Origine-Destination » donnée et construire tous les itinéraires possibles, c'est-à-dire toutes les possibilités de déplacement qu'un passager peut effectuer sur le réseau aérien dans une semaine typique. Trois contraintes principales sont considérées ici pour éliminer les itinéraires qui ne sont pas réalistes. Règle générale, le nombre de segments de vol dans un itinéraire est limité à trois ou quatre. Le temps de connexion entre deux vols d'un même itinéraire varie habituellement de 30 minutes à 3 heures, pour qu'un passager ait le temps de se rendre à son prochain vol, mais qu'il n'ait pas à attendre un temps démesuré entre ses deux vols. Finalement sont écartés les itinéraires qui présentent une trop grande distance parcourue par rapport à la distance réelle entre l'origine et la destination. À titre

d'exemple, un itinéraire *Vancouver – Calgary* composé de deux vols avec un transit à *New York* serait automatiquement écarté puisqu'il ne serait aucunement attrayant pour un passager. Ainsi pour chaque marché Origine-Destination étudié, une liste de tous les itinéraires possibles de l'origine vers la destination est créée. En terme économique, cette information représente l'offre au cours d'une certaine semaine. La demande est ensuite définie comme étant le nombre de passagers qui souhaite aller de l'origine vers la destination au cours de cette même semaine. L'acquisition de cette donnée est basée sur l'historique du trafic aérien.

La *deuxième phase* consiste à répartir la demande sur l'offre, selon le comportement des passagers. En d'autres mots, cette étape vise à modéliser la façon dont les passagers se répartiront sur les vols disponibles. Cette méthode repose sur le principe que les itinéraires n'ont pas tous le même attrait pour un passager. Il est évident qu'un passager préférera acheter un vol direct *Vancouver – Calgary* qui dure une heure plutôt qu'acheter deux vols en effectuant un transit à *Seattle*, pour une durée totale de 3h. Donc, une valeur d'attraction totale sera attribuée à chaque itinéraire du réseau en fonction de plusieurs facteurs considérés influents tels que le nombre de segments de vol, l'heure de départ et d'arrivée, la durée totale de l'itinéraire et la compétition présente dans le marché, pour en nommer que quelques-uns. L'industrie aérienne, aidée de la communauté scientifique, est parvenue à modéliser le comportement des passagers et à chiffrer l'attrait des itinéraires avec une telle précision que ces modèles sont maintenant à la base de tous les outils de prévisions des compagnies aériennes du monde. À l'aide de cette expertise, la demande Origine-Destination sera répartie sur les itinéraires possibles en favorisant ceux qui affichent un grand attrait au détriment des autres.

Toutefois, l'attrait élevé d'un itinéraire ne signifie pas pour autant que la capacité disponible est assez grande pour accommoder tous les passagers qui souhaiteraient l'emprunter. Plusieurs itinéraires se verront attribuer plus de passagers que le nombre de sièges disponibles. Pour cette raison, la *troisième phase* consiste à calculer la demande conditionnelle à la capacité à partir de la demande pure initialement attribuée à chaque itinéraire. Autrement dit, les itinéraires qui ne peuvent recevoir toute la demande pure qui leur est attribuée vont rediriger leurs surplus vers les itinéraires moins attrayants qui ne sont pas encore remplis. À ce niveau, les méthodes diffèrent, mais le but reste d'obtenir la répartition des passagers la plus réaliste possible sur l'ensemble du

réseau aérien. Une revue plus détaillée des méthodes de répartition de la demande est faite au Chapitre 4.

Avec un tel modèle de répartition de la demande, il devient possible d'étudier l'impact d'un vol partagé dans un réseau. L'hypothèse de départ est qu'un itinéraire attire généralement plus de passagers lorsqu'il est partagé, pour toutes les raisons nommées plus haut : une meilleure connectivité, une plus grande fréquence, une garantie de connexion et parfois même un tarif plus bas. Ainsi, lors de l'attribution de la demande sur un réseau, plus de passagers seront assignés sur un itinéraire partagé. En effectuant deux résolutions consécutives d'un réseau, soit en posant un certain itinéraire non partagé et en le posant partagé par la suite, il est possible d'analyser les effets du partenariat sur l'itinéraire comme tel, mais également sur les itinéraires compétitifs et sur les marchés voisins.

1.4 Structure du mémoire

Les éléments de base du partage de tronçons de vols ayant été défini, le reste du document est constitué comme suit : le Chapitre 2 couvre la littérature qui fait état de l'optimisation des profits liés à la sélection des vols partagés, le Chapitre 3 définit l'objectif du projet, le situe dans la littérature et décrit l'approche générale de la nouvelle méthode élaborée, le Chapitre 4 décrit le modèle de répartition de la demande construit, le Chapitre 5 présente l'heuristique proposée et le Chapitre 6 présente les résultats et souligne les éléments de discussion. Une conclusion et la bibliographie terminent le mémoire.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Si la littérature aborde abondamment le phénomène de partage de tronçons de vol, il en est autrement de l'optimisation des profits lié à la sélection des vols partagés avec chaque partenaire. En d'autres mots, le partage de tronçons de vol est largement étudié, mais très peu est dit sur les façons de réaliser ce type de partenariat et d'en tirer un maximum de profit.

Sivakumar (2003) avance le premier modèle visant à optimiser le revenu du partage de tronçons de vol en utilisant la formulation d'un problème de sac à dos, mieux connu sous l'appellation anglaise de « knapsack problem ». Dans son modèle appliqué au cas de United Airlines, il considère chaque vol partagé possible comme une variable binaire (0 ou 1) et définit la fonction objectif comme le revenu incrémental généré pour tous les vols partagés choisis. Ce modèle propose des vols que United Airlines devrait choisir sur des compagnies partenaires et des vols de United Airlines qu'il serait avantageux de partager avec des partenaires. Sivakumar utilise le logiciel de répartition de la demande de United Airlines pour choisir sa sélection de vols partagés. Le modèle qu'il propose tient compte des restrictions sur le nombre de numéros de vol qu'il est possible de partager. De plus, ce dernier considère non seulement les revenus directs générés par la hausse de demande sur le réseau de United Airlines, mais également les revenus générés lorsque United Airlines vend des sièges sur les vols des compagnies partenaires. Il propose d'ailleurs que la sélection de vols partagés se fasse en même temps que l'entente commerciale qui fixe les ratios de partage des revenus au lieu que cela se fasse en deuxième temps. Finalement, il soutient que la stratégie répandue de choisir les vols partagés qui présentent les plus petits temps de connexion n'est pas optimale.

Srinivasan (2004) définit également tous les vols partagés possibles comme des variables binaires (0 ou 1) et se base sur le revenu incrémental pour choisir des vols à partager. Il propose que deux partenaires, chacun de leur côté, effectuent leur sélection de vol de cette manière en considérant les ratios de distribution des revenus et les restrictions sur le nombre de vols qu'il est possible de partager. Par la suite, Srinivasan suggère d'utiliser la théorie des jeux pour que les deux partenaires, à la lumière de leurs calculs, négocient une entente et définissent des méthodes de compensation pour arriver à un consensus.

O'Neal et al. (2007) se basent sur les modèles de Sivakumar (2003) et Srinivasan (2004), mais intègre un élément nouveau : ils utilisent un modèle qui répartit la demande sur des itinéraires « Origine-Destination » contrairement à ces deux modèles précédents qui répartissent la demande sur les segments de vol. Ce faisant, les auteurs n'étudient plus seulement le revenu supplémentaire généré pour chaque segment de vol choisi, mais tentent de maximiser le revenu total du transporteur en fonction de sa sélection de vols partagés, considérant ainsi l'effet de partager un vol sur l'ensemble du réseau et non seulement sur ce vol. De plus, le fait de répartir la demande sur les itinéraires considère automatiquement le phénomène de surréservation qui était difficile à modéliser dans les modèles qui répartissaient la demande sur des segments de vol.

Dans l'ordre, les auteurs construisent d'abord tous les itinéraires possibles. À partir d'un fichier qui contient les informations de tous les vols des transporteurs, toutes les combinaisons de routes réalistes dans une semaine typique sont énumérées. Dans ce cas-ci, toutes les routes présentent un maximum de 3 vols un à la suite de l'autre et la distance parcourue est raisonnable par rapport à la distance directe entre l'origine et la destination. Ensuite, ces routes sont associées à des combinaisons de numéros de vol réels en s'assurant que les passagers disposent d'assez de temps entre chaque vol.

Dans un deuxième temps, les auteurs font une moyenne des prix publiés des compagnies aériennes pour chaque marché à un instant précis et pondèrent celle-ci à l'aide de l'historique des proportions de réservations de chaque classe. Ils assignent une valeur d'attrance à chaque itinéraire selon le modèle de répartition de la demande de Delta Airlines. Et, le nombre de personnes voyageant sur un marché chaque semaine étant connu auprès de l'« US Department of Transportation », un certain nombre de passagers est attribué à chaque itinéraire. Finalement, tous les passagers excédant la capacité de l'avion sont répartis sur le prochain itinéraire la même journée.

Un programme linéaire est par la suite développé pour déterminer, dans le cas réel de Delta Airlines, un ensemble idéal de vols à partager avec ses partenaires pour maximiser ses revenus, tout en incluant les contraintes et les règles de partage des profits de chaque partenariat, les lois fédérales en vigueur et les restrictions imposées par les syndicats d'employés, notamment celui des pilotes d'avion.

La construction d'itinéraire est élaborée en C, les prévisions de passagers sont gérées en SAS et l'optimisation est un programme C++ qui fait appel au solveur CPLEX version 9.1 en utilisant la technologie Concert version 2.2. La construction d'itinéraire prend environ 1 heure, les prévisions de passagers environ 5 heures et l'optimisation dure 30 minutes.

En comparant les résultats obtenus avec la cédule réelle de chaque mois de 2005, les auteurs ont prouvé que l'utilisation de cet outil pour le territoire américain seulement pouvait accroître les revenus de Delta d'environ 50 millions de dollars annuellement en plus de réduire le processus du choix des vols partagés à quelques heures comparativement à plusieurs jours auparavant.

Abdelghany et al. (2009) présentent un modèle qui évalue la profitabilité de plusieurs partenariats d'un transporteur en même temps. Ce modèle considère également les vols partagés possibles comme des variables binaires et, dépendamment des informations reçues sur le réseau et les partenaires à étudier, propose une sélection optimale de vols à partager.

Le modèle accorde une attention particulière aux revenus perdus par le déplacement de passagers en raison des itinéraires partagés créés. Les auteurs définissent ce concept comme le coût de déplacement de passagers. En participant à un nouvel itinéraire partagé, un transporteur compte attirer plus de passagers. Toutefois, ces nouveaux passagers apportent moins de revenus puisque ceux-ci sont divisés entre les deux transporteurs partenaires. La capacité des avions étant fixe, les nouveaux passagers attirés peuvent prendre la place de passagers qui auraient acheté un certain itinéraire même s'il n'était pas partagé. Dans ce cas, le transporteur reçoit moins de revenus et il faut considérer ce coût de déplacement de passagers.

Les auteurs tentent de trouver le compromis à faire entre les revenus supplémentaires générés par les nouveaux vols partagés et ces coûts de déplacement de passagers. La fonction objectif est définie comme la somme de trois termes. Le premier terme est la somme des revenus générés par les numéros de vol apposés par les partenaires sur les vols opérés par le transporteur. Le deuxième terme est la somme des revenus générés par les numéros de vol du transporteur apposés sur les vols opérés par les partenaires. Le troisième terme est le coût de déplacement de passagers et est une valeur négative. Cette fonction objectif étant non-linéaire, une heuristique basée sur un algorithme génétique tente itérativement plusieurs sélections de vols partagés et fournit la meilleure sélection trouvée.

Par la suite, deux séries d'expériences sont réalisées à partir d'un réseau typique contenant un transporteur principal qui opère huit vols et huit de ses partenaires. Les auteurs posent l'hypothèse que les huit partenaires souhaitent avoir accès à un nombre précis de sièges sur les huit vols du transporteur principal et que ce dernier obtient un nombre précis de sièges sur certains vols des compagnies avec qui il entre en partenariat.

La première série d'expériences étudie l'impact sur les revenus générés des termes des partenariats et de la variation de la demande. Plus précisément, les auteurs fournissent six graphiques qui illustrent la relation entre les revenus supplémentaires générés par les partenaires et six facteurs influents. Ces facteurs sont les suivants :

1. La demande de passagers qui achète un certain itinéraire, qu'il soit partagé ou non
2. Le nombre de sièges offerts aux partenaires sur les vols opérés par le transporteur principal
3. Le prix moyen des vols du transporteur principal
4. Le rabais moyen consenti aux partenaires sur les vols opérés par le transporteur principal
5. Le nombre de sièges vendus sur les vols des compagnies partenaires
6. Le prix moyen des vols des compagnies partenaires

Les graphiques indiquent qu'une plus grande quantité de sièges vendus à des prix plus élevés augmente constamment les revenus supplémentaires générés. Les auteurs interprètent ces résultats comme une preuve que chaque transporteur doit trouver le meilleur équilibre entre les revenus supplémentaires générés par la vente de sièges sur des compagnies partenaires et les revenus associés aux sièges vendus par ses partenaires sur ses propres vols. Ils concluent en affirmant qu'un transporteur doit choisir ses vols à partager de telle sorte qu'il évite de déplacer ses clients profitables par des clients qui achètent par l'entremise des compagnies partenaires et qui rapportent moins d'argent.

La deuxième série d'expériences étudie deux scénarios de sélection de vols à partager avec plusieurs partenaires. Le premier scénario étudie simultanément tous les partenariats possibles et le second suppose que le transporteur principal négocie chaque partenariat séparément. Les résultats obtenus indiquent qu'il est plus profitable pour un transporteur d'optimiser tous ses partenariats en même temps. Des hausses de profits jusqu'à 30% ont été observées par rapport à l'optimisation séquentielle des partenariats.

Wen (2006) propose une procédure de construction dynamique du réseau aérien d'une compagnie aérienne dans le but de mieux choisir les vols à partager avec ses partenaires. Cette procédure permet à une compagnie aérienne de bien comprendre le comportement de son réseau au cours de la négociation de ses partenariats et améliorer son réseau de manière itérative en maximisant à chaque fois les profits totaux, le nombre de passagers transportés et en minimisant le nombre de passagers subissant un retard de vol. Une étude de cas a été faite pour la compagnie EVA Airways en considérant deux partenaires majeurs, soit Continental Airlines et All Nippon Airways. Il en ressort que ces trois partenaires ont bénéficié de ce partenariat. L'auteur soutient que dans des conditions complémentaires, EVA et Continental ont augmenté leur fréquence de vols. Dans des conditions parallèles, les partenaires ont plutôt tendance à faire des profits supplémentaires dans des marchés où ils détiennent de grandes parts de marché. Les résultats de cette étude de cas ont été démontrés fiables lorsque comparés aux données réelles disponibles et confirme la pertinence de cette procédure de construction de réseau.

CHAPITRE 3 UNE NOUVELLE APPROCHE POUR LA SÉLECTION DES VOLS PARTAGÉS

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle approche pour résoudre le problème de la sélection optimale des vols partagés entre plusieurs transporteurs aériens. Afin de mettre en lumière la méthode qui sera proposée, nous amorcerons ce chapitre par l'analyse des lacunes observées dans les méthodes actuellement utilisées pour résoudre le problème de la sélection des vols partagés. Les objectifs du projet seront ensuite présentés, suivis d'une description de l'approche générale et de la présentation du partenaire industriel qui a collaboré à l'élaboration de cette nouvelle méthode.

3.1 Lacunes des versions précédentes

Dans tous les articles cités dans la revue de littérature, les auteurs utilisent un modèle mathématique qui optimise soit la sélection de vols à partager ou la fréquence de vols à partager dans un corridor avec un ou plusieurs partenaires. Ces approches procèdent en deux phases. Dans la première phase, on estime le nombre de passagers sur chaque itinéraire. Dans la seconde phase, on évalue les revenus potentiels en s'appuyant sur la répartition des passagers obtenue de la première phase afin de sélectionner la liste des vols à partager. Le nombre de passagers sur chaque itinéraire est donc calculé une seule fois lors de la première phase et la seconde phase utilise ce paramètre par la suite sans jamais le modifier.

Cette façon de faire néglige un élément important : l'ajout d'un vol partagé dans un réseau peut modifier significativement le flot de passagers sur les itinéraires dont il fait partie et ceux qui lui sont concurrentiels. En effet, lorsqu'une compagnie aérienne A choisit de partager un vol de la compagnie B, tous les itinéraires de la compagnie A qui utilisent ce nouveau vol ont automatiquement un plus grand attrait. Étant donné que la répartition de la demande dépend directement de l'attrait des itinéraires dans un marché, ces nouveaux itinéraires partagés attirent donc plus de passagers, au détriment des itinéraires concurrentiels. Par exemple, si un vol *Toronto-Montréal* devient partagé et attire désormais plus de passagers que sa capacité lui permet, il est possible que quelques passagers qui désiraient utiliser ce vol pour effectuer un itinéraire *Vancouver-Toronto-Montréal* soient contraints d'emprunter un autre vol sur la portion

Toronto-Montréal. Ainsi, le fait de rendre un vol partagé dans un certain marché peut modifier le flot de passagers dans ce marché et probablement dans plusieurs autres marchés voisins.

En négligeant cet effet, les modèles de Sivakumar (2003), Srinivasan (2004) ainsi et O'Neal et al. (2007), présentés au Chapitre 2, ne considèrent pas l'impact de la modification de la demande résultant des variations de l'attrait des itinéraires partagés. Abdelghany et al. (2009) considèrent un certain coût de déplacement des passagers, mais seulement à l'intérieur des classes d'un même vol. En d'autres mots, ce modèle assume que lorsqu'un vol devient partagé, le nombre de passagers intéressés à acheter chaque type de classe change. Ainsi, en devenant partagé, un vol pourrait devoir accepter plusieurs passagers à faible revenu qui prendraient la place de passagers qui étaient prêts à déboursier beaucoup plus, ce qui aurait pour effet de diminuer la rentabilité du vol en question. Toutefois, ces auteurs ne considèrent pas la variation des coûts engendrée par une nouvelle répartition de la demande dans le réseau.

Il est pertinent de considérer ce coût de répartition des passagers entre les itinéraires, car l'ajout d'un vol partagé a des impacts sur le réseau d'un transporteur aérien. Par exemple, l'itinéraire qui deviendrait partagé en utilisant un vol d'Air Canada sur **Los Angeles – Denver** et un vol de la compagnie United Airlines sur **Denver – Montréal** pourrait attirer de nouveaux passagers et générer des revenus supplémentaires. Toutefois, si ces nouveaux passagers prenaient auparavant le vol direct **Los Angeles – Montréal** d'Air Canada, il est possible que l'effet final soit négatif pour Air Canada. Un passager qui emprunte le vol direct d'Air Canada génère beaucoup plus de revenus pour la compagnie aérienne que si ce dernier emprunte le nouvel itinéraire partagé dont une partie des revenus sera partagée avec United Airlines. Lorsqu'un seul vol est partagé, le calcul du gain ou de la perte de revenus peut s'estimer de façon assez directe. Cependant, lorsque des centaines de vols et d'itinéraires sont en jeu dans un réseau, ce calcul peut devenir beaucoup plus complexe.

De plus, sachant que l'ajout d'un vol partagé modifie la répartition de la demande dans le réseau, il est plus que probable que ce vol partagé ait également des effets sur les autres vols partagés. La profitabilité d'un vol partagé dépend donc également des autres vols déjà partagés d'une compagnie aérienne.

De son côté, Wen (2006) se distingue un peu des autres auteurs en proposant une façon de construire le réseau d'une alliance entre deux ou plusieurs partenaires en prenant soin de calculer la fréquence de vol optimale que les compagnies partenaires devraient se partager sur chaque marché Origine-Destination. Toutefois, une compagnie qui choisit des vols partagés a habituellement peu de contrôle sur la construction du réseau d'un partenaire. Dans la réalité, un transporteur aérien construit son réseau et tente par la suite d'y arrimer le mieux possible des vols partagés.

Deux éléments principaux ressortent donc de l'étude des méthodes de résolution proposées dans la littérature :

- 1) la nécessité de considérer l'impact que l'instauration d'un nouveau vol partagé a sur la demande de chaque itinéraire dans le réseau;
- 2) la nécessité de considérer l'impact de l'instauration d'un nouveau vol partagé sur la rentabilité des autres vols partagés de la compagnie aérienne.

3.2 Objectifs du projet

À la lumière des lacunes énumérées à la section précédente, on propose la construction d'un outil d'aide à la décision pour le processus de sélection des vols à partager d'une compagnie aérienne avec ses partenaires qui tient compte des impacts sur la répartition des passagers dans le réseau lorsqu'un vol devient partagé et de l'interaction entre tous les vols, y compris les vols partagés nouvellement introduits dans le réseau.

Pour modéliser les effets de l'inclusion d'un vol partagé dans le réseau, on propose la construction et la validation d'un programme linéaire dont la solution proposera une répartition de la demande sur un réseau aérien qui tient compte de la sélection de vols partagés. En se basant sur ce modèle mathématique, une méthode heuristique sera développée pour améliorer les profits d'une compagnie aérienne en modifiant, à chaque itération, la sélection de vols partagés. L'outil construit sera appliqué au cas précis d'Air Canada dans le cadre d'un partenariat avec Continental Airlines.

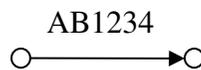
3.3 Approche générale

Plutôt que de sélectionner les vols à partager en une seule étape, on propose de construire une heuristique qui, à chaque itération, répartira la demande sur le réseau en fonction de la sélection de vols partagés et qui modifiera cette sélection dans le but d'augmenter la profitabilité du transporteur. De cette façon, les effets de l'instauration d'un vol partagé sur le réseau et sur les autres vols partagés seront pris en compte.

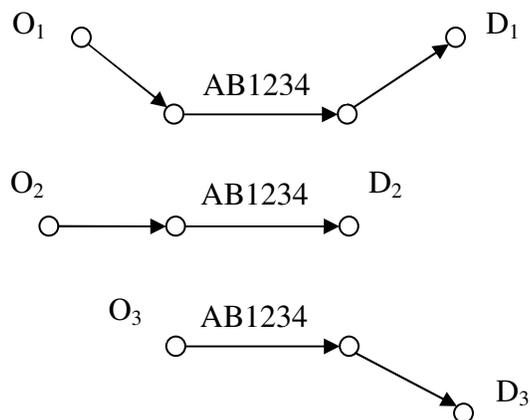
La première étape de cette heuristique est de lister tous les vols qu'un transporteur pourrait partager avec ses partenaires. Dans un deuxième temps, chaque possibilité de vol à partager est étudiée indépendamment dans un graphe réduit. La notion de graphe réduit représente ici tous les vols et itinéraires sur lesquels l'inclusion d'un vol partagé peut avoir un effet significatif.

Voici les étapes de construction d'un graphe réduit avec le cas fictif du vol AB1234 qui serait utilisé dans seulement trois itinéraires :

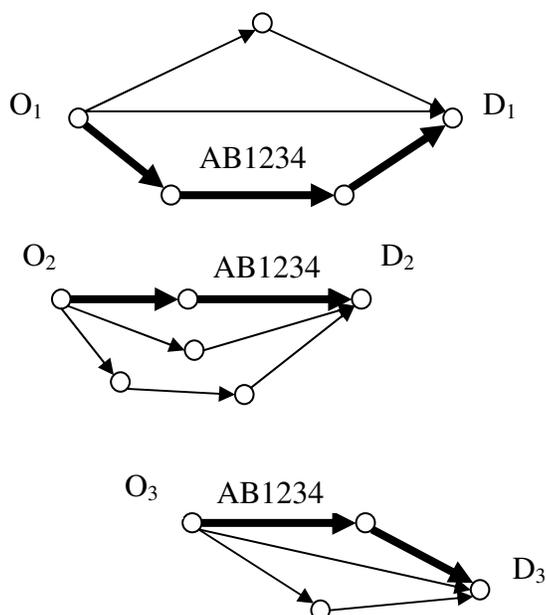
1. Vol partagé possible



2. Lister tous les itinéraires qui empruntent ce vol



3. Lister tous les itinéraires concurrents aux itinéraires listés à l'étape 2



4. Intégrer tous les itinéraires de l'étape 3 dans le même graphe

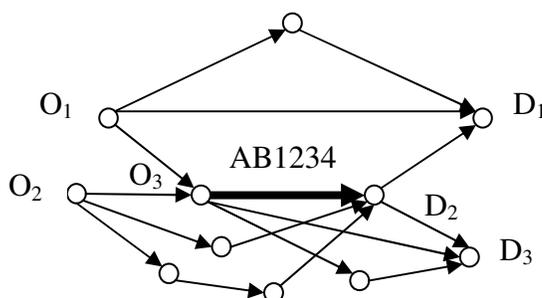


Figure 1: Étapes de construction d'un graphe réduit

Le graphe réduit obtenu est donc l'ensemble des itinéraires présents dans les marchés Origine-Destination qui peuvent être affectés par le partage du vol AB1234. On émet ici l'hypothèse que le changement de répartition des passagers n'affectera que les vols de ce graphe réduit. Par cette hypothèse, on néglige l'influence des autres vols du réseau global sur les vols du graphe réduit et vice-versa. Cette influence existe en réalité, mais on considère que son impact est négligeable. Cette abstraction sera compensée en partie par l'approche heuristique qui est proposée.

Pour étudier l'impact de l'inclusion d'un vol partagé, deux évaluations de la répartition de la demande sont effectuées : l'une lorsque le vol AB1234 n'est pas considéré partagé, l'autre lorsque le vol AB1234 est partagé. Pour étudier l'effet du partage de ce vol, l'indicateur utilisé sera la différence de revenu total généré dans l'ensemble du graphe réduit pour tous les vols opérés par le transporteur en question. Cette différence de revenu, notée Δ_p , représente donc le changement de revenu entre la première et la deuxième résolution. Suite à cette étape, il est possible d'établir la liste des tous les vols qu'on désire partager et de calculer pour chacun d'eux la valeur de Δ_p . Cette valeur, qui peut être positive ou négative, indique en quelque sorte l'attrait pour une compagnie aérienne de partager uniquement ce vol pour un réseau donné.

L'heuristique proposée se base sur cette valeur Δ_p pour choisir une solution initiale avec les vols qui apparaissent les plus profitables. En considérant l'ajout de ces vols nouvellement partagés, la demande sera redistribuée sur le graphe réduit respectif de chaque vol choisi et il sera par la suite possible de quantifier l'impact que les vols partagés ont entre eux. En recalculant les valeurs Δ_p , certains vols apparaîtront plus profitables et d'autres perdront leur attrait. Le défi est donc de modifier la sélection de vols partagés pour augmenter la rentabilité totale d'un partenariat, en se basant sur la valeur Δ_p à chaque itération. L'heuristique proposée est explicitement décrite au chapitre 5. Toutefois, avant de donner plus de détails sur l'heuristique, il est souhaitable de décrire précisément le modèle de répartition de la demande qui sera utilisé à l'intérieur de l'heuristique. Le Chapitre 4 est consacré à la description du modèle de répartition de la demande construit dans le cadre de ce projet.

3.4 Collaboration

L'heuristique proposée dans le cadre de ce projet nécessite une grande quantité de données sur le réseau d'un transporteur aérien. Le projet en entier a été effectué en partenariat avec Air Canada qui a accepté de fournir ces données essentielles. Le réseau étudié dans les prochaines sections est donc celui d'Air Canada et les vols partagés possibles sont tous ceux de Continental Airlines, un partenaire majeur d'Air Canada depuis 2009.

CHAPITRE 4 CONSTRUCTION D'UN MODÈLE DE RÉPARTITION DE LA DEMANDE

Dans l'approche globale proposée à la section 3.3, la répartition des passagers sur les différents vols est effectuée un grand nombre de fois à chaque itération. L'efficacité de la méthode repose alors sur cette étape et plus particulièrement sur le temps qui y sera consacré. De plus, puisque les revenus dépendent de cette répartition, il faut s'assurer que celle-ci soit conforme à celle qui aurait été obtenue par le logiciel normalement utilisé en entreprise. Le fonctionnement général de tels types de modèle sera d'abord présenté, suivi de l'approche proposée. Le modèle mathématique sera ensuite décrit et validé. Finalement, ce chapitre se conclura avec la présentation de la méthode de blocage du flot qui permet d'avoir un modèle plus réaliste.

4.1 Modèles existants

Les compagnies aériennes investissent d'énormes efforts à prédire la demande qu'il y aura sur leur réseau dans les mois à venir. Cette information leur permet d'affecter le bon type d'appareil et le bon nombre de pilotes et d'agents de bord à chaque vol en plus de permettre la construction de l'horaire de maintenance de tous les avions. Il va donc sans dire que la capacité d'un transporteur à faire de bonnes prédictions à ce niveau est cruciale. Beaucoup de modèles de répartition de la demande ont été élaborés au fil du temps comme le témoignent les articles de Koppelman et Pas (1980), Ippolito (1981), Abrahams (1983), Prousaloglou et Koppelman (1995), Suzuki (2000) et Coldren et Koppelman (2004).

Dans tous ces modèles, le calcul de la répartition des passagers repose sur le comportement des passagers, plus particulièrement en fonction de leur intérêt pour les vols qui sont offerts. Ces modèles établissent en premier lieu la liste de tous les itinéraires possibles dans un certain réseau. En deuxième temps, ceux-ci considèrent une série de facteurs, exhaustive ou limitée, pour établir la valeur d'attraction d'un itinéraire pour un passager. À l'aide de ces valeurs d'attraction, les modèles calculent ensuite la part de marché de chaque itinéraire en divisant sa valeur d'attraction par rapport à la somme des valeurs d'attraction de tous les itinéraires qui lui sont concurrents dans le même marché. Finalement, la part de marché de chaque itinéraire est multipliée par la demande du marché où se trouve l'itinéraire pour obtenir la répartition des passagers dans le réseau complet.

Les modèles diffèrent habituellement sur le choix et la pondération de chacun des facteurs qui déterminent la valeur d'attraction de chaque itinéraire, sur les hypothèses posées ainsi que sur le type d'équations et de paramètres employés.

Dans la réalité, la répartition de la demande ne se termine pas une fois qu'un nombre de passagers est attribué à chaque itinéraire. En effet, dans bien des cas, plus de passagers sont attribués à un vol que la capacité physique même de ce vol. À ce sujet, plusieurs méthodes ont été développées comme celles de Shlifer, E. & Vardi (1975), Belobaba & Farkas (1999) et Li & Oum (2000) pour déterminer comment réattribuer l'excédent de demande d'un vol sur d'autres itinéraires alternatifs. Ces méthodes sont souvent connues sous le terme anglais de « Spill & Recapture ». Ces méthodes interviennent habituellement après qu'une demande équivalente à la part de marché ait été attribuée à tous les itinéraires. À ce moment, la demande en surplus qui a été attribuée sur les vols dont la capacité physique est excédée est répartie sur les autres vols les plus attrayants où il reste de la place. Si les prochains vols à se faire attribuer de la demande atteignent eux aussi leur capacité physique, une autre répartition de la demande excédentaire est faite sur les prochains vols les plus attrayants. Et ce processus se continue tant et aussi longtemps que la capacité physique de tous les vols n'est pas respectée. Dans l'industrie aérienne, les itérations de cette étape sont décrites comme étant des vagues consécutives de « Spill and Recapture ». Bien que ces itérations améliorent grandement les prévisions de demande, il importe de spécifier qu'elles requièrent aussi des temps de résolution significatifs.

4.2 Approche générale

Le réseau considéré dans ce projet inclut tous les marchés Origine-Destination dans le monde qui peuvent influencer la demande sur les vols d'Air Canada. La façon de définir un tel réseau est de lister tous les itinéraires présents sur ces marchés. Cela comprend toutes les combinaisons de vols réalistes dans tous les marchés où Air Canada est présent ainsi que dans plusieurs marchés connexes qui influent d'une façon ou d'une autre sur le réseau d'Air Canada. Il s'agit donc de tous les marchés pour lesquels Air Canada possède des valeurs d'attractions qui ont été calibrées avec des données historiques. Pour ce faire, le fichier OAG (Official Airline Guide), qui comprend les informations de vol de la grande majorité des compagnies aériennes, a été utilisé.

Le réseau considéré est celui qu'Air Canada utilise actuellement pour effectuer toutes ses prévisions de demande. On peut alors affirmer que la liste d'itinéraires est complète et fiable. Toutefois, cette liste contient seulement des itinéraires réalistes. Ainsi, les marchés de moins de 10 passagers par semaine sont exclus. D'autre part, on ne considère que les itinéraires dont le temps d'attente entre deux vols se situe entre 30 minutes et trois heures et qui comportent un maximum de quatre vols. Dans le cadre de ce projet de recherche, 1 643 538 itinéraires ont été considérés et ceux-ci couvrent une semaine typique de l'hiver 2007-2008.

Pour chacun des vols qui constituent en tout ou en partie chaque itinéraire de cette liste, on connaît son origine, sa destination, le jour (ou les jours) de la semaine où il est offert, sa capacité et la distance parcourue. De cette information, on utilise plus particulièrement certains éléments qui ont une plus grande influence sur l'attrait d'un itinéraire : l'heure de départ, l'heure d'arrivée, la durée totale et le type de connexion. À ceux-ci s'ajoutent la compétition sur les plages horaires et la préférence pour un transporteur aérien. Si l'effet des trois premiers facteurs sur le choix du consommateur est assez simple, celui des trois derniers est un peu plus complexe. Le facteur de compétition sur les plages horaires met en lumière le fait qu'il y a des pics de trafic dans les aéroports. Par exemple, on sait qu'il y a une forte demande pour le vol d'affaire *Montréal-Toronto* à 8h le matin ou pour vol *Montréal-Londres* le soir puisque celui-ci arrivera à destination le lendemain matin. Il y a un avantage pour une compagnie aérienne à distancer de quelques minutes ses vols de ceux des concurrents pour attirer plus de passagers. Il a été observé que de changer l'heure de départ d'un vol de quelques minutes seulement peut avoir des répercussions importantes sur son attrait.

De son côté, le type de connexion influe sur l'attrait d'un itinéraire de la façon suivante :

Tableau 1. Attrait et abréviations anglophones des types de connexion

	Type de Connexion	Abréviation anglophone	Attrait
1	Vol sans escale d'une compagnie qui est partagé avec au moins une autre compagnie	Non-Stop+Codeshare	
2	Vol sans escale	Non-Stop	
3	2 vols ou plus d'une même compagnie durant lesquels le passager ne change pas d'avion et qui sont partagés avec au moins une autre compagnie	Through+Codeshare	
4	2 vols ou plus d'une même compagnie durant lesquels le passager ne change pas d'avion	Through	
5	2 vols ou plus d'une même compagnie durant lesquels le passager change au moins une fois d'avion et qui sont partagés avec au moins une autre compagnie	Online+Codeshare	
6	2 vols ou plus d'une même compagnie durant lesquels le passager change au moins une fois d'avion	Online	
7	2 vols ou plus de compagnies différentes qui partagent cet itinéraire	Interline+Codeshare	
8	2 vols ou plus de compagnies partenaires qui ne partagent pas explicitement cet itinéraire.	Partner Interline	
9	2 vols ou plus de compagnies différentes	Interline	

Le facteur de préférence du transporteur aérien est utilisé pour quantifier l'attrait de l'image d'une compagnie sur les consommateurs. En effet, certains consommateurs préfèrent utiliser une compagnie de leur pays d'origine, certains choisissent une compagnie qui leur donne le sentiment d'être en meilleure sécurité et certains préfèrent un transporteur pour accumuler des points qui peuvent être échangés pour des biens ou services éventuellement. Ce genre de préférence est difficile à modéliser et est intégré dans le facteur de préférence du transporteur aérien.

Dans le cadre du présent projet, ce sont ces six facteurs, calibrés avec les données historiques des vols d'Air Canada, qui ont été utilisés pour calculer une valeur d'attraction totale pour chaque itinéraire. Connaissant la valeur d'attraction totale de chaque itinéraire et le nombre de passagers estimés sur chaque marché, il est alors possible de calculer la part de marché que chaque itinéraire devrait obtenir dans son marché. En d'autres mots, on peut estimer le nombre de passagers qui sera attribué à chaque itinéraire en fonction de son attraction relative dans le marché qu'il occupe et de la capacité totale de l'itinéraire. Ainsi, les valeurs d'attraction, calibrées en

fonction de données historiques, sont sans unités et ne servent qu'à évaluer la demande par itinéraire.

Les formules mathématiques utilisées pour répartir la demande dans le modèle construit sont les mêmes que celles utilisées par le logiciel d'Air Canada pour effectuer les prévisions de demande. Pour des raisons de confidentialité, la nature de ces formules ne sera pas discutée. Le modèle mathématique présenté utilisera la notion d'attrance sans expliquer comment les passagers se répartissent en fonction de cette attrance.

Air Canada, comme tous les autres transporteurs aériens, utilise un logiciel de répartition de la demande pour prédire la demande sur son réseau. L'idée d'intégrer ce logiciel dans l'heuristique a été envisagée. Toutefois, le logiciel d'Air Canada prend environ 15 minutes pour répartir la demande sur le réseau entier d'Air Canada. Il serait donc inefficace d'utiliser ce logiciel pour quantifier l'effet sur la répartition des passagers d'insérer un vol partagé dans un marché. L'approche envisagée est plutôt d'utiliser un modèle de programmation mathématique qui permettra de répartir rapidement la demande sur un graphe réduit et d'utiliser les résultats ainsi obtenus à l'intérieur d'une heuristique.

4.3 Modèle mathématique

Le modèle de programmation mathématique qui sera présenté utilise les indices v , i et m , pour désigner respectivement les vols, les itinéraires et les marchés Origine-Destination. L'indice p représente un vol partagé étudié pour lequel on construit un graphe réduit. Les ensembles V , I et M représentent l'ensemble des vols, des itinéraires et des marchés Origine-Destination qui composent le réseau complet alors que V_p , I_p et M_p représentent les sous-ensembles qui définissent le graphe réduit du vol partagé p . Ainsi, chaque vol partagé p est étudié sur un graphe réduit qui lui est spécifique et qui est construit avec la méthode présentée à la section 3.3.

Les paramètres sont définis comme suit :

D_m : Demande qui se traduit en nombre de passagers qui désirent voyager dans chaque marché Origine-Destination dans une semaine typique

C_v : Capacité physique de chaque vol

A_i : Valeur d'attraction de chaque itinéraire

Deux matrices binaires sont utilisées. La première matrice définit le ou les vols qui composent chaque itinéraire.

$$S_{(i,v)} = \begin{cases} 1, & \text{si le vol } v \text{ fait partie de l'itinéraire } i \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

La deuxième matrice définit les itinéraires présents dans chaque marché Origine-Destination.

$$T_{(m,i)} = \begin{cases} 1, & \text{si l'itinéraire } i \text{ fait partie du marché } m \\ 0, & \text{sinon} \end{cases}$$

De plus, les deux variables de décisions sont :

X_i : Nombre de passagers attribués par le solveur pour chaque itinéraire

e_i : Écart entre le nombre de passagers attribués et la part de marché de l'itinéraire seulement lorsque le nombre de passagers attribués est plus petit que la part de marché.

En se basant sur les déclarations ci-haut, le modèle mathématique est le suivant :

$$\text{Max } Z = \left(\sum_{i \in I_p} X_i * A_i - \sum_{i \in I_p} e_i \right)$$

s. c.

$$(1) \quad \sum_{i \in I_p} X_i * S_{(i,v)} \leq C_v, \quad \forall v \in V_p$$

$$(2) \quad \sum_{i \in I_p} X_i * T_{(m,i)} \leq D_m, \quad \forall m \in M_p$$

$$(3) \quad X_i + e_i \geq \sum_{m \in M_p} \left(\frac{A_i}{\sum_{j \in I_p} (T_{(m,j)} * A_j)} \times D_m \times T_{(m,i)} \right), \quad \forall i \in I_p$$

Le premier terme de la fonction objectif maximise la somme des valeurs d'attrance de chaque itinéraire. Cela revient à dire que les passagers choisissent naturellement les itinéraires qui leur apparaissent les plus attrayants et se répartissent eux-mêmes. Ce faisant, la somme des valeurs d'attrances choisies par les passagers pour tous les itinéraires possibles est maximale. Le deuxième terme de la fonction objectif est la somme des pénalités imposées au solveur lorsque ce dernier attribue moins que la part de marché de chaque itinéraire. Le solveur a donc avantage à attribuer au moins la part de marché à chaque itinéraire et à utiliser cette valeur de pénalité seulement lorsqu'il y est contraint, c'est-à-dire lorsque la capacité physique de certains vols l'en empêche. Cette variable de décision est directement en lien avec le troisième bloc de contraintes. Il n'est pas nécessaire ici d'ajouter un coefficient à e_i puisque les valeurs d'attrances sont de très petites valeurs décimales et e_i représente déjà un très grand nombre.

Le premier bloc de contraintes établit qu'un vol ne peut se voir attribuer plus de demande que sa capacité physique. Le deuxième bloc de contraintes pose que la demande répartie dans un marché Origine-Destination ne peut excéder la demande estimée de voyageurs dans ce marché.

Finalement, le troisième bloc de contraintes a pour rôle de répartir la demande pour représenter la réalité le mieux possible. Ce sont ces contraintes qui forcent le solveur à distribuer la demande en fonction de l'attrait des itinéraires. La particularité de ces contraintes par rapport aux modèles existants est qu'elle tente de remplacer les itérations de type « Spill and Recapture » en une seule étape qui se veut plus rapide.

Tout d'abord, il est pertinent de préciser que le terme de droite dans ce bloc de contraintes représente la part de marché d'un itinéraire i :

$$part\ de\ marché_i = \sum_{M_p} \left(\frac{A_i}{\sum_{j \in I_p} (T_{(m,j)} * A_j)} \times D_m \times T_{(m,i)} \right)$$

Dans cette expression, l'indice j est utilisé pour représenter tous les itinéraires de l'ensemble I_p au même titre que l'indice i . L'indice i étant déjà employé, l'indice j est utilisé pour calculer la somme des valeurs d'attrances dans le marché de l'itinéraire i .

De manière générale, ce troisième groupe de contraintes stipule que le solveur doit attribuer à un itinéraire un flot de passagers plus grand ou égal au flot correspondant à la part de marché de cet itinéraire. Toutefois, il est permis que le solveur contourne cette règle. Le solveur peut en effet

attribuer une valeur positive à e_i . En procédant ainsi, le solveur est par contre pénalisé par le deuxième terme de la fonction objectif. Cette éventualité se produit lorsque la somme des parts de marchés de tous les itinéraires qui empruntent un certain vol est plus grande que la capacité physique de ce vol. Dans ce cas, le solveur tentera d'utiliser la pleine capacité du vol et sera pénalisé pour les parts de marché qu'il ne réussit pas à attribuer. L'utilisation de la variable de décision e_i est essentielle pour que le modèle puisse être résolu en tout temps.

Au niveau de l'horizon de temps, presque toutes les grandes compagnies aériennes du monde partagent l'information de leurs vols dans un fichier hebdomadaire qui permet à chaque transporteur de positionner ses vols dans le réseau mondial. Le modèle construit ne fait pas exception et considère tous les itinéraires dans une semaine typique. Ainsi, la demande hebdomadaire estimée sur chaque marché est répartie sur l'ensemble de ces itinéraires. À ce sujet, il importe donc de spécifier que la notion de vol dans ce modèle est plus spécifique qu'un simple numéro de vol. En effet, un même numéro de vol peut être utilisé chaque jour de la semaine pour représenter le même déplacement Origine-Destination avec les mêmes heures de départ et d'arrivée. Les compagnies se laissent une certaine flexibilité à ce niveau. Une compagnie désigne habituellement un numéro de vol pour un type de déplacement, par exemple, un vol *Chicago-New York* qui part à 8h00. La compagnie décide par la suite la ou les journées de la semaine où ce vol sera effectif, que ce soit seulement le lundi, les mardi-jeudi-samedi ou encore les sept jours de la semaine. De plus, la compagnie aérienne peut affecter des avions avec des capacités différentes chaque jour de la semaine en fonction de la demande prévue. Si le lundi est toujours plus achalandé, l'avion qui effectuera ce vol le lundi pourrait avoir une capacité de 200 passagers comparativement à une capacité de 150 passagers pour les autres vols de la semaine.

Une autre difficulté est que les compagnies aériennes donnent parfois un numéro de vol à un itinéraire, par exemple une compagnie peut attribuer un numéro de vol à un itinéraire *Chicago-New York-Boston* qui connecte à New York. Ainsi, dans les bases de données, le même numéro de vol effectue à la fois un vol *Chicago-New York* et un autre *New York-Boston*. Cette particularité est difficile à gérer puisque toutes les compagnies aériennes ont des façons de faire différentes. Pour bien identifier chaque vol physiquement effectué par un avion, la notion de vol dans ce modèle représente la combinaison d'un numéro de vol, une paire Origine-Destination et

un jour de la semaine. Ainsi, chaque vol étudié est spécifique et il n’y a pas de risque de dédoublement de vol.

La notation habituelle pour les jours de la semaine va de un à sept, un étant l’équivalent du lundi et sept étant l’équivalent du dimanche.

4.4 Validation du modèle construit

Pour analyser la performance du modèle développé, il a été possible de comparer sa répartition des passagers à celle du logiciel d’Air Canada. Il est légitime d’affirmer que si les résultats du modèle de programmation mathématique s’approchent de ceux obtenus du logiciel interne, ce dernier pourra être utilisé avec confiance dans l’heuristique.

Il serait très complexe de comparer les résultats du modèle développé à ceux du logiciel d’Air Canada pour tous les graphes utilisés. Pour valider le modèle développé, les graphes réduits de cinq vols partagés possibles ont été construits : le vol CO0084 qui effectue une connexion *Atlanta – New York*, le vol CO0575 qui parcourt *Toronto-New York*, le vol CO1866 sur *Houston-Toronto*, le vol CO2547 sur *Houston – Mexico* et le vol CO3200 sur *Baltimore-New York*. Pour ces cinq vols, les itinéraires, les valeurs d’attirances, les capacités et les marchés sont identiques pour le modèle développé et le logiciel d’Air Canada. Pour analyser la performance du modèle développé, quatre indicateurs sont utilisés :

Erreur absolue moyenne : Cette valeur représente le nombre de passagers de plus ou de moins que le solveur a attribué, en moyenne, à chaque itinéraire.

$$\text{Erreur absolue moyenne} = \frac{\sum_{i \in \text{itinéraires}} |X_{\text{modèle développé}_i} - X_{\text{logiciel Air Canada}_i}|}{\text{nombre d'itinéraires}}$$

Erreur relative moyenne : Cette valeur est la moyenne, en termes de pourcentage, de la différence entre la répartition du solveur par rapport au logiciel d’Air Canada. De plus, lorsque le nombre de passagers attribués par le logiciel est inférieur à deux passagers, l’erreur relative moyenne est considérée nulle. Cette hypothèse est posée pour empêcher d’avoir des erreurs relatives gigantesques lorsque la demande est très petite.

Erreur relative moyenne =

$$\left\{ \frac{\sum_{i \in \text{itinéraires}} \frac{|X_{\text{modèle développé}_i} - X_{\text{logiciel Air Canada}_i}|}{X_{\text{logiciel Air Canada}_i}}}{\text{nombre d'itinéraires}} \mid X_{\text{logiciel Air Canada}_i} > 2 \forall i \right\}$$

Erreur globale : Cette valeur est la somme des erreurs absolues de tous les itinéraires divisée par la somme de toute la demande attribuée par le logiciel d'Air Canada. La signification de cette valeur est le pourcentage de la demande totale qui n'a pas été attribuée conformément au logiciel d'Air Canada.

$$\text{Erreur globale} = \frac{\sum_{i \in \text{itinéraires}} |X_{\text{modèle développé}_i} - X_{\text{logiciel Air Canada}_i}|}{\sum_{i \in \text{itinéraires}} X_{\text{logiciel Air Canada}_i}}$$

Taux de concordance : Cette valeur est l'inverse de l'erreur globale, c'est-à-dire le pourcentage de la demande totale qui a été attribuée conformément au logiciel d'Air Canada.

$$\text{Taux de concordance} = 1 - \text{Erreur globale}$$

Tableau 2. Comparaison du modèle de répartition de la demande développé avec le logiciel d'Air Canada sur cinq graphes réduits

	CO0084	CO0575	CO1866	CO2547	CO3200
Nombre de marchés Origine-Destination	46	4	36	17	17
Nombre d'itinéraires	5465	877	5723	2825	2897
Nombre de vols	5559	1096	5749	2921	3486
Erreur absolue moyenne (passagers)	0,89	2,17	0,65	0,26	0,03
Erreur relative moyenne	6,09%	2,90%	2,39%	1,04%	0,00%
Erreur globale	13,28%	10,17%	15,54%	6,41%	0,54%
Taux de concordance	86,72%	89,83%	84,46%	93,59%	99,46%
Nombre d'itinéraires avec erreur absolue > 5	95	50	107	6	0
Nombre d'itinéraires avec erreur absolue > 20	46	24	23	5	0
Temps de résolution CPLEX (secondes)	10	5	11	7	7

Pour approfondir l'analyse de ces cinq graphes réduits, les graphiques d'erreur absolue et d'erreur relative pour tous les itinéraires sont présentés à l'annexe 1. À la lumière de ces graphiques et des données du Tableau 2, il est légitime d'affirmer que le modèle développé s'approche manifestement de la résolution du logiciel d'Air Canada, la plus grande erreur relative moyenne étant 6,09%. L'erreur relative moyenne doit toutefois être prise en contexte, puisqu'un itinéraire qui se voit attribuer quatre passagers au lieu de deux présente une erreur relative moyenne de 100% malgré que l'erreur absolue ne soit pas importante. Dès lors, l'erreur globale et le taux de concordance sont des indicateurs plus crédibles. L'erreur globale, qui représente la demande qui n'a pas été répartie conformément au logiciel d'Air Canada, oscille entre 0,54% et 15,54%. Vu de l'angle inverse, les taux de concordance correspondants suggèrent que dans les cinq graphes réduits, au moins 84,46% de la demande est attribuée de la même manière que le logiciel d'Air Canada. Ces résultats démontrent une bonne anticipation de la répartition de

passagers qui confirme que le modèle mathématique se rapproche fortement du logiciel d'Air Canada.

D'autre part, il saute aux yeux que certains itinéraires se voient attribuer des différences significatives de demande comme le témoigne le nombre d'itinéraires avec une erreur absolue supérieure à cinq ou 20. Toutefois, ces écarts ne représentent qu'une très petite proportion des itinéraires présents dans les graphes réduits, soit moins de 3% des itinéraires dans les cinq graphes étudiés. Il s'agit de quelques itinéraires sur plusieurs centaines, voire plusieurs milliers. Ces imprécisions peuvent être considérées comme une source d'erreur sans remettre en question la performance du modèle. Ainsi, dans l'ensemble, le comportement du modèle développé et celui du logiciel d'Air Canada peuvent être considérés comme similaires.

Il est évidemment important que le modèle développé représente la réalité le mieux possible. Toutefois, il est encore plus essentiel que ce dernier soit consistant d'une résolution à l'autre afin d'être en état de comparer la rentabilité d'un vol partagé possible par rapport à un autre. Dans cette optique, le but n'est pas de représenter parfaitement la réalité, mais d'utiliser un modèle le plus près de la réalité possible pour analyser les vols partagés possibles entre eux et éventuellement choisir la meilleure sélection de vols. En d'autres mots, le biais qui est inséré avec le modèle développé est présent à chaque répartition de la demande du modèle construit. Le point fort du logiciel d'Air Canada est évidemment sa précision, compte tenu de la quantité de facteurs qui sont considérés et des multiples méthodes de résolutions qui sont employées. Toutefois, comme il a déjà été expliqué, le défaut de ce logiciel est sa lenteur de résolution. De l'autre côté, la force du modèle développé est sa vitesse de résolution comme le démontrent les temps de résolution de 10, 5, 11, 7 et 7 secondes pour répartir la demande sur les cinq graphes réduits avec CPLEX. Somme toute, à partir des données présentées, le modèle développé est donc considéré assez fiable et assez rapide pour être utilisé dans l'heuristique proposée tel que prévu initialement.

4.5 Blocage du flot

Lors de la construction des graphes réduits, nous perdons la vue d'ensemble du comportement des passagers dans le réseau complet. L'exemple suivant illustre la situation. Supposons qu'un itinéraire *Vancouver-Toronto-New York* transporte 130 personnes, mais que 40 personnes en provenance de Shanghai et 30 personnes en provenance de Tokyo souhaitent emprunter cet itinéraire et que la capacité maximale de cet itinéraire est de 200 sièges.

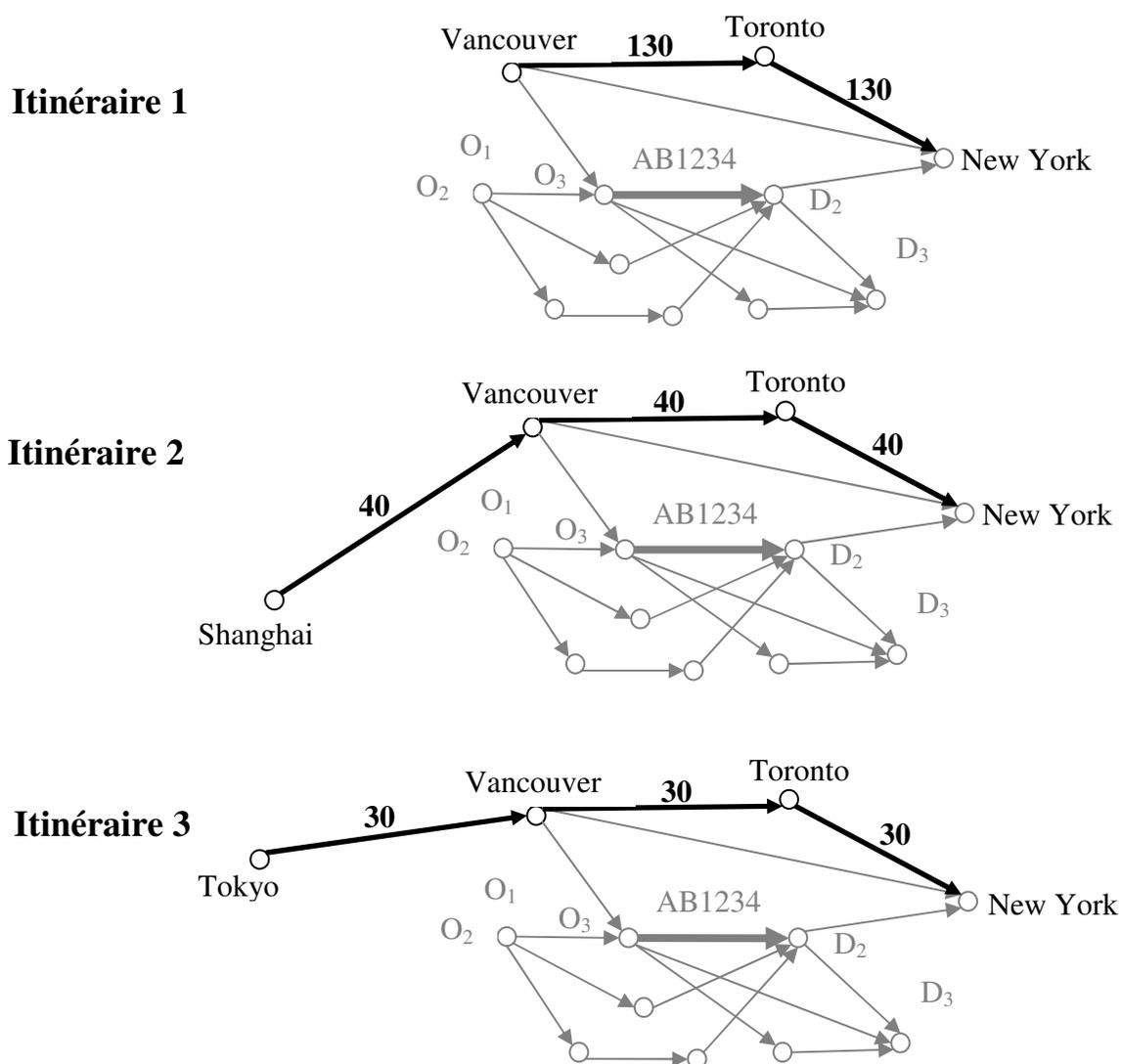


Figure 2. Exemple de trois itinéraires qui utilisent les 2 mêmes vols

Lors de la construction du graphe réduit de *AB1234*, les vols en provenance de Shanghai et Tokyo n'apparaîtront pas. Or, il serait biaisé de poser la capacité de l'itinéraire *Vancouver-Toronto-New York* à 200 puisque dans la réalité, 70 passagers en provenance de Shanghai et Tokyo souhaitent emprunter cet itinéraire. À ce moment, c'est une capacité de 130 places qui devrait être considérée sur cet itinéraire, car dans le réseau complet, les passagers en provenance de Shanghai et de Tokyo seront considérés au même titre que ceux qui effectuent *Vancouver-Toronto-Montréal*.

Pour tenir compte de cet effet, le programme linéaire distribuera seulement la demande associée à des passagers qui voyagent à l'intérieur d'un graphe réduit et bloquera celle qui interfère avec le graphe réduit, mais dont l'origine ou la destination est à l'extérieur du graphe réduit étudié.

Avant de débiter l'heuristique, une répartition de la demande est d'abord faite sur le réseau complet avec le logiciel utilisé chez Air Canada. Par la suite, avant de répartir la demande sur un graphe réduit, chaque itinéraire du réseau complet est analysé afin d'identifier si soit son origine ou soit sa destination est incluse dans le graphe réduit. Si tel est le cas, la demande initialement prévue par Air Canada pour cet itinéraire est soustraite de la capacité des vols de ce dernier qui sont inclus dans le graphe réduit.

Cette méthode de blocage du flot n'a pas été utilisée dans la validation du modèle de la section précédente puisqu'il n'est pas possible d'appliquer cette dernière au logiciel d'Air Canada. Toutefois, cette méthode sera employée dans l'heuristique proposée au chapitre suivant. Il est pertinent de préciser que le blocage du flot modifie seulement la demande qu'il est possible de répartir à chaque vol dans un réseau. La validation du modèle présentée à la section précédente est donc valable, que la méthode de blocage du flot soit utilisée ou non.

CHAPITRE 5 HEURISTIQUE PROPOSÉE

Avec un modèle de répartition de la demande rapide et performant, il est possible de construire une heuristique qui vise à optimiser la rentabilité du partage de vols en modifiant la sélection de vols à chaque itération. La façon de modéliser l'effet de partage d'un vol sera d'abord abordée et illustrée à l'aide d'un exemple. Par la suite, la méthode de calcul du revenu sera présentée. Les deux sections suivantes porteront sur la description des algorithmes développés et les hypothèses qui ont été posées. Finalement, les outils informatiques utilisés et les méthodes d'accélération employées seront décrits.

5.1 Modélisation de l'effet de partage d'un vol

Une composante vitale de l'heuristique proposée est de pouvoir déterminer, dans chaque graphe réduit, les itinéraires qui deviennent partagés. Avant de définir ce qu'est un itinéraire partagé, nous allons introduire quelques définitions. D'abord, une liste de vols de la compagnie partenaire étudiée qui peuvent être partagés est établie. Celle-ci est appelée la liste des vols potentiels. Les vols de cette liste qui seront sélectionnés pour être partagés formeront la liste des vols partagés. Par la suite, une catégorie d'itinéraires, appelés itinéraires-potentiels, est créée. On sélectionne dans cette catégorie tous les itinéraires contenant au moins un vol d'Air Canada et au moins un vol de la liste des vols potentiels. Les itinéraires-potentiels représentent donc tous les itinéraires dont l'attrait peut changer si un vol ou des vols de la liste de vols potentiels se retrouvent dans la liste des vols sélectionnés. Un itinéraire potentiel deviendra un itinéraire partagé si tous les vols de la compagnie partenaire constituant cet itinéraire font partie de la liste des vols sélectionnés. Ainsi, dans l'exemple de l'étude de vols partagés avec la compagnie Continental Airlines, pour déterminer si un itinéraire devient partagé, il suffit de considérer chaque vol de Continental Airlines faisant partie de l'itinéraire potentiel et de vérifier si ceux-ci font partie de la liste des vols sélectionnés. Qu'il y ait un ou deux vols d'Air Canada combinés à un ou deux vols de Continental Airlines, dès que tous les vols de Continental Airlines sont dans la sélection de vols, l'itinéraire étudié devient partagé.

Pour les explications qui suivent, nous allons considérer un vol fictif, nommé le vol CO1234, qui appartient à la liste des vols potentiels. Lors de la construction du graphe réduit associé au vol CO1234, le vol CO1234 ne fait pas partie initialement de la liste des vols sélectionnés, ainsi tous

les itinéraires potentiels contenant ce vol sont initialement considérés comme non partagés. En fonction de la liste des vols sélectionnés, une analyse est ensuite faite afin de déterminer tous les itinéraires qui deviennent partagés. Les valeurs d'attrance de tous les itinéraires sont établies et la répartition de la demande est calculée en utilisant le programme linéaire décrit au chapitre 4. Suite à cette répartition des passagers, on peut alors évaluer les revenus associés à cette liste de vols sélectionnés.

Pour évaluer l'impact du vol CO1234 sur la liste des vols sélectionnés précédemment utilisée, ce dernier est inséré dans la liste des vols sélectionnés. Cette insertion modifie la liste des itinéraires partagés et du même coup les valeurs d'attrance de tous les itinéraires, en conférant une valeur d'attrance plus élevée aux itinéraires qui deviennent partagés. En fonction de ces nouvelles données, on résout à nouveau le problème de répartition des passagers et on évalue les revenus associés à celle-ci. De cette manière, il est possible de quantifier le revenu supplémentaire généré par l'instauration d'un vol partagé. Cette valeur de revenu tient donc compte de tous les itinéraires qui sont devenus partagés et des effets qui résultent de ces changements sur le graphe réduit.

Il est important de noter que les vols d'Air Canada qui sont opérés par un partenaire sont considérés comme des vols d'Air Canada à part entière. Dans l'exemple suivant, un vol d'Air Canada est suivi d'un vol Air Canada opéré par United Airlines (i.e. un vol partagé avec United Airline) et d'un vol de Continental Airlines.

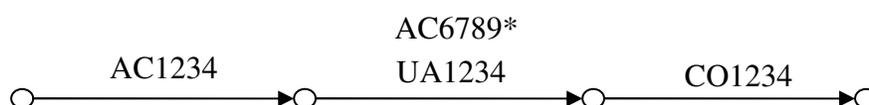


Figure 3. Exemple d'itinéraire AC-AC*-CO

En posant le vol CO1234 partagé, l'itinéraire devient donc partagé. Si cette affirmation semble évidente, son implémentation est un peu plus complexe. En effet, le réseau étudié est composé uniquement de vols opérationnels et non de numéros de vol fictifs comme AC6789* qui servent seulement à vendre des sièges sur le vol opéré par un partenaire. D'ailleurs, un même vol opérationnel peut se voir apposer jusqu'à une dizaine de numéros de vol fictif de compagnies partenaires. Lors de la définition des itinéraires potentiels, tous les vols d'une compagnie aérienne autre que Air Canada et Continental Airlines ont été étudiés pour vérifier s'il pouvait être exprimé avec un numéro de vol AC* et ainsi être considéré comme un vol d'Air Canada.

Deux valeurs d'attraction sont possibles pour chaque itinéraire. La première représente la valeur de l'attraction totale de l'itinéraire, c'est-à-dire la combinaison des six facteurs tels que présentés à la section 4.2, lorsque cet itinéraire n'est pas partagé. La deuxième représente la valeur de l'attraction totale de l'itinéraire lorsque ce dernier est partagé. Le fait que l'itinéraire soit ou ne soit pas partagé a un impact sur le facteur du type de connexion qui influence la valeur d'attraction totale de l'itinéraire.

Par exemple, si l'itinéraire concerné est un vol sans escale, la première valeur d'attraction serait l'attrait total de ce vol lorsque le type connexion considéré est de type 2 dans le Tableau 1. La deuxième valeur serait alors l'attrait total de ce vol lorsque le type connexion considéré est de type 1 dans le même tableau. De la même façon, un itinéraire « through » aurait une première valeur d'attraction qui considère une connexion de type 4 et une deuxième valeur avec une connexion de type 3. Avec la même logique, un itinéraire « online » aurait une première valeur d'attraction qui considère une connexion de type 6 et une deuxième valeur avec une connexion de type 5. Finalement, tous les vols « interline » auraient une première valeur d'attraction qui considère une connexion de type 8 ou 9 et une deuxième valeur avec une connexion de type 7.

À titre d'exemple, le vol CO1866 qui effectue une liaison *Houston-Toronto* est un vol partagé possible qui interagit avec le réseau d'Air Canada. Le graphe réduit correspondant à ce vol contient 36 marchés Origine-Destination et 5723 itinéraires. En effectuant les deux résolutions consécutives : l'une lorsque le vol CO1866 n'est pas considéré partagé (résolution 1) et l'autre lorsque le vol CO1866 est considéré partagé (résolution 2), la différence de demande observée sur les itinéraires est détaillée dans le Tableau 3. Pour des raisons de simplicité, ce tableau comprend seulement les itinéraires qui montrent une différence de demande supérieure à 0,01 passager. Ces 45 itinéraires présentent une différence supérieure à 0,01 passager, ce qui revient à dire que les 5678 autres itinéraires présentent une différence de flot nulle ou inférieure à 0,01 passager.

Tableau 3. Changement du flot de passagers par itinéraire avec le partage de CO1866

Itinéraire	Nombre de passagers		
	Résolution 1	Résolution 2	Différence
1229131	19,6902	20,1918	+ 0,5016
2481913	89,3740	89,8179	+ 0,4439
2267472	114,3251	114,7620	+ 0,4368
1228985	1,1667	1,4772	+ 0,3105
1228981	1,1637	1,4734	+ 0,3097
1228983	1,1477	1,4532	+ 0,3055
1228982	1,1284	1,4287	+ 0,3003
2331733	45,9375	46,2187	+ 0,2812
1230017	24,2853	24,5665	+ 0,2812
2622843	37,4423	37,7155	+ 0,2732
1871137	12,2883	12,4525	+ 0,1641
1229970	23,3897	23,5384	+ 0,1486
1229324	0,9567	1,0933	+ 0,1366
1229325	0,9441	1,0789	+ 0,1348
1229320	0,9396	1,0737	+ 0,1342
2446561	94,0094	94,1433	+ 0,1339
1229323	0,9380	1,0720	+ 0,1339
1658403	104,6228	104,7550	+ 0,1322
1229322	0,9197	1,0510	+ 0,1313
1229321	0,9073	1,0368	+ 0,1296
1228980	0,3928	0,4973	+ 0,1045
1229319	0,2713	0,3100	+ 0,0387
1229171	1,4633	1,4533	-0,0100
1229123	1,4707	1,4606	-0,0101
1229160	1,4868	1,4766	-0,0102
1229269	1,5127	1,5023	-0,0104
1229152	1,5216	1,5112	-0,0104
1229271	1,5288	1,5183	-0,0105
1229270	1,5378	1,5273	-0,0105
1229272	1,5513	1,5407	-0,0106
1229268	1,5692	1,5585	-0,0108
1229273	1,5842	1,5733	-0,0109
664158	152,0931	152,0819	-0,0112
1229260	1,8067	1,7943	-0,0124
1229125	1,8169	1,8044	-0,0124
3056773	24,1441	24,1266	-0,0174
1229435	5,8050	5,7676	-0,0374
2446537	1,4427	1,3088	-0,1339
1658343	0,2938	0,1590	-0,1348

Tableau 3 (suite). Changement du flot de passagers par itinéraire avec le partage de CO1866

Itinéraire	Nombre de passagers		
	Résolution 1	Résolution 2	Différence
1871007	1,3215	1,1475	-0,1740
2622932	0,2732	0,0000	-0,2732
2331740	0,8533	0,5720	-0,2812
1229996	29,1009	28,6710	-0,4299
2267508	1,0049	0,5681	-0,4368
2481939	1,8618	1,4179	-0,4439

En posant le vol CO1866 partagé, les 14 itinéraires suivants sont devenus partagés dans le graphe réduit associé au vol CO1866:

Tableau 4. Nouveaux itinéraires partagés du graphe réduit de CO1866

Itinéraire	Vol 1	Origine 1	Destination 1	Vol 2	Origine 2	Destination 2	Jour de la semaine
1228980	CO1866	Houston	Toronto	AC430	Toronto	Montréal	6
1228981	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	2
1228982	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	3
1228983	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	4
1228984	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	5
1228985	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	6
1228986	CO1866	Houston	Toronto	AC482	Toronto	Montréal	1
1229319	CO1866	Houston	Toronto	AC470	Toronto	Ottawa	6
1229320	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	2
1229321	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	3
1229322	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	4
1229323	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	5
1229324	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	6
1229325	CO1866	Houston	Toronto	AC472	Toronto	Ottawa	1

Étant donné qu'Air Canada partage maintenant le vol CO1866, ces 14 itinéraires deviennent partagés et voient leur attrait augmenter. Il est possible d'observer que les itinéraires 1228980, 1228981, 1228982, 1228983 et 1228985 qui effectuent une connexion *Houston-Montréal* et qui sont en gris pâle dans les tableaux Tableau 3 et Tableau 4 présentent une plus grande demande. De plus les itinéraires 1229319, 1229320, 1229321, 1229322, 1229323, 1229324 et

1229325 qui effectuent une connexion *Houston-Ottawa* et qui sont en gris foncé dans les tableaux Tableau 3 et 4 subissent également une hausse de flot. Ces observations sont logiques puisqu’une bonne partie des itinéraires qui présentent un plus grand attrait se voient attribuer plus de demande. De plus, ces changements au niveau de l’attrait de quelques itinéraires ont des effets sur d’autres itinéraires qui perdent un peu de demande. Le tableau suivant donne les informations sur les 12 itinéraires qui présentent les plus grandes pertes de demande.

Tableau 5. Itinéraires avec la plus grande perte de demande avec le partage de CO1866

Itinéraire	Vol 1	Origine 1	Destination 1	Vol 2	Origine 2	Destination 2	Jour de la semaine
1229260	UA5862	Houston	Chicago	UA7636	Chicago	Montréal	7
1229125	CO0052	Houston	New York	CO2490	New York	Montréal	7
3056773	AA0966	Quito	Miami	AA0646	Miami	Toronto	1
1229435	CO0744	Houston	Cleveland	CO2980	Cleveland	Ottawa	6
2446537	CO0827	San Salvador	Houston	CO1866	Houston	Toronto	4
1658343	CO1425	Mexico City	Houston	CO1866	Houston	Toronto	7
1871007	CO0004	Nouvelle-Orléans	Houston	CO1866	Houston	Toronto	5
2622932	CO1766	Seattle	Houston	CO1866	Houston	Toronto	5
2331740	CO0873	Panama City	Houston	CO2738	Houston	Toronto	3
1229996	CO1866	Houston	Toronto	-	-	-	2
2267508	CO1661	Phoenix	Houston	CO1866	Houston	Toronto	3
2481939	CO1588	San Diego	Houston	CO1866	Houston	Toronto	1

Puisque les itinéraires du Tableau 4 sont plus intéressants, une plus grande demande leur est attribuée. Toutefois, la capacité du vol CO1866 étant limitée, les nouveaux passagers doivent prendre la place de passagers qui utilisaient le vol CO1866 dans le cadre d’un autre itinéraire. Le Tableau 5 indique que sept des huit itinéraires, surlignés en gris, qui perdent le plus de demande utilisent effectivement le vol CO1866. Il est logique de penser que ce sont donc ces itinéraires qui ont écopé du partage du vol CO1866 avec Air Canada. Si cette affirmation semble évidente, d’autres augmentations ou diminutions de demande peuvent être plus difficiles à expliquer. En effet, le solveur doit considérer plusieurs effets comme le niveau de concurrence entre les itinéraires, l’interaction entre les différents marchés Origine-Destination et la capacité physique de chaque vol. Le solveur démontre d’ailleurs que le partage d’un vol a des impacts sur plusieurs itinéraires dans des marchés Origine-Destination voisins, d’où la nécessité d’analyser le partage d’un vol dans son graphe réduit.

Dans cet exemple, Continental Airlines présente plusieurs vols qui perdent de la demande. Pourtant, la création d'itinéraires partagés ne se fait habituellement pas au détriment d'un partenaire. Les itinéraires partagés qui sont les plus intéressants sont ceux qui réussissent à gagner de la demande au détriment de vols de compétiteurs communs. Au final, il reviendrait au solveur de définir la différence de demande sur le réseau d'Air Canada, sur le réseau du partenaire et sur les itinéraires des transporteurs concurrents. Toutefois, dans le cadre de ce projet, seulement les différences de revenus d'Air Canada sont considérées.

Il est pertinent d'ajouter qu'à première vue, les hausses et diminutions de flot telles que présentées dans le Tableau 3 peuvent sembler marginales. Toutefois, il faut se rappeler que ces itinéraires représentent un vol spécifique qui revient chaque semaine. Ainsi, si un seul passager supplémentaire achète un certain itinéraire chaque semaine et qu'Air Canada génère un revenu moyen de 500\$ pour cet itinéraire, il s'agit ici d'un revenu annuel de 26 000\$, lorsque multiplié par les 52 semaines que compte une année. Lorsqu'une telle hausse de revenu est combinée à des centaines, voire des milliers d'autres, l'augmentation de revenu total pour Air Canada peut se chiffrer en millions de dollars, tel qu'il sera discuté au Chapitre 6.

5.2 Calcul du revenu

L'heuristique proposée utilise le prix moyen de chaque marché Origine-Destination qui est calculé en faisant la moyenne de tous les prix de toutes les compagnies aériennes à un moment précis sur un marché. La notion de classe n'est donc pas considérée du tout.

Afin de déterminer si une modification du flot dans un graphe réduit est profitable pour Air Canada, il suffit de multiplier la différence de demande sur un itinéraire par les revenus générés pour Air Canada sur cet itinéraire. La différence de revenu Δ_p pour Air Canada, sur le graphe réduit d'un vol en question, est obtenue en additionnant les variations de revenus sur tous les itinéraires qui génèrent un revenu pour Air Canada dans ce graphe réduit. La façon de calculer les revenus d'Air Canada sur un itinéraire particulier est de définir le pourcentage de l'itinéraire qui est exploité par Air Canada et de multiplier cette valeur par le revenu moyen d'un itinéraire dans le marché Origine-Destination concerné. Par exemple, dans un marché où le revenu moyen est de 1200\$ par siège, si un itinéraire est composé d'un vol d'Air Canada qui parcourt 400 km et ensuite d'un vol de Continental Airlines qui parcourt 600 km, les revenus d'Air Canada sont

estimés à 480\$. En se basant sur cette méthode de calcul, la valeur Δ_p est la différence entre la somme des revenus d'Air Canada pour tous les itinéraires d'un graphe réduit lorsque le vol p est sélectionné et celle où le vol p n'est pas sélectionné.

D'autre part, la façon de mesurer la rentabilité d'une certaine sélection de vols partagés est d'additionner la valeur Δ_p de tous les vols choisis. Il est certain que cette valeur Δ_s ne représente pas le profit prévu si Air Canada décidait de partager cette sélection de vols. En effet, en additionnant l'effet de partager chaque vol sur leur graphe réduit respectif ne donne pas une vue d'ensemble sur la rentabilité de la sélection de vols sur le réseau entier. Par exemple, si 48 personnes sont prévues sur un vol d'Air Canada qui a une capacité de 50 sièges et que deux vols que l'on souhaite rendre partagés ont pour effet, dans leur graphe réduit respectif, d'ajouter les 2 personnes manquantes au vol d'Air Canada pour atteindre la capacité maximale. Dans ce cas, on ne peut calculer que 4 personnes de plus prendront par au vol d'Air Canada puisqu'il y a seulement 2 places disponibles. Toutefois, cet effet devrait être pris en compte d'une itération à l'autre puisque l'effet de partager ces 2 vols pourrait devenir négatif et un des deux vols partagés pourrait être retiré de la sélection. Au final, Δ_s est un critère pertinent pour évaluer l'attrait d'une sélection de vols partagés. Bien que Δ_s ne soit pas égal à la rentabilité de la sélection de vols sur le réseau entier, tout indique que cet indicateur y est fortement relié.

Étant donné que l'horaire de vol étudié est hebdomadaire, la valeur Δ_s représente la somme des revenus qui seraient générés sur les graphes réduits dans une semaine type.

Il importe de spécifier que dans l'industrie aérienne, les partenariats aériens impliquent habituellement une répartition des revenus entre le transporteur qui exploite un vol et le partenaire qui n'exploite pas ce vol, mais qui vend tout de même des sièges sur ce dernier. La grande part des revenus revient évidemment à la compagnie qui exploite le vol, mais la compagnie partenaire reçoit souvent une part des revenus entre 1% et 10% qui peut être calculée par passager ou par bloc de passagers. Certains partenariats comprennent aussi des contraintes par rapport au nombre de passagers maximal qu'une compagnie partenaire peut vendre sur un vol qu'elle n'exploite pas ou sur les classes auxquelles elle a accès. Chaque partenariat a ses règles de répartitions des revenus bien spécifiques. Dans le cadre de ce projet, tous les revenus liés à ces types de partenariats n'ont pas été considérés. Le problème a plutôt été abordé avec comme but de maximiser la hausse de demande sur le réseau d'Air Canada directement. La raison

derrière ce raisonnement est qu'un passager sur un vol d'Air Canada est toujours beaucoup plus rentable qu'un siège vendu sur le vol d'un partenaire. Il serait toutefois utile d'inclure ces autres revenus dans l'avenir.

5.3 Algorithmes

L'élaboration d'une solution initiale consiste à choisir les vols qui présentent les plus grandes valeurs de Δ_p dans leur graphe réduit respectif. À partir de ce point, la demande sera redistribuée sur le graphe réduit respectif de chaque vol choisi pour vérifier si ceux-ci semblent toujours aussi profitables lorsque les autres vols choisis deviennent partagés. Il est possible qu'un vol **X** choisi fasse partie du graphe réduit du vol **Y** également choisi. À ce moment, il est possible que le vol **X** influence la répartition de la demande dans le graphe réduit de **Y**. Au final, il est possible que ces deux vols se fassent compétition pour obtenir les mêmes passagers comme il est possible que ces deux vols soient complémentaires, crée un nouvel itinéraire, et soient encore plus rentables pour Air Canada. C'est cet effet qui sera évalué en recalculant Δ_p pour tous les graphes réduits des vols choisis. Une fois cette étape effectuée, un certain nombre de vols qui deviennent moins profitables sont délaissés. Par le même mécanisme, les valeurs Δ_p sont calculées pour les vols qui n'ont jamais été choisis en tenant compte des vols déjà choisis et ceux qui semblent les plus profitables sont sélectionnés.

En effectuant cette itération en boucle, la sélection de vols partagés se fait en augmentant graduellement la profitabilité du partage de vol pour éventuellement atteindre un point où la profitabilité reste sensiblement la même au fil des itérations.

L'heuristique proposée est présentée à l'aide de deux algorithmes légèrement différents. Toutefois, avant de présenter ces derniers, nous devons d'abord définir les ensembles et les paramètres suivants :

- \mathcal{L} Liste des vols partagés potentiels
- \mathcal{S} Listes des vols partagés qui sont sélectionnés (i.e $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{L}$)
- \mathcal{T}_k Liste des vols partagés qui ne peuvent être considérés (tabous) durant les itérations k à $k+4$
- p Vol partagé potentiel

\mathcal{G}_p^E	Graphe réduit associé au vol p en considérant que tous les vols $p \in E$ sont partagés, où E représente l'un des trois ensembles suivants : \emptyset si aucun vol n'est partagé, $\{p\}$ lorsque seul p est partagé ou \mathcal{S} lorsque tous les vols appartenant à \mathcal{S} sont partagés. Ce graphe réduit est construit conformément à la section 3.3.
PL_p^E	Programme linéaire associé à \mathcal{G}_p^E et tel que décrit à la section 4.3.
R_p^E	Revenu associé à la répartition des passagers telle que décrite par la solution du problème PL_p^E
j	Ville
\mathcal{N}	Ensemble de villes
\mathcal{N}_p	Ensemble des villes présentes dans le graphe réduit \mathcal{G}_p^E
Δ_p	Différence de revenu si un vol p est partagé ou non pour un graphe réduit donné
$\Delta_{\mathcal{S}}$	Somme des différences de revenus lorsque les vols de l'ensemble \mathcal{S} sont partagés

De plus, une sous-routine qui évalue l'impact d'un vol p sur le graphe réduit \mathcal{G}_p^E est ici définie pour simplifier l'écriture des algorithmes.

Sous-routine ***Impact***(p, E) :

1. Construire \mathcal{G}_p^E
2. Résoudre PL_p^E et trouver R_p^E
3. Construire $\mathcal{G}_p^{E \cup \{p\}}$
4. Résoudre $PL_p^{E \cup \{p\}}$ et trouver $R_p^{E \cup \{p\}}$
5. $\Delta_p = R_p^{E \cup \{p\}} - R_p^E$

Les deux algorithmes peuvent maintenant être décrits.

L'algorithme 1 utilise le principe de recherche avec tabous. Pour éviter le phénomène de cyclage le plus possible, un vol qui est exclu de la sélection de vols partagés ne peut être inclus à nouveau avant 5 itérations. De plus, étant conscient que l'ajout d'un vol peut impacter la profitabilité d'un

autre, un mécanisme est intégré pour tenter de choisir des vols qui ne s'influencent pas entre eux. Pour pouvoir ajouter plus d'un vol par itération, il est posé que les graphes réduits respectifs des vols ajoutés ne puissent pas avoir de villes communes entre eux. Logiquement, les vols ajoutés doivent donc être très distancés et ne s'influencent pas dans le réseau global. Cette contrainte a été ajoutée dans le but de pouvoir choisir plus d'un vol par itération et ainsi accélérer la résolution sans pour autant négliger les effets que deux vols pourraient avoir entre eux.

Au niveau des critères de sélection des vols en fonction de Δ_p , il a été décidé d'utiliser le critère $\Delta_p > 100\$$ pour la construction de la solution initiale et $\Delta_p > 25\$$ à partir de la première itération dans le but de choisir moins de vol au départ. De cette façon, tous les vols avec un Δ_p entre 25\$ et 100\$ sont évalués à partir de la première itération en tenant compte de leur impact sur les vols choisis lors de la solution initiale. Cette façon de faire permet de constituer une solution initiale avec les vols qui semblent très profitables et d'analyser des vols qui semblent moins intéressants en deuxième temps en considérant les vols déjà inclus lors de la solution initiale.

Algorithme 1 :

1. Initialisation de la liste \mathcal{L} et $k = 1$
2. $\mathcal{N} = \emptyset$
3. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \emptyset$)
 - b. $\forall j \in \mathcal{N}_p$
 - i. Si $j \in \mathcal{N}$ alors retour à l'étape 3.
 - c. Si $\Delta_p > 100$
 - i. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p\}$
 - ii. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{p\}$
 - iii. $\mathcal{N} \leftarrow \mathcal{N}_p$
4. $k = k + 1$
5. $\mathcal{S}^- = \emptyset$
6. $\forall p \in \mathcal{S}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \mathcal{S} \setminus \{p\}$)
 - b. Si $\Delta_p < 0$ alors $\mathcal{S}^- \leftarrow \mathcal{S}^- \cup \{p\}$
7. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \mathcal{S}^-$

8. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}^-$
9. $\mathcal{T}_k = \mathcal{S}^-$
10. $w = k - 5$
11. Si $w \geq 2$ alors
 - a. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \cup \mathcal{T}_w$
12. $\mathcal{S}^+ = \emptyset$
13. $\mathcal{N} = \emptyset$
14. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \mathcal{S}$)
 - b. $\forall j \in \mathcal{N}_p$
 - i. Si $j \in \mathcal{N}$ alors retour à l'étape 14;
 - c. Si $\Delta_p > 25$
 - i. $\mathcal{S}^+ \leftarrow \mathcal{S}^+ \cup \{p\}$
 - ii. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p\}$
 - iii. $\mathcal{N} \leftarrow \mathcal{N}_p$
15. Si $\mathcal{S}^+ = \emptyset$ alors $\Delta_s = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$ et ARRÊT; sinon $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \mathcal{S}^+$ et retour à l'étape 4;

L'algorithme 1 peut être résumé comme suit. L'étape 1 établit la liste de vols potentiels qui seront étudiés. Les étapes 2 et 3 choisissent tous les vols potentiels qui présentent un Δ_p supérieur à 100\$ et crée ainsi la solution initiale. Les étapes 4 à 8 excluent les vols qui présentent un Δ_p négatif après que les vols de la solution initiale soient devenus partagés. Les étapes 9, 10 et 11 effectuent la gestion tabou en s'assurant que des vols exclus ne soient pas étudiés pendant 5 itérations. Les étapes 12 à 15 ajoutent les nouveaux vols qui semblent profitables. Finalement, l'algorithme itère de l'étape 4 à l'étape 15 jusqu'à ce qu'une bonne solution soit obtenue.

De plus, cet algorithme vérifie que les vols sélectionnés à chaque itération n'aient aucune ville similaire entre eux. Ainsi, avant d'ajouter des vols, les étapes 2 et 13 établissent que l'ensemble \mathcal{N} est vide. Ensuite, lors des étapes 3-b et 14-b, si les villes présentes dans le graphe réduit du vol p étudié ne sont pas présentes dans \mathcal{N} , le vol p est sélectionné et les villes du graphe réduit en question sont ajoutées dans \mathcal{N} , sinon le vol p n'est tout simplement pas sélectionné.

Un deuxième algorithme a été développé pour tenter de trouver une bonne solution plus rapidement. Ce qui est proposé est de partir de la même solution initiale que l'algorithme 1, d'exclure tous les vols avec un Δ_p négatif, d'inclure tous les vols avec un Δ_p supérieur à 25\$ et par la suite d'analyser chaque vol qui présente Δ_p positif séparément et de l'inclure seulement s'il améliore la valeur Δ_s . Lorsqu'aucun vol de l'ensemble B ne présente de Δ_p positif, l'algorithme arrête.

L'algorithme 2 peut donc être résumé en trois étapes. Tout d'abord, la solution initiale effectue un premier tri en sélectionnant les vols partagés qui semblent les plus profitables. Ensuite, la première itération effectue plusieurs ajustements pour tenir compte des effets des vols choisis entre eux et permet d'inclure des vols qui ne semblaient pas très profitables a priori. Finalement, à partir de 2^e itération, l'algorithme permet d'étudier un vol à la fois et de l'intégrer dans la sélection seulement s'il améliore les revenus générés pour Air Canada.

Plutôt que d'effectuer beaucoup d'itérations pour trouver un maximum global, cet algorithme vise à trouver un maximum local rapidement. L'algorithme 2 tente d'effectuer quelques itérations qui procurent une bonne solution qui n'est pas nécessairement optimale. À ce moment, la solution correspond à un maximum local. De plus, cette méthode empêche toute forme de cyclage en éliminant définitivement les vols qui n'augmentent pas le revenu global à partir de la 2^e itération.

Algorithme 2 :

1. Initialisation de la liste \mathcal{L} et $k = 1$
2. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \emptyset$)
 - b. Si $\Delta_p > 100$
 - i. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p\}$
 - ii. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{p\}$
3. $k = k + 1$
4. $\mathcal{S}^- = \emptyset$
5. $\forall p \in \mathcal{S}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \mathcal{S} \setminus \{p\}$)
 - b. Si $\Delta_p < 0$ alors $\mathcal{S}^- \leftarrow \mathcal{S}^- \cup \{p\}$

6. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \mathcal{S}^-$
7. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}^-$
8. $\mathcal{S}^+ = \emptyset$
9. $\Delta_p^* = -\infty$
10. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \mathcal{S}$)
 - b. Si $\Delta_p > 25$ alors $\mathcal{S}^+ \leftarrow \mathcal{S}^+ \cup \{p\}$
 - c. Si $\Delta_p > \Delta_p^*$ alors poser $\Delta_p^* = \Delta_p$ et $p^1 = p$
11. Si $\mathcal{S}^+ = \emptyset$ alors $\Delta_s = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$ et ARRÊT; sinon :
 - a. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{p^1\}$
 - b. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p^1\}$
12. $\Delta_s = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$
13. $\mathcal{S}^+ = \emptyset$
14. $\Delta_p^* = -\infty$
15. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \mathcal{S}$)
 - b. Si $\Delta_p > 25$ alors $\mathcal{S}^+ \leftarrow \mathcal{S}^+ \cup \{p\}$
 - c. Si $\Delta_p > \Delta_p^*$ alors poser $\Delta_p^* = \Delta_p$ et $p^2 = p$
16. $\Delta_{s \cup \{p^1\}} = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$
17. Si $\Delta_{s \cup \{p^1\}} < \Delta_s$ alors $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \setminus \{p^1\}$ et retour à l'étape 8;
18. Si $\mathcal{S}^+ = \emptyset$ alors $\Delta_s = \Delta_s^2$ et ARRÊT; sinon :
 - a. $\Delta_s = \Delta_{s \cup \{p^1\}}$,
 - b. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{p^2\}$
 - c. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p^2\}$
 - d. $p^1 = p^2$
 - e. retour à l'étape 13;

L'algorithme 2 peut être résumé comme suit. L'étape 1 établit la liste de vols potentiels qui seront étudiés. L'étape 2 établit la solution initiale en choisissant tous les vols qui présentent un Δ_p supérieur à 100\$. Les étapes 3 à 7 excluent les vols qui présentent un Δ_p négatif après que les

vols de la solution initiale soient devenus partagés. Les étapes 8 à 12 sélectionnent le prochain vol p^1 qui semble le plus profitable à partager. Les étapes 13 à 16 recalculent les valeurs de Δ_p et sélectionnent le vol p^2 qui, dans les vols non sélectionnés, semble le plus profitable. L'étape 17 vérifie si le vol p^1 a effectivement augmenté les revenus prévus Δ_s pour la sélection complète. Si tel est le cas, l'algorithme retourne à l'étape 13 pour étudier le vol p^2 sélectionné. Sinon, le vol p^1 est définitivement exclu et l'algorithme tente de trouver un autre vol intéressant à partir de l'étape 8. De cette façon, l'algorithme itère de l'étape 13 à l'étape 18 tant et aussi longtemps que Δ_s augmente. Lorsque l'ajout d'un vol partagé diminue Δ_s , l'algorithme retourne à l'étape 8 et poursuit son exploration.

5.4 Hypothèses

La sélection de vols partagés est un problème qui comprend une part de subjectivité. En effet, la dynamique de négociation avec des partenaires, les relations politiques entre pays et le comportement des passagers, entre autres, sont tous des aspects très difficiles à modéliser avec exactitude. Pour être en mesure de construire une méthode mathématique objective qui puisse être résolue en des temps raisonnables, plusieurs hypothèses ont été posées.

- 1) Tous les vols d'Air Canada et des autres compagnies aériennes sont considérés comme fixes et ne peuvent être modifiés pour améliorer l'attrait de certains itinéraires. La sélection des vols partagés doit être optimisée en fonction du réseau tel qu'il est et il n'est pas possible de modifier l'horaire ou la capacité de certains vols pour créer des itinéraires partagés plus intéressants.
- 2) Air Canada optimise la sélection des numéros de vol AC* qu'elle appose sur des vols exploités par des compagnies partenaires. La méthode proposée ne porte aucune attention à la sélection de numéros de vol qu'un partenaire souhaite apposer sur les vols exploités par Air Canada.
- 3) En choisissant de partager un numéro de vol, Air Canada décide de partager tous les vols de la semaine qui utilisent ce numéro de vol. Il n'est pas possible de partager un numéro de vol pour certaines journées de la semaine en particulier.
- 4) Les revenus engendrés lorsqu'Air Canada vend des sièges sur une compagnie partenaire et calculés selon certains ratios ne sont pas considérés puisque ces derniers ne devraient

pas influencer significativement la sélection de vols partagés. Les revenus considérés sont seulement ceux générés par la hausse de trafic sur les vols exploités par Air Canada.

- 5) Les revenus générés par le partage de vols sont basés sur les revenus moyens observés par Air Canada sur chaque marché Origine-Destination et ne fluctuent pas en fonction du temps ou du taux d'occupation d'un avion.
- 6) Le coût relié à l'instauration d'un nouveau vol partagé est considéré comme nul. Dans la réalité, il existe un coût relié à la gestion des vols partagés. Toutefois, il est difficile d'attribuer un coût à un vol partagé spécifique et il est légitime de croire que ce coût est négligeable.
- 7) Les coûts d'exploitation de chaque vol, qui varient selon le type d'appareil, ne sont pas considérés. Conséquemment, la sélection de vols partagés est optimisée en fonction des revenus bruts générés et non pas de la profitabilité. En plus d'être très difficiles à calculer, les coûts d'exploitation ne semblent pas différer significativement d'un vol à l'autre.
- 8) La sélection de vols partagés concerne des vols directionnels et n'implique aucune symétrie. Entre d'autres mots, si Air Canada décide de partager un vol AB, elle n'est pas obligée de partager un vol BA.
- 9) Il n'y a aucune restriction sur le nombre de numéros de vol qu'Air Canada peut choisir ni aucune limite, autre que la capacité, sur le nombre de passagers qu'Air Canada peut ajouter sur le vol d'un partenaire ou dans certaines classes du vol d'un partenaire.
- 10) Il n'y a aucune restriction sur la sélection des vols partagés imposée par les syndicats de personnel à bord des avions ou par des lois gouvernementales.
- 11) La pratique de survente n'est pas considérée. Le modèle mathématique de répartition de la demande se fie uniquement à la capacité physique de chaque appareil.
- 12) Une méthode de blocage du flot, telle que décrite à la section 4.5, est utilisée dans les graphes réduits.

5.5 Outils informatiques

Dans le cadre de ce projet, c'est le langage informatique C++ qui est utilisé à travers *Microsoft Visual Studio Professionnel 2008*. Pour la résolution du programme mathématique associé à la répartition de la demande sur un réseau restreint, le solveur ILOG CPLEX, en version 11.2.1 pour Windows, et le logiciel ILOG OPL Studio, en version 6.1.1 pour Windows, ont été utilisés. En employant la technologie ILOG Concert, en version 2.7, le solveur CPLEX a été appelé à partir de C++ à chaque fois qu'une répartition de la demande sur un graphe réduit était nécessaire. Pour permettre la communication entre C++ et CPLEX, les fichiers modèle « .mod » et de données « .dat » étaient écrits à l'aide de C++ et CPLEX renvoyait les variables de décisions $X[\text{itin}]$ et $e[\text{itin}]$ à C++ qui pouvait faire les calculs nécessaires pour déterminer les différences de revenus pour Air Canada d'une répartition à l'autre. Tous les itinéraires considérés ont été construits une seule fois à l'aide d'outils disponibles chez Air Canada.

5.6 Méthodes d'accélération

Comme il sera expliqué au Chapitre 6, l'heuristique proposée peut requérir des temps de résolution importants. C'est pourquoi beaucoup d'efforts ont été consacrés à l'accélération des temps de calcul, tant au niveau du modèle de répartition de la demande que pour l'heuristique comme telle.

D'emblée, le modèle mathématique de répartition de la demande construit utilise deux matrices qui peuvent rapidement devenir gigantesques : $S_{(\text{itin}, \text{vol})}$ qui précise quel vol fait partie de quel itinéraire et $T_{(\text{marché}, \text{itin})}$ qui spécifie quel itinéraire fait partie de quel marché Origine-Destination. En reprenant l'exemple du graphe réduit de CO1866, décrit au tableau 2, il est facile d'observer que la matrice $S_{(\text{itin}, \text{vol})}$ a une taille considérable de $(5723 \text{ itinéraires} \times 5749 \text{ vols}) = 32\,901\,527$ valeurs et il existe des graphes réduits encore plus imposants. Toutefois, la grande majorité de ces valeurs est égale à 0 puisqu'un itinéraire est habituellement constitué d'un, deux ou trois vols même si le graphe réduit en contient plusieurs milliers. Afin de travailler aisément avec d'aussi grandes matrices, il est important de profiter de cette caractéristique. Ainsi, dans l'écriture de ces matrices, ce n'est pas l'ensemble des valeurs qui est détaillé, mais seulement les combinaisons réelles de vol-itinéraire. En d'autres mots, ce sont seulement les paires vol-itinéraire égales à 1 qui sont listées au lieu d'attribuer une valeur 0 ou 1 à toutes les paires vol-itinéraires. Sans cette

méthode d'écriture, l'heuristique proposée était tout simplement considérée non réalisable tant les temps de résolutions étaient grands.

Deuxièmement, une des opérations qui requiert le plus de temps est d'écrire le fichier de données (.dat) d'un graphe réduit. Étant donné que deux résolutions consécutives sont faites pour chaque graphe réduit, il est possible pour la deuxième résolution de reprendre exactement le même fichier de données et de simplement modifier les quelques valeurs d'attraction des itinéraires-potentiels qui deviennent partagés. Cette tactique a été employée avec les outils disponibles avec la technologie Concert de ILOG. Ainsi, le fichier de données est écrit seulement une fois pour les deux résolutions, ce qui sauve beaucoup de temps. De plus, pour accélérer la deuxième résolution de CPLEX, l'implémentation a été construite de telle sorte que le solveur mathématique reparte de la solution de la première résolution et fasse quelques itérations pour retrouver une solution optimale en fonction des nouvelles valeurs d'attractions entrées en paramètres. De cette façon, la deuxième résolution prend environ deux fois moins de temps à résoudre.

CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

La nouvelle méthode heuristique ayant été proposée, les sources de données ayant été identifiées et la méthodologie ayant été décrite, le présent chapitre présente et analyse les résultats obtenus dans le cadre des expérimentations réalisées. Pour être en mesure d'analyser la performance des algorithmes développés, la première section présentera deux algorithmes qui servent de référence. Par la suite les résultats des deux algorithmes décrits à la section 5.3 seront présentés lorsque ceux-ci sont appliqués au cas de Continental Airlines et ensuite au cas combiné de Continental Airlines et United Airlines. Une source d'erreur principale sera ensuite discutée et le chapitre se terminera avec une discussion sur l'utilité de l'heuristique développée en industrie.

6.1 Algorithmes de référence

Les algorithmes 3 et 4, ci-dessous, sont utilisés pour obtenir des valeurs Δ_s qui serviront de références afin de pouvoir analyser la performance des algorithmes 1 et 2 développés au Chapitre 5.

L'algorithme 3 rend partagés tous les vols de Continental Airlines qui connectent d'une façon ou d'une autre avec le réseau d'Air Canada. Cet algorithme, dans lequel il n'est aucunement question d'optimisation, s'appliquerait dans la réalité si Air Canada décidait de partager absolument tous les vols de Continental Airlines qui peuvent créer un itinéraire partagé avec ses propres vols. Cet algorithme « myope » choisit donc des vols qui génèrent des revenus supplémentaires comme des vols qui enlèvent de la demande à des vols exploités par Air Canada.

Algorithme 3 :

1. Initialisation de la liste \mathcal{L}
2. $\mathcal{S} = \mathcal{L}$
3. Appeler **Impact**($p, E = \emptyset$) $\forall p \in \mathcal{S}$
4. $\Delta_s = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$ et ARRÊT

Cette méthode choisit de partager 209 vols de Continental Airlines et le revenu supplémentaire Δ_s généré pour Air Canada est de 130 573\$ avec un temps de résolution de 2,1 heures.

Dans un deuxième temps, une résolution a été effectuée pour tenter d'imiter la méthode de sélection de vols partagés proposée dans la littérature et décrite au Chapitre 2. Ainsi, la sélection de vols est effectuée en évaluant chaque vol indépendamment et en choisissant ceux qui présentent un Δ_p supérieur à 25\$. La valeur de 25\$ a été utilisée au lieu de 0\$ pour éviter de choisir des vols qui présentent une différence de quelques dollars pour une semaine complète qui pourrait résulter d'un simple manque de précision dans les calculs. Cette méthode simule la situation où Air Canada évaluerait la profitabilité de chaque vol partagé possible avec Continental Airlines et sélectionnerait tous les vols qui semblent avoir un effet positif lorsqu'étudié indépendamment.

Algorithme 4 :

1. Initialisation de la liste \mathcal{L}
2. $\forall p \in \mathcal{L}$
 - a. Appeler **Impact**($p, E = \emptyset$)
 - b. Si $\Delta_p > 25$
 - i. $\mathcal{L} \leftarrow \mathcal{L} \setminus \{p\}$
 - ii. $\mathcal{S} \leftarrow \mathcal{S} \cup \{p\}$
3. $\Delta_s = \sum_{p \in \mathcal{S}} \Delta_p$ et ARRÊT

Cette méthode choisit de partager 135 vols de Continental Airlines et le revenu supplémentaire Δ_s généré pour Air Canada est de 98 779\$ avec un temps de résolution de 2,0 heures.

6.2 Résolutions avec Continental Airlines

Les deux tableaux suivants résument les résultats obtenus avec les quatre algorithmes appliqués au cas de Continental Airlines et la performance des algorithmes 1 et 2 par rapport aux valeurs de Δ_s des algorithmes 3 et 4.

Tableau 6. Résultats des quatre algorithmes avec les vols de Continental Airlines

	Algorithme			
	1	2	3	4
Meilleur Δ_s (dollars)	158 471\$	160 658\$	130 573\$	98 779\$
Temps de résolution (heures)	31,0	7,2	2,1	2,0
Nombre de vols sélectionnés	134	136	209	135

Tableau 7. Performance des algorithmes 1 et 2 par rapport aux algorithmes 3 et 4 avec les vols de Continental Airlines

	Algorithme 1	Algorithme 2
Amélioration de Δ_s par rapport à l'algorithme 3	+21,4%	+23,0%,
Amélioration de Δ_s par rapport à l'algorithme 4	+60,4%	+62,6%

L'algorithme 1 choisit de partager 134 vols de Continental Airlines et le meilleur revenu supplémentaire Δ_s généré pour Air Canada est de 158 471\$, avec un temps de résolution de 31,0 heures. Tous les détails de cette résolution sont présentés à l'annexe 2.

L'algorithme 2 de son côté choisit de partager 136 vols de Continental Airlines et le revenu supplémentaire Δ_s généré pour Air Canada est de 160 658\$ avec un temps de résolution de 7,2 heures. Tous les détails de cette résolution sont présentés à l'annexe 3.

Ces résultats démontrent clairement que les algorithmes 1 et 2 développés dans le cadre de ce projet effectuent une sélection de vols partagés beaucoup plus rentable que l'algorithme 3 qui sélectionne simplement tous les vols qui connectent au réseau d'Air Canada et également plus rentable que l'algorithme 4 qui choisit tous les vols qui, lorsqu'étudiés indépendamment, semblent profitables.

Les résultats obtenus sont évidemment très spécifiques au cas étudié. Il n'est donc pas possible de statuer à savoir si un algorithme est meilleur que l'autre dans l'industrie aérienne en général. Toutefois, dans le cadre du projet, on peut affirmer que, par rapport à l'algorithme 1, l'algorithme 2 obtient une sélection de vols de 1,4% plus rentable en 7,2 heures au lieu de 31,0. Toutefois, l'algorithme 1 est plus robuste en permettant beaucoup plus de changements dans la sélection et en analysant plus de possibilités. Comme il a été expliqué plus haut, l'algorithme 2 se dirige, dès la deuxième itération, directement vers un maximum local. Cette caractéristique est le point fort et le point faible de cet algorithme, car si le maximum local est très rentable, l'algorithme s'y rendra très rapidement. Toutefois, si le maximum local est peu rentable, la solution finale sera peu intéressante. Le domaine des solutions explorées par l'algorithme 1 est plus grand.

L'idéal serait évidemment de posséder un algorithme qui étudie une grande quantité de solutions dans un délai minimum. Pourtant, étant donné la complexité de l'heuristique en question, la puissance de calcul à disposition impose de trouver des compromis. C'est la raison pour laquelle ces deux algorithmes sont présentés.

D'un autre côté, un point intéressant à noter est que les algorithmes 1 et 2 sont plus profitables que l'algorithme 3 malgré qu'ils sélectionnent beaucoup moins de vols partagés que l'algorithme 3, ce qui prouve clairement qu'il existe des effets d'interaction réels entre les vols partagés sélectionnés.

Les solutions des algorithmes 1 et 2 prouvent aussi qu'ils existent des interactions claires entre les vols choisis pour être partagés puisqu'un vol qui présentait un Δ_p positif dans son graphe réduit à une certaine itération peut présenter un Δ_p négatif à l'itération suivante suite à l'insertion d'un nouveau vol partagé. Un point important de l'heuristique développée est que l'effet de l'instauration d'un vol partagé n'est pas seulement étudié à l'intérieur de son graphe réduit, car ce vol fait souvent partie du graphe réduit de plusieurs autres vols étudiés. Par exemple si le partage du vol X semble profitable dans le graphe réduit du vol X, il n'est pas dit que le partage du vol X n'aura pas un effet négatif sur les graphes réduits des vols Y ou Z dont le vol X fait partie. Étant donné que Δ_s est la somme des valeurs Δ_p des graphes réduits de tous les vols sélectionnés, l'effet de rendre le vol X partagé sera étudié dans tous les graphes réduits des autres vols sélectionnés. Cette caractéristique donne une vue globale à l'heuristique malgré qu'aucune résolution du réseau complet ne soit faite.

Les résultats obtenus pour les algorithmes 1 et 2 indiquent qu'il y a, dans la gestion des vols partagés, un potentiel de revenus très intéressants pour Air Canada. En effet, en supposant que les revenus générés par l'algorithme 2 durant une semaine sont les mêmes tout au long de l'année et en multipliant Δ_s par 52, les revenus générés par cet algorithme en un an sont de 8 354 216 \$ tandis ceux générés par l'algorithme 3 et l'algorithme 4 sont de 6 789 796 \$ et de 5 136 508\$. Il s'agit là d'une augmentation de 1 564 420 \$ avec l'algorithme 3 et de 3 217 708\$ avec l'algorithme 4.

À ce stade, il est important de rappeler que, tel que discuté à la section 5.2, la valeur Δ_s ne représente pas directement les profits d'Air Canada si tous les vols sélectionnés devenaient partagés. Il s'agit là de la somme des valeurs de Δ_p des vols sélectionnés et aucune résolution complète du réseau n'est effectuée pour confirmer si Δ_s s'appliquerait au réseau en entier. Toutefois, il est évident que Δ_s est directement lié à la profitabilité d'une solution. Il est important d'être conscient de cette nuance lors de l'analyse des résultats.

Sur une autre note, il peut sembler étrange que l'algorithme soit plus profitable que l'algorithme 4 puisque l'algorithme 3 est de simplement sélectionner tous les vols potentiels. Toutefois, ces résultats s'appliquent uniquement au présent cas qui concerne Air Canada et un partenaire. L'effet combiné de choisir les 209 vols potentiels a, dans ce cas-ci, été plus rentable que de choisir seulement les vols qui présentent un Δ_p positif mais rien n'indique que dans un cas complètement différent, l'algorithme 4 ne serait pas plus performant. L'idée de systématiquement choisir tous les vols potentiels de tous les partenaires d'une compagnie aérienne n'est certainement pas une bonne stratégie. Le fait qu'une méthode d'optimisation soit moins performante dans une situation précise ne change en rien le besoin de trouver une méthode d'optimisation qui s'appliquerait à un grand nombre de situation. De plus, il serait impossible, d'un point de vue opérationnel, qu'une compagnie sélectionne tous les vols potentiels de tous ses partenaires.

Il est pertinent d'ajouter que malgré que les algorithmes 1, 2 et 4 sélectionnent à peu près le même nombre de vols, les sélections faites sont très différentes d'un algorithme à l'autre. Cette observation suit la logique, car ces trois algorithmes construisent leurs sélections de vols partagés de manières bien différentes.

6.3 Résolutions avec Continental Airlines et United Airlines

Afin de tester l'heuristique développée dans un contexte différent et pour que cette dernière soit mise à l'épreuve avec beaucoup plus de vols à considérer, l'étude a été étendue à tous les vols de Continental Airlines et United Airlines. Étant donné les longs temps de résolution, seulement les algorithmes 2,3 et 4 ont été réalisés.

En réutilisant les algorithmes 2, 3 et 4 définis à la section précédente, les résultats obtenus pour les vols de Continental Airlines et United Airlines sont les suivants :

Tableau 8. Résultats des algorithmes 2-3-4 avec les vols de Continental Airlines et United Airlines

	Algorithme		
	2	3	4
Meilleur Δ_s (dollars)	306 321 \$	272 318 \$	163 710 \$
Temps de résolution (heures)	49,6	5,9	5,8
Nombre de vols sélectionnés	498	747	491

Tous les détails de la résolution de l'algorithme appliqué au cas de Continental Airlines et United Airlines sont présentés à l'annexe 4.

Tableau 9. Performance de l'algorithme 2 par rapport aux algorithmes 3 et 4 avec les vols de Continental Airlines et United Airlines

	Algorithme 2
Amélioration de Δ_s par rapport à l'algorithme 3	+ 12,5%
Amélioration de Δ_s par rapport à l'algorithme 4	+ 87,1%

Ces résultats indiquent que l'algorithme 2 génère beaucoup plus de revenus que les algorithmes 3 et 4 tout en nécessitant moins de vols partagés dans sa sélection finale. Cette observation

confirme en quelque sorte les résultats présentés à la section précédente alors que seulement les vols de Continental Airlines étaient considérés puisque la valeur Δ_s est à nouveau significativement améliorée lorsque l'heuristique développée est utilisée. De plus, 747 vols potentiels sont étudiés dans le présent cas comparativement à 209 dans la section précédente, ce qui démontre la capacité de l'heuristique à résoudre des cas très complexes.

Toutefois, le temps de résolution dans ce cas-ci dénote une faiblesse évidente de l'heuristique. Le réseau considéré étant très grand, le temps de résolution devient pratiquement irréaliste dans le contexte d'une entreprise. L'utilisation d'une heuristique comme celle développée est ambitieuse lorsqu'il est question de réseaux aussi grands. L'espace des solutions dans lequel l'heuristique cherche une solution est tellement vaste que la seule possibilité est de trouver un maximum local le plus rapidement possible, ce qui n'est évidemment pas une solution optimale.

Malgré tout, en posant que la semaine étudiée est typique pour une année et en multipliant Δ_s par 52 semaines, les revenus générés par l'algorithme 2 sont de 15 928 692 \$ comparativement à 14 160 536 \$ pour l'algorithme 3 et 8 512 920\$ pour l'algorithme 4. Il s'agit donc d'une différence de 1 768 156 \$ par rapport à l'algorithme 3 et de 7 415 772 \$ par rapport à l'algorithme 4. Malgré les contraintes de temps, de ressources informatiques et les hypothèses qui ont dû être posées pour simplifier le problème, il reste que ces résultats sont très intéressants.

De plus, l'étude des vols partagés de Continental Airlines et United Airlines fait valoir que l'heuristique développée peut optimiser la sélection de vols partagés avec plusieurs partenaires à la fois.

Les résultats de l'algorithme 4 indiquent à nouveau que cette méthode est moins performante que l'algorithme 3 qui choisit simplement tous les vols potentiels possibles. Cette observation tend à démontrer qu'il est tout aussi important de considérer l'interaction entre les vols partagés que l'effet de rendre partagé un vol dans le réseau.

6.4 Source d'erreur

C'est le modèle mathématique de répartition de la demande qui représente la source d'erreur principale parmi tous les algorithmes et les sources de données sur lesquelles se base l'heuristique pour fournir ses résultats. Tel que spécifié à la section 4.3, le modèle mathématique employé n'utilise pas de procédure « Spill and Recapture » pour répartir l'excédent de demande,

ce qui fait en sorte que la répartition de la demande est moins réaliste. Pour bien illustrer la façon de répartir l'excédent de demande du modèle mathématique utilisé, prenons l'exemple d'un marché Origine-Destination qui contient 10 itinéraires avec des valeurs d'attraction différentes. Pour simplifier la représentation, le nombre de passagers attribué à chaque itinéraire est traduit en taux d'occupation par rapport à la capacité de cet itinéraire. Ainsi, une part de marché est tout d'abord attribuée à chaque itinéraire quelle que soit la capacité de cet itinéraire.

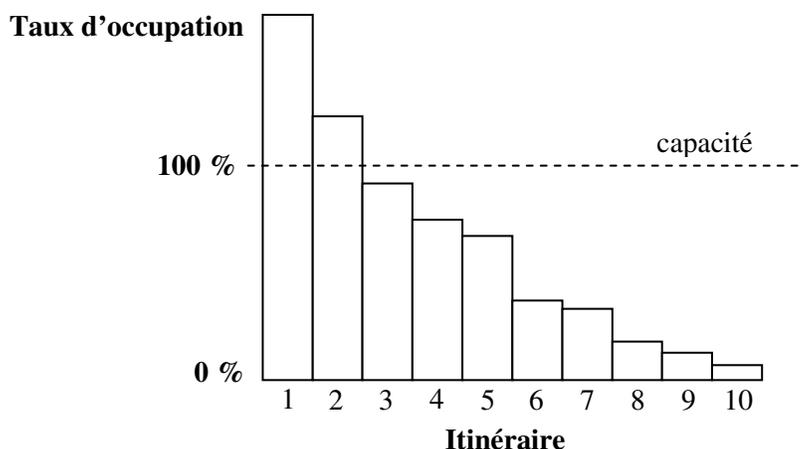
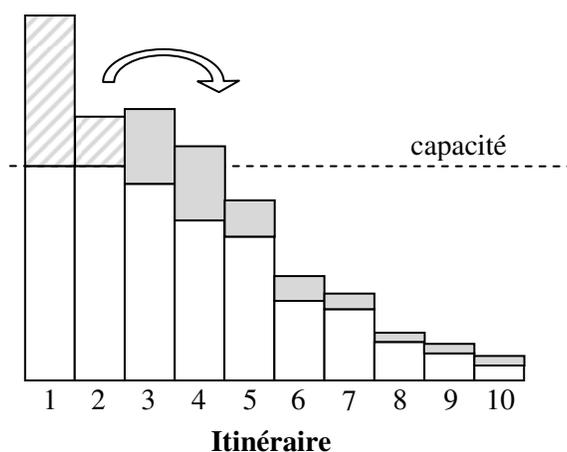
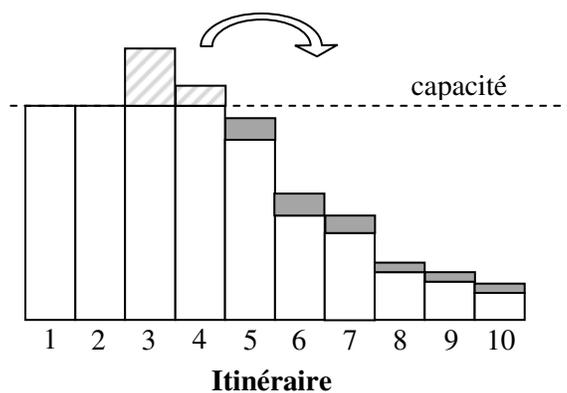


Figure 4. Attribution initiale dans un marché avec 10 itinéraires

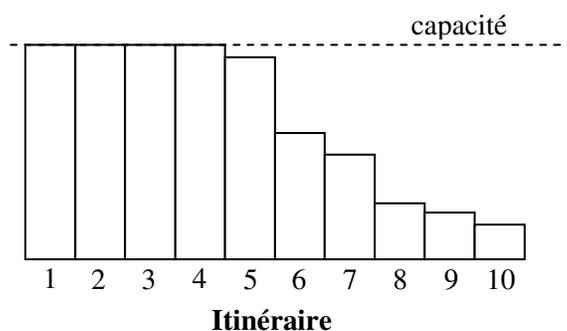
Dans cet exemple, la façon de répartir l'excédent de demande selon la méthode de « Spill and Recapture » est la suivante:



1. La demande en excédent sur les itinéraires les plus attractifs est redistribuée sur les autres itinéraires en fonction de leur attraction relative dans le marché et quelle que soit leur capacité.



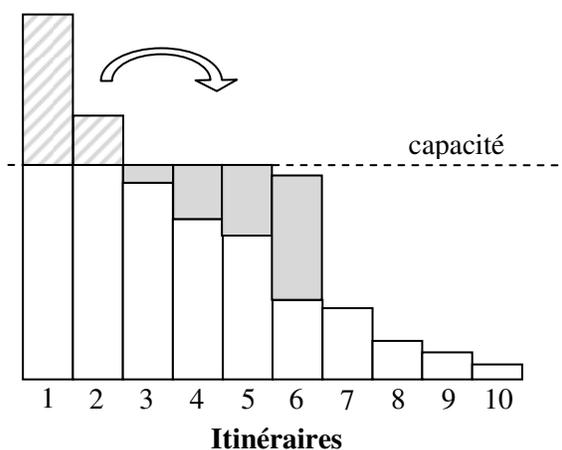
2. La demande en excédent sur les itinéraires les plus attractifs est à nouveau redistribuée sur les autres itinéraires les plus attractifs quelle que soit leur capacité et cette étape est répétée jusqu'à ce que la capacité de chaque itinéraire soit respectée.



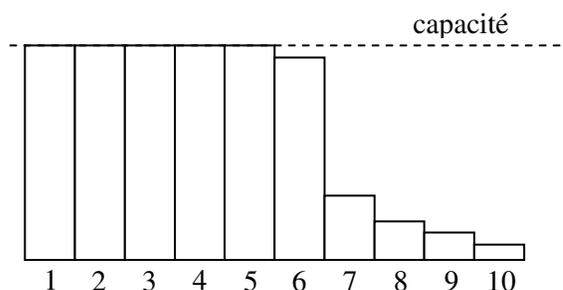
3. Attribution finale de la demande avec « Spill and Recapture »

Figure 5. Méthode de répartition de l'excédent de la demande avec « Spill and Recapture »

Dans ce même exemple, le modèle mathématique utilisé répartit l'excédent de demande de la façon suivante:



1. La demande en excédent sur les itinéraires les plus attractifs est redistribuée sur les autres itinéraires les plus attractifs en considérant leur capacité.



2. Attribution finale de la demande avec le modèle mathématique sans « Spill and Recapture »

Figure 6. Méthode de répartition de l'excédent de la demande avec le modèle mathématique

En résumé, le « Spill and Recapture » effectue plusieurs itérations pour redistribuer la demande en ne considérant pas la capacité des itinéraires et répartit cet excédent sur plusieurs itinéraires du marché en fonction de leur attrait relatif dans le marché. De son côté, le modèle mathématique répartit l'excédent de demande en une seule étape sur les autres itinéraires les plus attractifs et sur lesquels il reste de la place. Le « Spill and Recapture » est donc plus complexe et plus précis tandis que le modèle mathématique est plus rapide et moins précis.

Au final, le modèle mathématique fournit une répartition de la demande de bonne qualité comme il a été discuté à la section 4.4. Toutefois, le modèle mathématique effectue une répartition de la demande qui peut être considérée comme plus drastique. Il est facilement observable que la répartition finale du modèle mathématique dans l'exemple utilisé est plus drastique que celle du

« Spill and Recapture » qui présente une répartition plus équilibrée sur tous les itinéraires. L'itinéraire 6 démontre bien cette situation. En effet, cet itinéraire se fait initialement attribuer environ 40% de sa capacité. Avec le « Spill and Recapture », cette proportion augmente à environ 50%. Toutefois, avec le modèle mathématique, l'itinéraire 6 voit son attribution monter à environ 95% puisqu'il absorbe une grande partie de l'excédent de la demande du marché.

Ce comportement du modèle mathématique a certainement un impact sur l'heuristique développée puisqu'en rendant un itinéraire partagé, ce dernier pourrait se voir attribuer plus de passagers que ce qu'il recevrait dans la réalité. Si, dans l'exemple ci-haut, l'itinéraire 7 devenait partagé et voyait son attrait dépasser l'attrait de l'itinéraire 6, c'est lui qui subirait une hausse importante de demande. Le modèle mathématique a tendance à réagir un peu plus fortement à des changements que ce qu'on peut voir dans la réalité.

Bien qu'elle ne remette pas en question la pertinence de l'heuristique, cette source d'erreur doit être gardée à l'esprit lors de l'analyse des résultats.

6.5 Utilité de l'heuristique

Il existe, dans l'industrie aérienne, plusieurs logiciels qui permettent d'évaluer les effets liés à l'instauration d'un vol partagé sur le réseau d'un transporteur. Toutefois, il n'existe pas de logiciel qui analyse le réseau d'une compagnie aérienne et qui, en fonction de la connectivité de celui-ci avec d'autres transporteurs, propose une sélection de plusieurs dizaines ou centaines de vols qui maximiserait ses profits. En d'autres mots, le partage de vols est un phénomène qui est souvent étudié de manière locale et il n'existe pas d'outil mathématique commercial qui optimise cette pratique d'un point de vue global pour une compagnie aérienne. Il existe toutefois un besoin à ce niveau puisque, tel qu'il a été présenté à la section 1.1, il existe un énorme potentiel de revenus lié au partage de vols. C'est la complexité du problème et le fait qu'il faut considérer beaucoup de facteurs, objectifs comme subjectifs, qui font que l'industrie aérienne n'est pas rendue à ce stade aujourd'hui. Tout indique qu'il existe de tels systèmes à l'intérieur de certaines compagnies, mais il s'agit toujours de systèmes personnalisés avec des fonctionnalités limitées.

Au cours du projet, il nous a été possible d'approcher une des plus importantes compagnies de logiciel dans le domaine aérien pour discuter de leurs avancées dans l'optimisation du partage de vols. Cette compagnie développe actuellement un logiciel qui vise à maximiser la sélection de

vols partagés à grande échelle qui n'a pas encore été testé sur le réseau réel d'un transporteur. Il a été intéressant de constater que la stratégie employée par cette compagnie rejoignait les travaux effectués dans le cadre de notre projet à plusieurs niveaux. Cette compagnie utilise un modèle de répartition de la demande qui confère un plus grand attrait aux itinéraires partagés et avec lequel il est possible de quantifier l'effet de l'instauration d'un vol partagé dans le réseau. Pour effectuer la sélection de vols, cette compagnie de logiciel rend partagés tous les vols qui se connectent au réseau d'un transporteur et qui sont exploités par un partenaire. Lors de cette étape, le logiciel liste explicitement tous les itinéraires partagés qui sont créés, qu'ils contiennent un, deux, ou trois vols de partenaires et calculent la différence de revenus, positive ou négative, associée à l'instauration de cet itinéraire partagé. Par la suite, ce sont les vols qui composent la combinaison d'itinéraires la plus rentable qui sont choisis.

Ce qui est intéressant dans cette stratégie est que ce ne sont pas directement les vols qui sont choisis, mais plutôt les itinéraires qui dictent en deuxième temps quels vols choisir. En d'autres mots, la différence de revenus est calculée par itinéraire et non par vol, ce qui fait en sorte que les combinaisons de vols sont évaluées au même titre que les vols comme tels. Dans le présent projet, cet effet est considéré avec l'utilisation de la méthode heuristique. Toutefois, étant donné qu'il n'est pas possible d'effectuer beaucoup d'itérations, à cause de la lenteur de résolution de l'heuristique, les combinaisons de vols partagés ne sont pas aussi explicitement considérées que dans ce logiciel.

D'un autre côté, la stratégie du logiciel utilise une résolution unique comme l'ensemble des méthodes précédentes, ce qui empêche d'évaluer les effets combinés de rendre plusieurs vols partagés. L'heuristique développée dans le cadre de ce présent projet a l'avantage de tenir compte des effets de l'instauration des vols partagés dans le réseau et d'effectuer des itérations en conséquence.

À la lumière de l'étude faite sur les méthodes précédentes et sur ce logiciel en phase de développement, il est juste de dire qu'il existe un réel besoin d'optimisation de la sélection des vols partagés à grande échelle. Beaucoup d'efforts en recherche seront nécessaires pour arrimer l'optimisation du partage de vols à la gestion globale d'un réseau aérien. De plus, le partage de vols ne devrait pas uniquement être étudié lorsqu'une compagnie aérienne débute un partenariat ou intègre une alliance, il devrait aussi être révisé périodiquement étant donné qu'une majorité de

transporteurs modifient leurs horaires de vols à chaque saison. Si le vol partagé d'un partenaire qui décollait le matin part maintenant le soir, rien n'indique que ce dernier devrait rester partagé et vice-versa. L'ensemble des partenariats des transporteurs aériens devrait être réétudié sur une base régulière, ce qui n'est pas toujours le cas aujourd'hui dans l'industrie aérienne.

CONCLUSION

Il n'est certes pas simple d'optimiser la sélection de vols partagés dans le domaine déjà très complexe de l'industrie aérienne. Pourtant, le potentiel de profits liés au partage de vols est si grand que la majorité des compagnies aériennes empruntent désormais cette voie. L'objectif du présent projet était de proposer un outil pour aider les décideurs à effectuer une sélection de vols partagés qui maximise les revenus d'une compagnie aérienne, et ce, en considérant deux aspects qui n'étaient pas expressément pris en compte dans les modèles existants : l'impact de rendre un vol partagé dans le réseau et les interactions qui existent entre les vols que l'on souhaite rendre partagés. Pour réaliser cet objectif, une heuristique a été développée en effectuant plusieurs répartitions de la demande sur des graphes réduits correspondants aux vols étudiés et en modifiant, à chaque itération, la sélection de vols partagés. Le but de cette heuristique est de maximiser les revenus générés par Air Canada, la compagnie aérienne qui a participé au projet.

En posant plusieurs hypothèses et en utilisant diverses méthodes pour simplifier le problème tout en conservant un maximum de réalisme, deux heuristiques différentes sont proposées. Pour évaluer leur performance, deux méthodes utilisées actuellement sont simulées avec des algorithmes pour obtenir des valeurs de référence. Le premier algorithme choisit tous les vols partagés potentiels d'une compagnie partenaire qui connectent avec Air Canada. Le deuxième algorithme choisit tous les vols qu'il semble profitable de partager lorsque ces derniers sont évalués indépendamment. Les résultats obtenus démontrent que les deux heuristiques développées dans le cadre de ce projet proposent des sélections de vols partagés qui génèrent plus de revenus que ces deux algorithmes de références. Bien que plusieurs précautions doivent être prises à l'analyse de ces résultats, tout indique que l'angle à partir duquel est abordé le partage de vol dans ce projet est prometteur. À notre connaissance, l'heuristique présentée est la première méthode qui optimise les revenus liés au partage de vol qui considère les interactions entre les vols partagés choisis.

Malgré ces résultats intéressants, le problème de la gestion du partage de vols est loin d'être résolu. Le présent projet étudie seulement le cas précis d'Air Canada et comporte plusieurs limites. Étant donné que, dans notre cas, la puissance de calcul disponible était limitée, l'heuristique proposée ne comprend aucune résolution complète du réseau pour évaluer la rentabilité réelle des sélections de vols partagés. De plus, notre modèle mathématique aurait tout

avantage à utiliser un meilleur module de « Spill and Recapture » pour mieux représenter la répartition de la demande dans la réalité. En améliorant ces deux aspects, les résultats obtenus deviendraient plus crédibles. Une autre faiblesse importante de la méthode heuristique proposée est son temps de résolution qui est très long. Des recherches devraient être menées pour tenter d'accélérer ses méthodes de calcul, d'autant plus que la qualité de l'heuristique serait grandement améliorée si plus d'itérations étaient effectuées dans l'espace solution. D'un autre côté, l'optimisation du partage de vols devrait considérer les effets sur les revenus de tous les partenaires à la fois et non seulement les revenus d'une seule compagnie aérienne comme c'est le cas dans le présent projet. La dynamique de négociation est également un élément important qu'il faudrait ajouter dans la gestion des vols partagés. Finalement, le partage de vol ne devrait pas être traité comme un problème isolé, mais devrait plutôt faire partie du processus de construction des réseaux des compagnies aériennes comme un facteur supplémentaire à considérer pour optimiser la profitabilité globale d'une compagnie aérienne.

BIBLIOGRAPHIE

Abdelghany A., & Sattayalekha, W. (2009). On airlines code-share optimization: a modelling framework and analysis. *International Journal of Revenue Management* 3(3) 307-330.

Abrahams, M., (1983). A service quality model of air travel demand: An empirical study. *Transportation Research Part A*, 17(5), 385-393.

Bamberger, G.E., Carlton, D.W., & Neumann, L.R. (2004). An Empirical Investigation of the Competitive Effects of Domestic Airline Alliances. *Journal of Law and Economics*, 47(1) 195-222.

Belobaba, P.P. & Farkas, A. (1999). Yield Management Impacts on Airline Spill Estimation. *Transportation Science*, 33(2) 217-232.

Brueckner, J.K. (2003). International Airfares in the Age of Alliances: The Effects of Codesharing and Antitrust Immunity. *The Review of Economics and Statistics*, 85(1) 105-118.

Brueckner, J.K. (2001). The economics of international codesharing: an analysis of airline alliances. *International Journal of Industrial Organization*, 19(10) 1475-1498.

Chen, Y., & Gayle, P.G. (2007). Vertical contracting between airlines: An equilibrium analysis of codeshare alliances. *International Journal of Industrial Organization*, 25(5) 1046-1060.

Gayle, P.G. (2006). Airline Code-Share Alliances and Their Competitive Effects. *Journal of Law and Economics*, 50(4) 781-819.

Hannegan, T.F., & Mulvey, F.P. (1995). International airline alliances: An analysis of codesharing's impact on airlines and consumers. *Journal of Air Transport Management*, 2(2) 131-137.

Ippolito, R.A. (2005). Estimating airline demand with quality of service variables. *Journal of Transport Economics and Policy*, 15(1) 7-15.

Koppelman, F.S., & Coldren, G.M. (2005). Modeling the competition among air-travel itinerary shares: GEV model development. *Transportation Research Part A*, 39(4) 345-365.

Koppelman, F.S., & Pas, E. (1980). Travel Choice Behavior : Models of Perceptions, Feelings, Preference and Choice. *Transportation Research Record*, 765 26-33.

Li, M.Z.F. & Oum, T.H. (2000). Airline spill analysis- beyond the normal demand. *European Journal of Operational Research*, 125(1) 205-215.

O'Neal, J.W., Jacob, M.S., Farmer, A.K., & Martin, K.G. (2007). Development of a Codeshare Flight-Profitability System at Delta Air Lines. *Interfaces*, 37(5), 436-444.

Oum, T.H., Park, J.H. & Zhang, Anming (1996). The Effects of Airline Codesharing Agreements on Firm Conduct and International Air Fares. *Journal of Transport Economics and Policy*, 30(2), 187-202.

Park, J.H. (1997). The effects of airline alliances on markets and economic welfare. *Transportation Research Part E*, 33(3) 181-195.

Proussaloglou, K., & Koppelman, F. (1995). Air Carrier Demand. *Transportation*, 22(4) 371-388.

Shlifer, E. & Vardi, Y. (1975). An Airline Overbooking Policy. *Transportation science*, 9(2) 101-114.

Sivakumar, R. (2003). Codeshare Optimizer – Maximizing Codeshare Revenues. *AGIFORS Schedule and Strategic Planning 2003*. Toulouse, France.

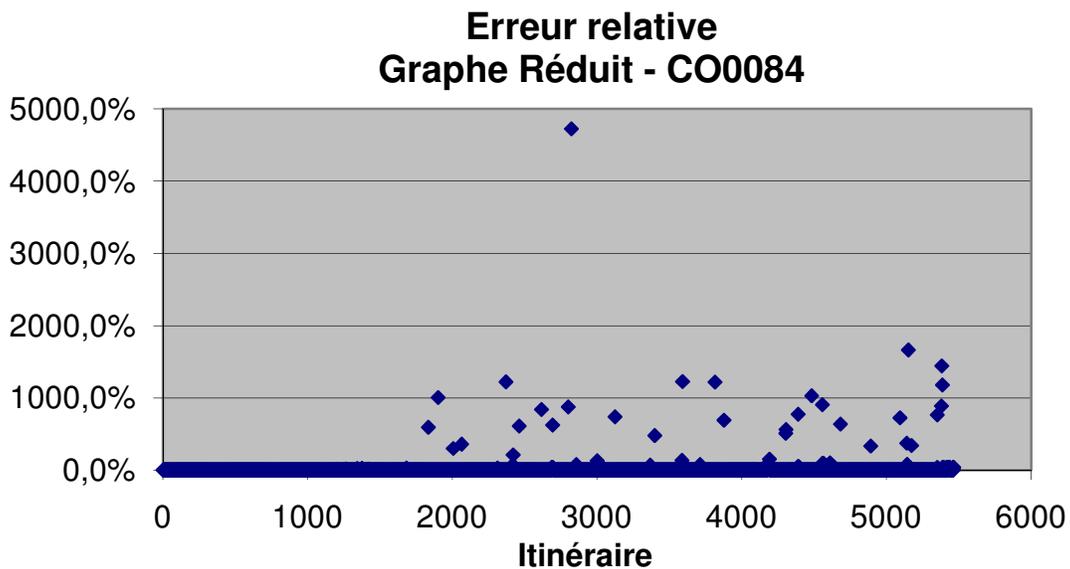
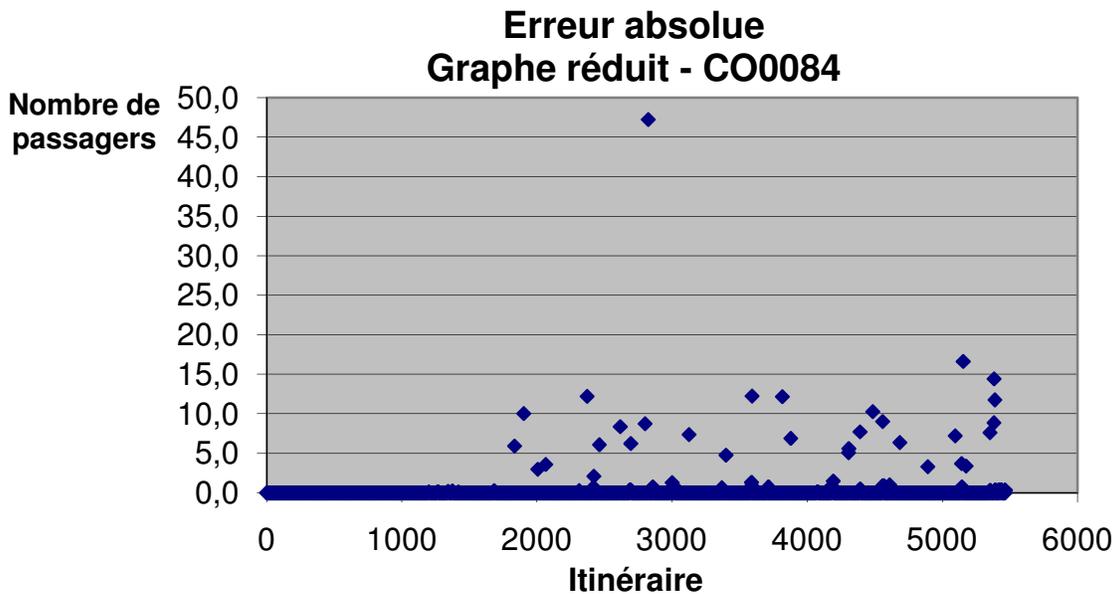
Srinivasan, A. (2004). Optimizing Codeshare Revenues. *AGIFORS Annual Symposium 2004*. Singapore.

Suzuki, Y., Tyworth, J.E., Novack, R.A. (2001). Airline market share and customer service quality: a reference-dependent model. *Transportation Research Part A*, 35(9) 773-788.

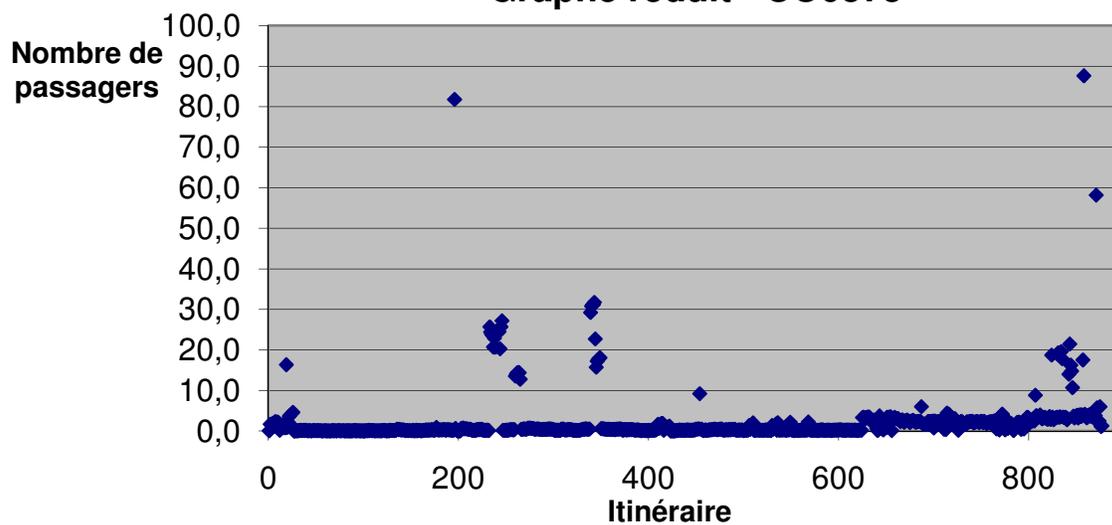
Wen, Y.H., & Hsu, C.I. (2006). Interactive multiobjective programming in airline network design for international airline code-share alliance. *European Journal of Operation Research*, 174(1) 404-426.

ANNEXE 1 – Validation du modèle de répartition de la demande construit

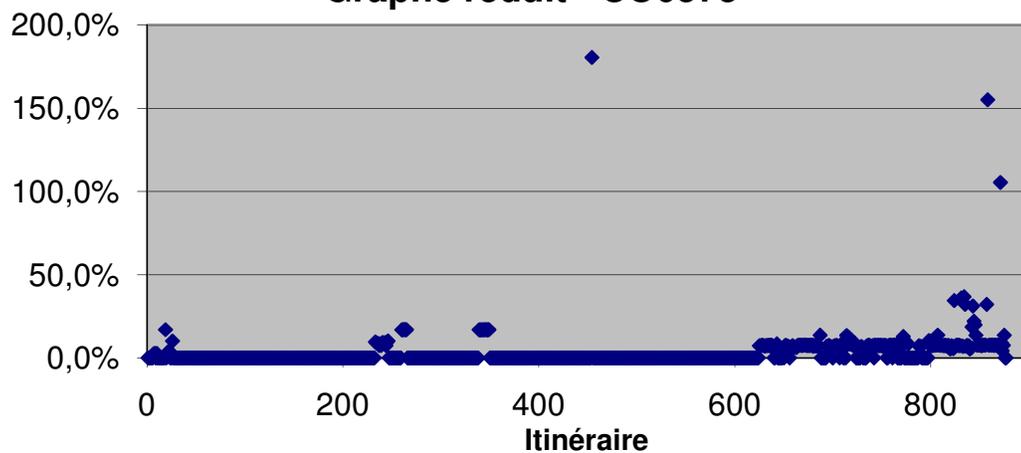
Pour bien comprendre le comportement du modèle de répartition de la demande développé, les graphiques d'erreur absolue et d'erreur relative de tous les itinéraires des graphes réduits de CO0084, CO0575, CO1866, CO2547 et CO3200 sont ici présentés.



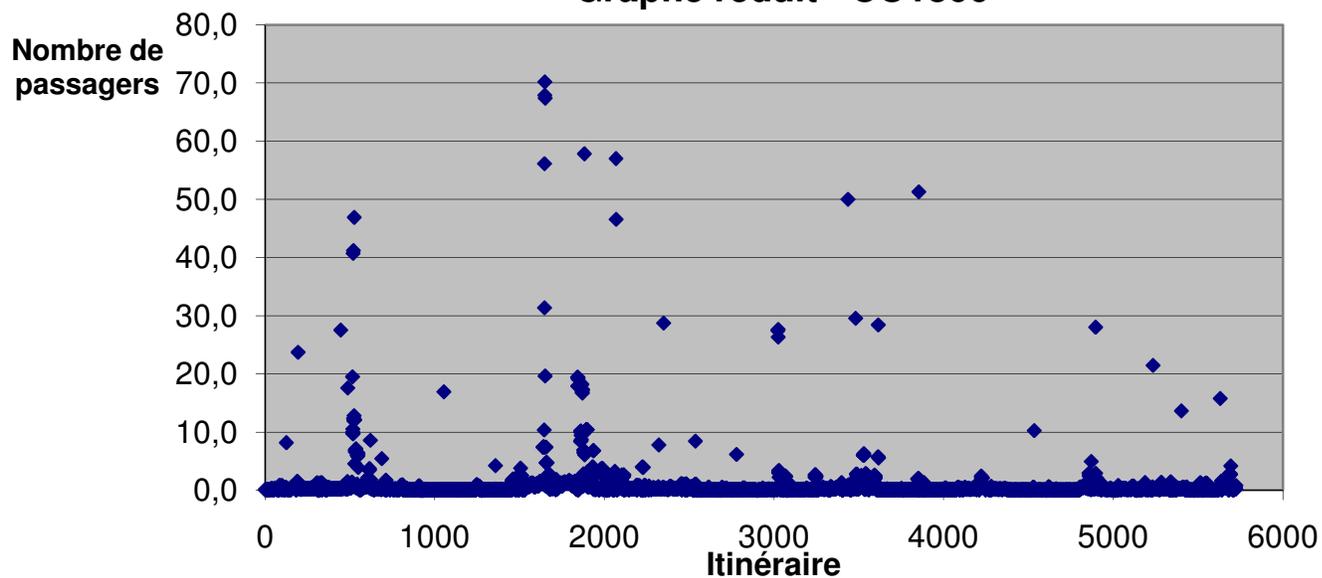
Erreur absolue
Graphe réduit - CO0575



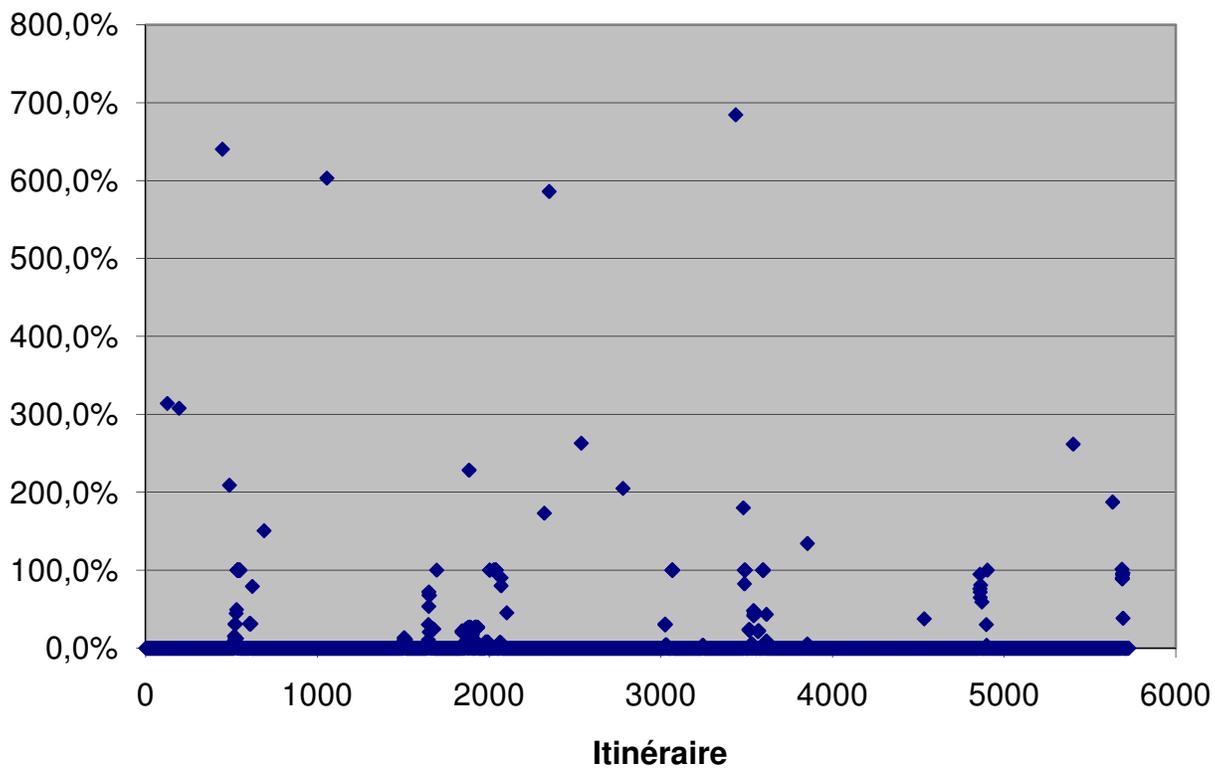
Erreur relative
Graphe réduit - CO0575



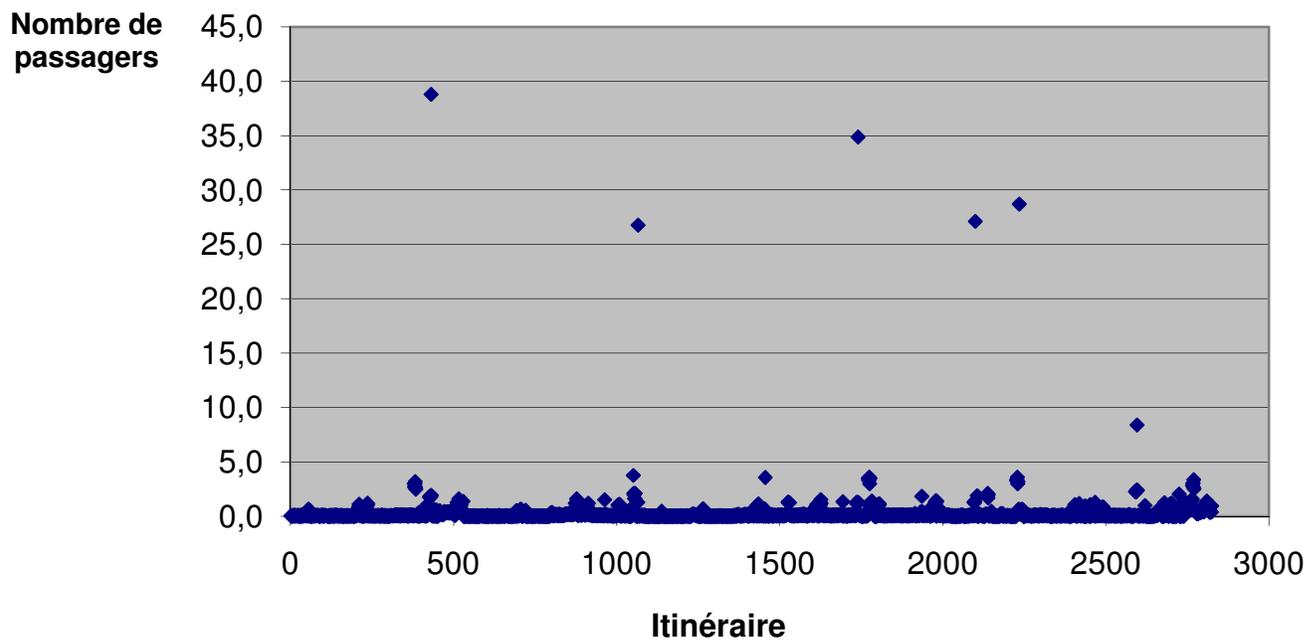
Erreur absolue
Graphe réduit - CO1866



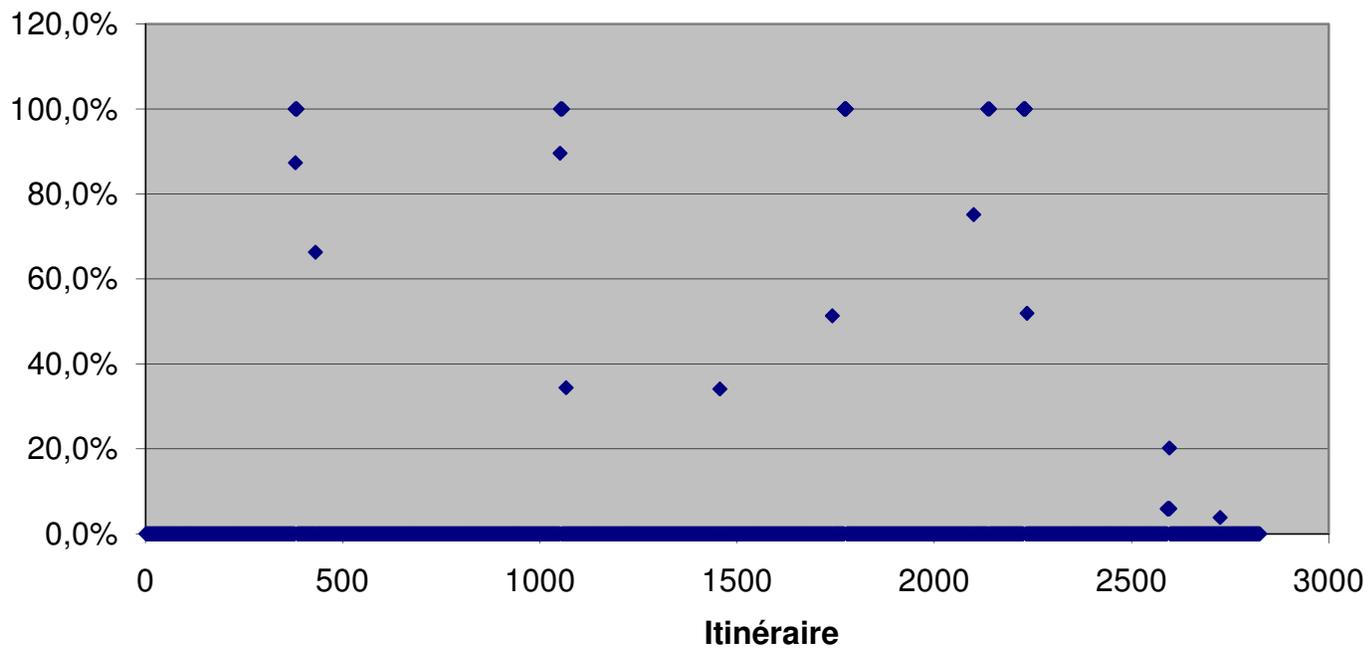
Erreur relative
Graphe réduit - CO1866



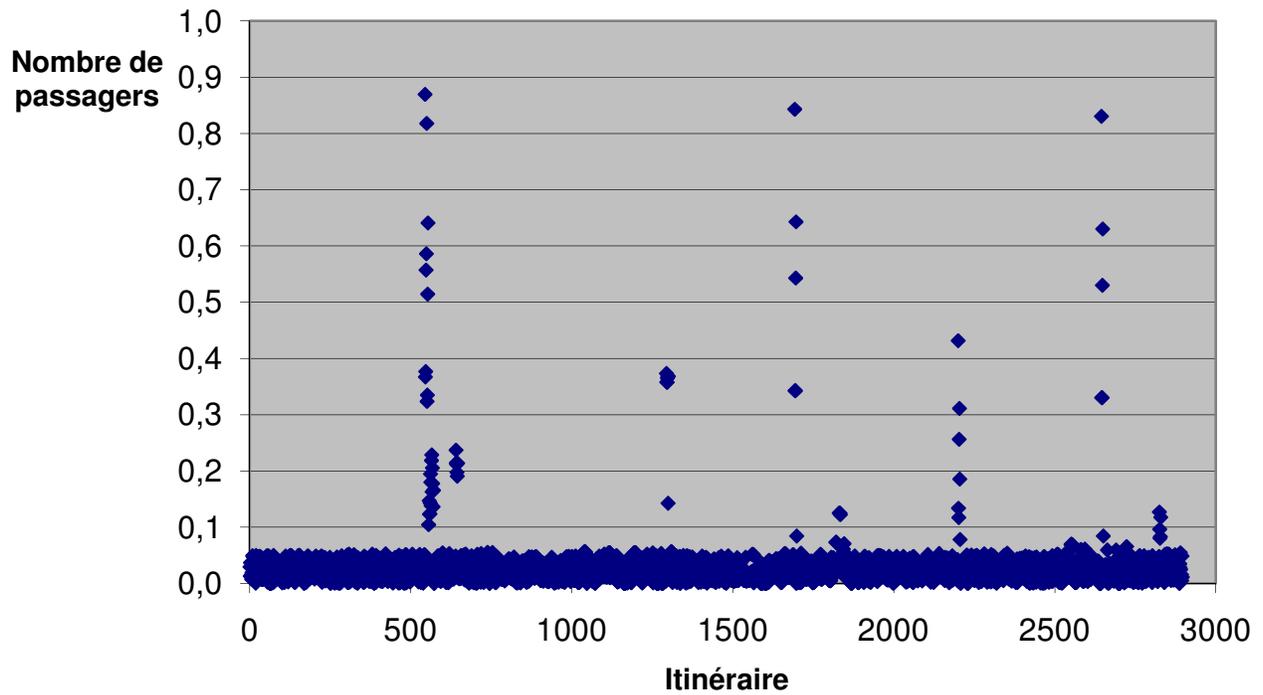
Erreur Absolue Graphe Réduit - CO2547



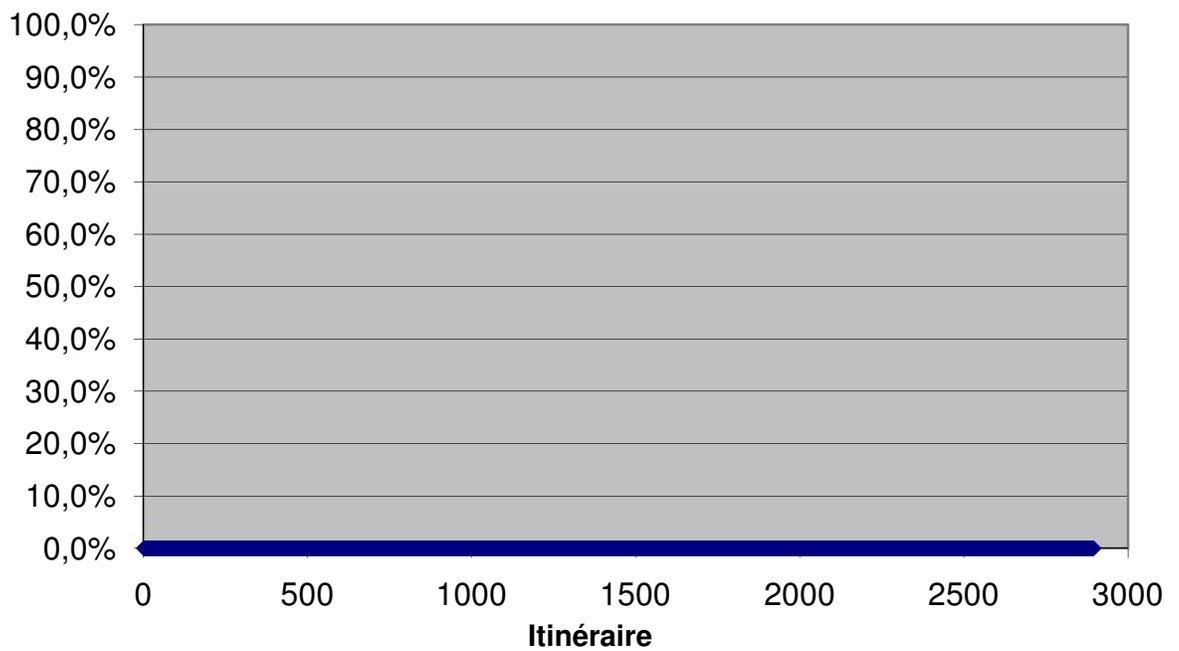
Erreur relative Graphe Réduit - CO2547



Erreur absolue
Graphe réduit - CO3200



Erreur relative
Graphe réduit - CO3200



ANNEXE 2 – Application de l’algorithme 1 avec Continental Airlines

Solution Initiale	Itération 1	Itération 2	Itération 3	Itération 4	Itération 5	Itération 6	Itération 7
Inclure 106 vols	Exclure CO1866 CO0764 CO0636	Inclure CO0090 CO1671 CO9217	Inclure CO0041 CO1842	Inclure CO0034 CO2487 CO0662	Inclure CO2214 CO0459 CO9248	Exclure CO0570 Inclure CO1866 CO9250	Inclure CO0636
	Inclure CO0570 CO2738 CO9288 CO1696						
\$81 599	\$134 681	\$146 288	\$150 247	\$150 492	\$96 758	\$106 715	\$106 810
Itération 8	Itération 9	Itération 10	Itération 11	Itération 12	Itération 13	Itération 14	Itération 15
Inclure CO1064 CO9131	Inclure CO0423 CO9225	Inclure CO0476 CO0663	Inclure CO0764	Exclure CO0636 Inclure CO0070 CO0363	Exclure CO1064 Inclure CO0083	Exclure CO0764 Inclure CO0096	Inclure CO2490
\$108 302	\$108 860	\$129 622	\$124 839	\$126 643	\$124 939	\$127 888	\$127 930
Itération 16	Itération 17	Itération 18	Itération 19	Itération 20	Itération 21	Itération 22	Itération 23
Inclure CO0570 CO0190 CO3065	Inclure CO0636	Inclure CO1064	Inclure CO0764	Exclure CO0636 Inclure CO0080	Exclure CO1064 Inclure CO2775	Exclure CO0764 CO2187 Inclure CO9198	Exclure CO2140 Inclure CO0591
\$156 541	\$156 729	\$158 471	\$153 697	\$155 451	\$141 068	\$143 960	\$141 278
Itération 24	Itération 25	Itération 26	Itération 27	Itération 28	Itération 29	Itération 30	Itération 31
Inclure CO2150	Inclure CO0636	Inclure CO1064	Inclure CO0764	Exclure CO0636 Inclure CO2140	Exclure CO1866 CO1064 Inclure CO2187	Exclure CO0764	Inclure CO0636
\$146 603	\$146 790	\$148 532	\$143 759	\$140 783	\$147 900	\$150 798	\$150 985
Itération 32	Itération 33	Itération Finale					
Inclure CO1064	Inclure CO0764	Exclure CO0636					
\$152 727	\$147 954	\$149 666					

ANNEXE 3 – Application de l’algorithme 2 avec Continental Airlines

Solution Initiale	Itération 1	Itération 2	Itération 3	Itération Finale
Inclure	Exclure	Inclure	Inclure	Exclure
106 vols	CO1866 CO0764 CO0636	CO0083	CO2490	CO2490
	Inclure			
	CO0570			
	CO2014			
	CO0090			
	CO0041			
	CO2738			
	CO0034			
	CO2214			
	CO0423			
	CO9288			
	CO1696			
	CO1671			
	CO0476			
	CO0459			
	CO0663			
	CO9250			
	CO9131			
	CO2487			
	CO0070			
	CO9225			
	CO0096			
	CO1842			
	CO9217			
	CO0080			
	CO2775			
	CO9198			
	CO0662			
	CO0363			
	CO0190			
	CO0591			
	CO9248			
	CO2150			
	CO3065			
\$81 599	\$160 595	\$160 658	\$100 279	\$160 658

ANNEXE 4 – Application de l’algorithme 2 au cas de Continental Airlines et United Airlines

Solution Initiale	1	2	3	4	Solution Finale
Inclure	Exclure	Inclure	Inclure	Inclure	Inclure
363 vols	8 vols	CO0570	UA6392	UA0884	UA1122
	Inclure				
	139 vols				
200 774 \$	270 846 \$	294 778 \$	305 143 \$	306 188 \$	306 321 \$