UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE DE MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE

Année : 2017-2018. N° d'ordre : 134

THÈSE DE DOCTORAT UNIQUE

Mention : Mathématiques et Modélisation
Spécialité : Analyse, Statistique et Applications

Présentée par

YOUSSOUF Ahamada

TITRE

Contribution à la gestion optimale des créneaux horaires aéroportuaires: Application à l'Aéroport International Blaise Diagne de Diass

Soutenue le 13 Avril 2019 devant le jury composé de :

Président :	**M. Gabriel Birame NDIAYE**	Professeur	UCAD (Sénégal)
Rapporteurs :	**M. Pape NGOM**	Maître de Conférences (CAMES)	UCAD
	M. Blaise SOME	Professeur	U.O (Bourkina Faso)
	M. Mamadou Abdoul DIOP	Professeur	UGB (Sénégal)
Examinateurs :	**M. Benjamin MAMPASSI**	Professeur	UCAD (Sénégal)
Directeurs de thèse :	**Mme. Salimata G. DIAGNE**	Professeur	UCAD (Sénégal)
	M. Youssou NGNINGUE	Professeur	Université Laurentian (CANADA)

Contribution à la gestion optimale des créneaux horaires aéroportuaires: Application à l'Aéroport International Blaise Diagne

2 mai 2019

DÉDICACE

«IN MEMORIAM»

► À Mon regretté papa, AHAMADA SOIDI, qui m'a toujours encouragé à faire le doctorat, mais hélas il ne pourra pas voir le fruit de son encouragement. J'aurais tant aimé que vous soyez là aujourd'hui. Jamais les mots ne suffiront pour exprimer ce que je ressens. Que la terre vous soit légère et qu'Allah vous accueille dans son paradis.

Amine ! !

► À ma mère RAHAMATA Assoumani :
Je ne saurai trouver les mots qu'il faut pour exprimer tout mon amour et ma profonde gratitude pour les sacrifices consentis. Vos prières n'ont jamais fait défaut. Qu'Allah vous garde en bonne santé auprès de nous, afin que vous puissiez récolter, à nos cotés, les fruits de vos sacrifices.

► À mon enfant IHSSANE, que ce travail te serve d'exemple et à mon épouse SOIBRATA AHMED ALI, qu'elle trouve ici le fruit de son amour et de sa patience.

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le bon Dieu Tout puissant, créateur du ciel et de la terre de m'avoir donné la santé et le courage afin que je puisse arriver à cette fin.
Je voudrais par ces remerciements manifester ma profonde gratitude et ma forte reconnaissance à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail.
À ma directrice de Thèse Pr Salimata GUEYE DIAGNE, professeur titulaire à l'UCAD, de m'avoir accepté dans son laboratoire. Ce travail ne serait pas ce qu'il est sans sa présence, sa disponibilité, sa générosité, sa rigueur scientifique, son enthousiasme, son amour en vers ses étudiants, sa volonté de faire réussir ses étudiants et surtout ses précieux conseils qui m'ont permis de travailler et d'en arriver là.

Je remercie aussi le Professeur Youssou GNINGUE de l'Université Laurentienne (CANADA) pour l'attention particulière qu'il a portée sur mes travaux, pour ses importants conseils et son sens de l'écoute, sans occulter son énorme qualité humaine.

Professeurs, Je vous en suis très reconnaissant.

Avec vous, j'ai appris beaucoup de choses et surtout une façon scientifique d'aborder des problèmes.

Je remercie aussi le Pr Blaise SOME, Professeur titulaire à l'université de Ouagadougou au Burkina ; le Pr. Pape NGOM, Maître de Conférences à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar et le Pr. Mamadou Abdoul DIOP,

Professeur titulaire à l'université Gaston Berger de Saint Louis au Sénégal d'avoir accepté cette lourde tâche, celle de rapporter cette thèse. Un grand remerciement au Professeur Gabriel Birame NDIAYE pour m'avoir fait honneur de présider mon Jury de thèse.

L'honneur me choit de remercier de vive voix M. Benjamin MAMPASSI, Professeur titulaire de l'Université Cheikh Anta Diop au Sénegal ; d'avoir accepté d'être membres du jury pour l'évaluation de ce travail malgré leur multiples occupations.

Je remercie aussi la Direction générale de l'ANACIM plus particulièrement le Directeur général M. Maguèye Marame NDAO pour sa collaboration. Je remercie également M. Coutaille BA, Chef du Département Système d'Information et de Télécommunications de l'ANACIM et Mme Marie NDIAYE SY, Chef du Service Accords Aériens et Régulations de l'ANACIM de m'avoir fourni les informations nécessaires et de leur disponibilité pour la réalisation de ce travail et d'avoir accepter de prendre part à la soutenance. Je n'oublie pas Mr Simo DIOKH de l'ADS d'avoir accepté et de m'accompagner plusieurs fois sur le terrain afin que je puis comprendre de mieux les queues et les longues attentes que traversent les passagers pour les formalités administratives.

Toute ma gratitude à tous les Docteurs de l'équipe de Mathématiques de la Décision/Recherche Opérationnelle du Laboratoire de Mathématiques Appliquées (LMA) du Département de Mathématiques et Informatique que j'ai eu à côtoyer, en particulier à Dr Coumba DIALLO, Dr Ndogotar NELIO, Dr Déthié DIONE et Dr Bakary KONE.

Mes amis et collegues personnelles de l'équipe de Mathématiques de la Décision, en particulier à Ibrahima DIEDHIOU, Amadou COULIBAY, Abdourhmane GUEYE, Ibrahima ALI et Emani El Hassan, que je ne peux pas citer tous. Vous m'avez tous aidé dans mes recherches. Les partages et les échanges scientifiques de tous les jours m'ont aidé à aller de l'avant et m'ont donné plein espoir.

Je tiens à remercier mes parents, amis et collègues qui m'ont soutenu et encouragé à réaliser ce rêve de faire la thèse.

Un remerciement particulier à ma maman ICHATA MDJASSIRI qui ne cesse de prier pour que je réussisse dans la vie.

Enfin, je remercie ma chère épouse Soibrata Ahamed Ali, mon enfant Ihssane Youssouf pour leur patience. Pendant de longs moments, nous nous sommes pas vus mais vous avez pu supporter jusqu'au bout. Recevez ici le fruit de votre patience. A toi mon épouse, merci encore une fois pour tes encouragements et ton amour.

RÉSUMÉ

Dans cette thèse, nous résolvons un problème d'attribution des créneaux d'aéroport en utilisant l'optimisation linéaire en nombres entiers et la programmation dynamique. L'attribution des créneaux aéroportuaires dépend de la configuration de l'aéroport plus particulièrement de sa capacité. Nous avons établi deux modèles basés sur la programmation linéaire en nombres entiers avec contraintes de capacités. Le but de ces deux modèles est de maximiser le nombre de demandes acceptables sur un intervalle de temps, six mois avant l'exécution. Pour chacun de ces deux modèles, nous avons fait une extension, pour intégrer dans un intervalle donné les demandes non acceptées à l'intervalle précédent, en proposant deux modèles dynamiques.

Pour assurer une gestion efficace des demandes acceptées par le modèle dynamique, nous avons proposé un autre modèle de répartition optimale de ces demandes, en attribuant un intervalle de temps ayant un instant initial et un instant final pour chaque vol. Ce dernier modèle a pour but de minimiser les retards des vols ayant un droit acquis sur l'intervalle. Nous avons également élaboré un dernier modèle, qui minimise les coûts relatifs au retard d'un vol, pour le cas d'un échange combinatoire de créneaux. Tous ces modèles sont utilisés pour optimiser la gestion du trafic aérien.

Pour évaluer les pérformances de nos modèles, nous avons utilisé le logiciel Cplex dans OPL (Optimization Programming Language) pour la simulation, avec des données réelles de l'aéroport Leopold Sedar Senghor de Dakar et de l'Aéroport Internationnal Blaise Diagne de Diass.

Mots clés : Optimisation, Créneaux horaires aéroportuaire, Capacité d'un aéroport, programmation linéaire en nombres entiers, Programmation dynamique, Echange combinatoire des créneaux.

ABSTRACT

In this thesis, we solve a problem of airport slot allocation using integer linear optimization and dynamic programming. The allocation of airport slots depends on the configuration of the airport, particularly its capacity. We have established two models based on integer linear programming with capacity constraints. The purpose of these two models is to maximize the number of acceptable requests over a period of time, six months before execution. For each of these two models, we made an extension, to integrate in a given interval the requests not accepted at the previous interval, proposing two dynamic models.

To ensure effective management of the requests accepted by the dynamic model, we proposed another model of optimal distribution of these requests, by assigning a time interval having an initial moment and a final moment for each flight. This last model aims to minimize the delays of robberies with an acquired right over the interval. We have also developed a final model, which minimizes the costs of delaying a flight, in the case of a combinatorial slot exchange. All of these models are used to optimize air traffic management.

To evaluate the performance of our models, we used the Cplex software in OPL (Optimization Programming Language) for the simulation, with real data from the Leopold Sedar Senghor airport in Dakar and the international airport Blaise Diagne of Diass.

Keywords : Optimization, airport time slots, airport capacity, linear programming in integer numbers, dynamique programming, Combinatorial exchange of slots.

TABLE DES MATIÈRES

Dédicace **i**

Remerciements **ii**

Résumé **v**

Abstract **vii**

Abréviations et Notations **xiii**

Liste des tableaux **xv**

Table des figures **xvi**

1 Introduction générale **2**

1.1 Contexte général 2

1.2 Problématique 4

1.3 Objectifs 6

1.4 Etat de l'art 7

1.4.1 Travaux relatifs à la capacité aéroportuaire 8

1.4.2 Travaux relatifs à l'attribution des créneaux 10

1.4.3 Travaux relatifs à l'échange combinatoire des créneaux 11

1.5 Plan de la Thèse 12

I Facteurs influençant les créneaux horaires 14

2 Configuration des aéroports du Sénégal 15

2.1 Introduction 15
2.2 Description des aéroports du Sénégal 16
2.2.1 Configuration de l'AILSS de Dakar 16
2.2.2 Configuration de l'AIBD de Diass 19
2.2.3 Fonctionnement des aéroports du Sénégal 21
2.2.4 Système général d'une plate-forme aéroportuaire . . . 24
2.3 Capacité aéroportuaire 25
2.3.1 Capacité de l'aire des mouvements 27
2.3.2 Capacité d'un terminal passager 28
2.3.3 Relation entre les sous-capacités d'un aéroport 30
2.4 Droits de trafic 31
2.5 Description des créneaux horaires 31
2.5.1 Objectif des créneaux 32
2.5.2 Règles d'attribution des créneaux 33
2.5.3 Facteurs d'attribution des créneaux 35
2.6 Conclusion 36

3 Notions générales d'optimisation 37

3.1 Introduction 37
3.2 Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE) 38
3.2.1 Programmation linéaire 38
3.2.2 Programmation linéaire en nombres entiers 39
3.3 Modélisation d'un PLNE 39
3.4 Méthode de résolution 40
3.4.1 Méthode de séparation et évaluation (Branch and Bound) 40
3.4.2 Méthodes de coupes de Gomory 41
3.5 Programmation Dynamique (PD) 44
3.5.1 Principe de Bellman 46
3.5.2 Avantage du principe de Bellman 47
3.6 Conclusion 47

4 Modélisation et résolution des problèmes d'attribution des capacités 48
4.1 Introduction 48
4.2 Quelque modèles existants des sous-capacités 49
4.2.1 Optimisation des postes de stationnements 49
4.2.2 Optimisation de la capacité d'une piste 54
4.2.3 Optimisation de la capacité du terminal passager . . 55
4.3 Optimisation de la capacité aéroportuaire 56
4.3.1 Modélisation et résolution par la PLNE 56
4.3.2 Modélisation et résolution par la PD 60
4.4 Algorithme de résolution 62
4.5 Application du modèle à l'AILSS 64
4.5.1 Données utilisées 64
4.5.2 Résultats de l'expérimentation et Interprétation . . . 64
4.6 Conclusion 66

II Gestion optimale des créneaux aéroportuaires 67

5 Optimisation des créneaux d'aéroport pour la gestion du trafic aérien 68
5.1 Introduction 68
5.2 Système d'attribution des créneaux 69
5.2.1 Règles d'attribution des créneaux 69
5.2.2 Contraintes de limitations des créneaux 70
5.3 Gestion optimale des créneaux 71
5.3.1 Modèle d'affectation dans les périodes 71
5.3.2 Modèle d'ordonnancement dans les périodes 73
5.4 Algorithmes de résolutions 76
5.4.1 Algorithme pour le problème d'affectation 77
5.4.2 Algorithme pour le problème d'ordonnancement . . . 77
5.5 Application du modèle avec des données réelles de l'AIBD . 78
5.5.1 Données utilisées 79
5.5.2 Résultats de l'expérimentation 80
5.5.3 Intérpretation 80

5.6 Conclusion 81

6 Conclusion et perspectives **83**

6.1 Conclusion 83

6.2 Résumé des résultats 85

6.3 Limites 86

6.4 Perspectives 86

Annexe **88**

Bibliographie **90**

ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS

AILSS : Aéroport International Léopold Sedar senghor de Dakar ;

AIBD : Aéroport Internationnal Blaise Diagne de Diass ;

IATA : Association Internatinnal de Tranport Aérien ;

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale ;

CNRA : Centre Régional de la Navigation Aérienne ;

OUA : Organisation de l'Unité Africaine ;

ADS : Agence des Aéroports du Sénégal ;

OMT : Organisation Mondial du tourisme ;

SHS : Sénégal Handling Services ;

ANAMS : Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal ;

ANACS : Agence Nationale de l'Aviation Civile du Sénégal ;

ASCNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar ;

ANACIM : Agence National de l'Aviation Civil et de la Méteorologie ;

DTA : Direction du transport aérien ;

PL : Programmation Linéaire ;

PLNE : Programmation Linéaire en Nombres Entiers ;

PD : Programmation Dynamique ;

OPL : Optimization Programming Language.

JFRPLC : Journées Francophones de Programmation Logique et Programmation par Contraintes

CEDECE : Colloque de la Commission pour l'Étude des Communautés Européennes

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Forme du tableau optimal 42
3.2 Introduction d'une variable d'écart 44

4.1 Demandes d'arrivées et de départs de tous les mardi de l'été 2015 entre 19h00 et 20h00 65
4.2 Demandes acceptées et non acceptées de tous les mardi de l'été entre 19h00 et 21h00 66

5.1 Périodes de demande de la semaine 70
5.2 Demandes du Jeudi 6 janvier 2018 de 20h00 à 21h00 79
5.3 Planning horaire élaboré 80

1 Résultats de la simulation du modèle d'attribution des postes de stationements 89

TABLE DES FIGURES

2.1 Configuration de l'aire de mouvement de l'aéroport de Dakar 17
2.2 Aéroport LSS de Dakar 18
2.3 Terminal passager de l'Aéroport LSS 18
2.4 Disposition de l'aire de mouvement de l'AIBD 20
2.5 Aéroport International Blaise Diagne 21
2.6 Système de fonctionnement aéroportuaire 24
2.7 Transformation des flux d'avions en flux de passagers 26
2.8 Structure générale des files d'attentes 28
2.9 Itinéraire du passager International, arrivée et depart 29
2.10 Capacité Aéroportuaire 30
2.11 Facteur de premier ordre de planification 35

4.1 Schéma simplifié d'un aéroport 49
4.2 Capture de l'Interface de simulation 53
4.3 Horizon d'optimisation 56

5.1 Ensemble des créneaux 74

LISTE DES ALGORITHMES

1 Résolution du problème de poste des stationnements 52
2 Résolution du modèle basé sur la programmation dynamique 63
3 Résolution du Problème d'affectation 77
4 Résolution du problème d'ordonnancement 78

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Sommaire

1.1 Contexte général 2
1.2 Problématique 4
1.3 Objectifs 6
1.4 Etat de l'art 7
1.5 Plan de la Thèse 12

1.1 Contexte général

Le transport aérien joue un rôle majeur dans le développement économique globalisé que connaît actuellement le monde. La croissance très rapide du trafic aérien avec un taux de 10% impose aux aéroports de s'organiser de façon plus efficace afin d'absorber ces flux. Un aéroport est défini par le service technique de l'aviation civil Européen [64] comme un système dynamique qui gère des flux d'avions, des passagers, des frets et personnels de services et composés par des sous-systèmes de liaisons [1]. Les aéroports sont souvent qualifiés en fonction de leurs activités principales, nationales ou internationales.

Ce système fonctionne avec des éléments ayant des taux d'utilisation à

1. système de pistes et taxiways, postes avions, terminaux passagers, accès ...

différents niveaux de saturation et de délais. Les structures actuelles d'opération et de contrôle du trafic aérien ne sont pas en mesure de faire face à cette croissance de manière efficace [10]. Les limites de capacité, aussi bien pour les flux de trafic aérien que pour les activités aéroportuaires, sont déjà presque atteintes. De nombreux aéroports dans le monde sont au bord de la saturation et le moindre incident peut se traduire en une situation chaotique fortement pénalisant pour tous les acteurs du transport aérien. Tous les pays s'intéressent de plus en plus aux problèmes liés au trafic aérien. Au niveau du Sénégal, les demandes de l'ancien aéroport de Dakar étaient sujettes à de fortes variations ces dernières années. De plus, l'aire de mouvement et l'aérogare étaient devenus insuffisants pour répondre efficacement à l'augmentation forte du trafic aérien et aux besoins en espace conformément aux lignes directrices sur les ratios proposés par l'Association International de Transport aérien (IATA)[10][63] [12][14]. Plusieurs solutions ont été tentées notamment :

- L'élargissement des salles d'embarquements et d'arrivées pour la création d'un nouvel tapis de récupération des bagages ;
- L'utilisation de l'ancienne piste fermée comme étant un parking civil pour les avions de long courrier ;
- etc.

Cependant, ces solutions sont devenues également inefficaces car les demandes restaient toujours supérieures à l'offre particulièrement à certaines périodes. Par exemple, la demande des compagnies souhaitant utiliser cet ancien aéroport était supérieure à la capacité disponible. Ainsi, l'Aéroport International Blaise Diagne de Diass est construit pour pallier les problèmes de saturation de l'aéroport Léopold Sédar Senghor de Dakar.

La construction de ce nouvel aéroport consiste surtout à désengorger l'ancien aéroport Léopold Sédar Senghor qui a été construit dans les années 60. Toutefois ce nouveau aéroport rencontre des difficultés majeures d'ordre environnemental puisqu'il est construit à côté d'une usine de cimenterie.Cela peut avoir des conséquences négatif dans le futur. Sa capacité dépasse largement celle de l'aéroport Léopold de Dakar. Il est question de l'exploiter de façon optimale en revoyant le système actuel de fonctionnement des entrées et des sorties de l'aéroport.

Un créneau horaire est une période prévue, pour l'arrivée ou le départ, disponible ou attribuée à un mouvement d'aéronef d'une compagnie aérienne à une date précise, dans un aéroport coordonné [2].

1.2 Problématique

Le Sénégal, bénéficiant d'une situation géographique exceptionnelle, est devenu un point stratégique, un carrefour maritime et aérien. Les aéroports du Sénégal connaissent beaucoup d'engorgements. La Direction du Transport Aérien (DTA) est dépassée par les demandes dans la mesure où les aéroports ne disposent pas de capacités assez suffisantes. Les conséquences sont graves aussi bien pour les compagnies aériennes que pour les passagers. L'agence des Aéroports du Sénégal (ADS), chargée de la régulation des flux, frets et passagers et l' ANACIM (Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie), chargée d'allouer le planning horaire de départs et d'arrivées des aéronefs, ne sont pas en mesure actuellement de produire des solutions exactes et satisfaisantes à même de respecter les charges admissibles, considérant uniquement une approximation de charge.

La saturation des éléments d'un aéroport a des conséquences non négligeables du point de vue sociologique et économique. Beaucoup de compagnies aériennes, ayant le droit de desservir lors des sommets mondiaux de l'Association International de Transport Aérien (IATA) et aux accords aériens, se voient retarder ou refuser l'accès à cause de l'indisponibilité d'utilisation des ces éléments. Pour faire face à ces problèmes, les coordonnateurs des aéroports doivent moderniser le système actuel, du premier arrivé-premier servi (FIFO), vers un système plus efficace d'attribution des créneaux d'atterrissages et de décollages dans les aéroports saturés. Pour chaque demande accepté lors des sommets de l'IATA, il est nécessaire de lui attribuer un intervalle de temps afin de mieux pallier la saturation des éléments de l'aéroport.

Un aéroport coordonné est un aéroport où, pour atterrir ou décoller, un transporteur aérien ou tout autre exploitant d'aéronef doit s'être vu

2. Aéroport où, pour atterrir ou décoller, un transporteur aérien ou tout autre exploitant d'aéronef doit s'être vu attribuer un créneau horaire par un coordonnateur, a l'exception des vols d'État, des atterrissages d'urgence et des vols humanitaires

attribuer un créneau horaire par un coordonnateur à une date et une heure précise. Une exception est faite aux vols d'État, des atterrissages d'urgence et des vols humanitaires.

Un créneau horaire d'aéroport est une autorisation d'utiliser les infrastructures d'un aéroport coordonné [14]. L'attribution des créneaux horaires aéroportuaires dépend de la configuration de l'aéroport plus particulièrement de sa capacité. Le manque de capacité aéroportuaire est lié à des contraintes économiques, environnementales et physiques. Il bloque les efforts inlassables des exploitants d'aéroports et/ou limite la croissance actuelle.

La capacité aéroportuaire est définie dans [12] comme le nombre de demandes qui peuvent être effectuées à l'heure de pointe par l'ensemble des installations aéroportuaires tout en respectant les normes de sécurité et les exigences de l'environnement. La capacité d'un aéroport est un facteur majeur pour le bon fonctionnement d'un aéroport et pour l'élaboration des créneaux. Les créneaux horaires constituent une ressource précieuse et convoitée par les compagnies aériennes puisque en cas de déséquilibre entre le trafic aérien prévu et la capacité disponible, les contrôleurs imposent généralement une réglementation, telles que le retard du départ d'un avion, la mise en attente dans les hippodromes, le changement de la route aérienne empruntée, la modification de la vitesse de l'appareil pendant le vol. Les contrôleurs sont chargés de résoudre ce problème quotidiennement. Les attentes sont imposées sur la base d'un concept d'équité mais sans faire distinction entre les compagnies aériennes. Le système actuel utilisé au Sénégal par les contrôleurs aériens est le FIFO (First In, First Out). Les contrôleurs attribuent le départ ou l'arrivée aux vols sur la base de la politique du premier venu premier servi.

La croissance du transport aérien devance toujours la capacité des aéroports selon la note de l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile (OACI) [56]. Comment allouer de façon optimale cette capacité aéroportuaire aux compagnies aériennes ayant un droit acquis à l'aéroport et les nouvelles entrant ?

L'attribution des créneaux d'aéroport est d'une importance accrue et dépend de la capacité du système aéroportuaire. C'est à l'exploitant d'assurer

la coordination. Comment optimiser ces créneaux aéroportuaires ?
Plusieurs mesures peuvent être prises par les contrôleurs pour respecter les créneaux attribués. Que faut-il faire pour accompagner les coordonnateurs à la gestion optimale de ces créneaux ?
La coordination entre les droits de trafic, la capacité du système aéroportuaire et les créneaux d'aéroport sont des questions entièrement différentes, mais qui se complètent. Les droits du trafic permettent aux transporteurs d'avoir un accès au marché, par contre la capacité du système aéroportuaire peut limiter la possibilité pour un aéroport de leur donner cet accès, et les créneaux sont établis et attribués pour faciliter l'accès des compagnies aériennes surtout dans les aéroports congestionnés. De ce fait, la gestion optimale des créneaux octroyés aux compagnies aériennes devient essentielle, mais cette allocation pose un problème du fait de l'insuffisance de la capacité aéroportuaire.

1.3 Objectifs

La mesure de la qualité de l'affectation de tous les vols sur l'aéroport s'effectue au moyen des critères dont certains sont à maximiser et d'autres à minimiser. Cette thèse vise à fournir des outils d'aide à la décision et éventuellement de proposer une méthode pour la gestion optimale des créneaux. Par conséquent, pour qu'un tel système puisse être utilisé réellement, de nombreux paramètres doivent être pris en compte tels que :

- Les compagnies ayant un droit acquis à l'aéroport ;
- Les compagnies voulant exercer une compétitivité ;
- La capacité de l'aéroport ; etc.

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer sur le plan méthodologique à l'amélioration des techniques de gestion du nouvel aéroport AIBD de Diass et de proposer des mécanismes d'attribution des créneaux afin que les objectifs généraux fixés par l'état du Sénégal soient atteints. Plus précisément, cette thèse vise les objectifs suivants :

- Analyser les modèles d'optimisation de la capacité du système aéroportuaire dans la littérature afin d'en identifier les limites ;
- Proposer de nouveaux modèles pour la gestion optimale de la capacité

opérationnelle des aéroports du Sénégal ;
- Évaluer le système actuel de fonctionnement entre le coordonnateur et les contrôleurs aériens ;
- Proposer un système de gestion de la capacité opérationnelle, en élaborant des créneaux horaires afin de mieux gérer la capacité existant à l'aéroport ;
- Proposer un mécanisme d'échange combinatoire de ces créneaux.

1.4 Etat de l'art

La Recherche opérationnelle regroupe des méthodes scientifiques utilisées pour la prise de bonnes décisions en rationalisant, en simulant ou encore en optimisant l'architecture et le fonctionnement des systèmes industriels et économiques [58]. Elle propose des modèles pour analyser des situations complexes et permet aux décideurs de faire des choix efficaces et robustes. Dans cette thèse, nous nous intéressons au problème de transport aérien qui est l'un des domaines les plus importants de la recherche opérationnelle.

Le transport aérien est caractérisé par sa rapidité, son niveau de sécurité, sa régularité et sa fiabilité. Avant de commencer à élaborer des modèles et à développer les méthodes de résolution, il est important de chercher dans la littérature ce qui existe comme travaux en rapport avec le problème traité dans cette thèse. Zagaye [19] en 2012 a défini l'aéroport comme un facteur clé pour le développement d'un pays plus particulièrement sa capacité. La capacité aéroportuaire est un facteur déterminant pour l'attribution des créneaux aux compagnies aériennes. La piste constitue en général l'élément limitatif de l'aéroport en raison de sa fonction particulière, permettant aux avions d'atterrir et de décoller en toute sécurité.

Ces dernières années, plusieurs travaux de recherche de référence ont été proposés pour essayer d'apporter des solutions aux problèmes relatifs à l'optimisation du trafic dans le domaine des transports aériens en général et en particulier aux problèmes d'attribution des créneaux d'aéroport et des capacités. Nous présentons les résultats des travaux apparentés à trois catégories à savoir :

- La capacité aéroportuaire ;

– L'attribution des créneaux primaires ;
– L'échange combinatoire des créneaux.

1.4.1 Travaux relatifs à la capacité aéroportuaire

Parmi les travaux relatifs à la capacité aéroportuaire, nous analysons quatorze (14) résultats de référence.

Dans cette catégorie, un premier modèle issu de la théorie des files d'attente, a été développé en 1975 par le STBA [3] Européen pour déterminer la cadence horaire dans le cas d'un aéroport mono-piste [9]. Il a considéré qu'il est possible d'évaluer la capacité d'un module où s'écoulent des flux lorsque la présentation de ces flux à l'entrée du module ou du système est aléatoire. Ce modèle est ensuite enrichi par de nombreux travaux comme ceux de Gilbo et al [40] en 1993.

En 2000, Nicola et al. [26] ont présenté des modélisations de la capacité horaire pour réguler en temps réel la charge des contrôleurs. Pesic et al. ont proposé en 2000 des modèles pour l'optimisation basés sur la théorie des graphes couplés avec l'algorithme génétique afin d'apporter une contribution au problème lié à la circulation au sol des aéronefs [52]. En 2000, Gilbo et al. [39] ont amélioré leur modèle en insérant la notion des capacités d'arrivées et des départs au niveau de la piste dans leurs travaux. En 2003, Gilbo [38] a proposé une méthode d'approximation et d'estimation de capacités. D'autres travaux similaires ont été proposés également. Nous pouvons citer les travaux de Guillumpiat [63] présentés en 2000 et ceux d'Idrissi et al.[42] présentés en 2005.

Allignol et al.[3], en 2011, ont proposé une méthode de planification des trajectoires de qutre dimension permettant de présenter au contrôleur un trafic qui lui permettra d'éviter à l'avance tout conflit. Il s'agit d'une allocation de niveaux de vol permettant la résolution des conflits en croisière puis une allocation d'heures de décollage permettant de résoudre les conflits restants. Gianazza et al.[5] ont suggeré en 2004 un modèle pour optimiser le flux du trafic aérien en proposant deux approches. La première consiste à adapter la demande de trafic à la capacité du système de contrôle aérien,

3. Service Technique des Bases Aériennes Européen, juillet 1975

allouée des créneaux d'atterrissages et de décollages. La deuxième approche consiste, à l'inverse, à modifier le système ou la façon de le gérer afin de traiter plus de trafic dans des conditions de sécurité identiques ou meilleures.

Olivier et al. [12] ont suggéré des modèles pour déterminer la capacité de la piste et celle de l'aérogare. En 2006, Marceline et al. [55] ont proposé une méthode issue de la théorie de files d'attente pour évaluer la capacité aéroportuaire. Alidou [2] a proposé en 2007, une méthode d'approximation et d'évaluation pour déterminer la capacité de l'aire des mouvements de l'aéroport de Dakar. En 2010, Jakou et al.[8] ont proposé un modèle issu de la théorie des files d'attente pour optimiser la gestion des opérations de la sûreté aéroportuaire.

En 2001, Yan et al.[67] ont traité le problème d'attribution des postes de stationnement en considérant sa nature multicritères. Pour ce faire, ils ont divisé ce problème en deux sous problèmes, d'une part le problème d'affectation dynamique, et d'autre part le problème d'ordonnancement. Il consiste à assigner à chaque avion à l'arrivée un poste ou une zone de stationnement compatible avec ses caractéristiques opérationnelles. Cette formulation multicritères en variables entières définie par Yan et al [67], a été résolue en deux étapes. Une pondération est utilisée pour transformer le problème multicritères en une suite de problème mono critère. Chacun de ces problèmes est résolu par une technique de génération de colonnes associée à une technique de «Branch and Bound».

En 2002, Yan et al. [68] ont formulé le problème de la gestion des postes de stationnement des avions, comme un programme linéaire en variables entières. Leur modèle consiste à trouver une affectation des postes qui minimise la distance totale parcourue par les passagers compte tenu de cette affectation. Ce problème a été résolu par une technique de type «Branch and Bound». La solution optimale a été comparée à ceux des résultats de différentes heuristiques élaborées par les opérateurs et a montré une nette supériorité en ce qui concerne les performances obtenues.

Différents auteurs se sont intéressés a évaluer la capacité de la piste à partir de données statistiques de ses activités. La capacité de la piste est le nombre de mouvements qui peuvent se produire sur la piste [4] dans une

4. La piste est la surface d'un aéroport réservée aux décollages et aux atterrissages.

période donnée.

Tous ces auteurs ont apporté des contributions aux problèmes d'allocation des capacités aéroportuaires. Toutefois, dans leurs modèles, ces auteurs considèrent uniquement la piste comme le facteur déterminant du système aéroportuaire. Or, d'autre facteurs liés intrinsèquement à la capacité aéroportuaire sont indispensables. Avec l'augmentation du trafic aérien, beaucoup d'auteurs pensent également qu'il est nécessaire de développer des modèles qui prenant en compte la capacité de la piste et la capacité du terminal passager. Enfin, d'autres auteurs pensent qu'il serait intéressant de proposer des modèles dynamiques capables d'intégrer les demandes non satisfaites d'une période donnée à la période suivante.

1.4.2 Travaux relatifs à l'attribution des créneaux

La modernisation du mécanisme d'attribution des créneaux est abordée dans différents travaux. Nous avons étudié les résultats de référence dans ce domaine à savoir les travaux de Kleit et al. [44] présentés en 1996, les travaux de la JFRPLC [5] [26] présentés en 2000 sur le thème «Allocation des créneaux pour la régulation du trafic aérien», les travaux de Maldoom [48] présentés en 2003 et ceux de Fukui [37] présenté en 2010.

Nous avons également exploré plusieurs autres travaux tels que les travaux de la CMT [6] [56] présentés en 2003 sur le thème "Défis et promesses de la libéralisation". Nous avons aussi analysé les travaux présentés en 2004 par la CEDECE5 [43] qui abordaient le thème "Congestion et créneaux aéroportuaires" et les rapports DotEcon Ltd [51] commandés en 2012 par le gouvernement britannique qui étudiaient la possibilité de mettre en oeuvre des mécanismes d'enchères suivant la pratique actuelle de certains aéroports des États-Unis.

Cependant, nous constatons que les travaux de références existant que nous avons exploré ne prennent pas en compte l'instant de début et l'instant final d'un créneau. Il est alors nécessaire de proposer des modèles d'affectation et des modèles d'ordonnancement qui prennent en compte l'instant

5. Journées Francophones de Programmation Logique et Programmation par Contraintes

6. conférence mondiale de transport

de début et l'instant final d'un créneau attribué. Ces modèles permettent de faciliter les coordonnateurs centraux pendant l'élaboration du planning horaire dans la gestion du trafic aérien.

1.4.3 Travaux relatifs à l'échange combinatoire des créneaux

En ce qui concerne le marché secondaire et l'échange combinatoire des créneaux, la formalisation d'un mécanisme de marché serait bénéfique pour l'ensemble de la gestion du trafic aérien. Par exemple, les rapports de DotEcon Ltd [51] en 2012, soulignent que cette formalisation est nécessaire pour faire face aux événements imprevus et aux nouvelles demandes qui surgissent après l'attribution à titre primaire, quand il peut être difficile d'identifier les acheteurs potentiels et vendeurs. Ces dernières années, beaucoup de travaux ont été effectués afin de proposer des modèles adéquats pour la résolution de tels problèmes. Du point de vue pratique, l'échange combinatoire des créneaux, peut réduire le nombre de retards et les vols annulés, en mettant en évidence la possibilité de négocier les créneaux précieux par des coûts. Il est alors nécessaire de proposer des modèls mathématiques qui optimisent ce mécanisme d'attribution de créneaux. De tels modèles permettront de minimiser les coûts de pénalités dus aux retards de certaines compagnies.

Dans la littérature, plusieurs formulations ont été proposées pour les échanges combinatoires telles que Sandholm et al.[62] en 2001. Ils ont encore amélioré leurs modèles en proposant des algorithmes [60] de résolutions en 2002. Biswas et al.[27] en 2004, Jain et al.[65]en 2004 aussi, Sandholm et al.[61] en 2006. Nous pouvons citer également les travaux présentés en 2003 par Maldoom et al.[48] sur la mise en vente des capacités des aéroports. La suggestion de Lorenzo et al.[29] en 2009. Ces derniers ont proposé un mécanisme pour la vente des créneaux secondaires dans le cas d'un aéroport mono-piste pour allouer ces créneaux.

Ces dernières années, d'autres auteurs ont proposés des modèles génériques pour la résolution des problèmes généraux dans le cadre de la gestion du trafic aérien. Nous pouvons citer les travaux de C. Diallo [4] présentés en 2013 portant sur une application en élasticité et au transport aérien.

Dans ses travaux, C. Diallo met l'accent sur la résolution d'un problème d'optimisation de structures. Enfin, nous pouvons citer les travaux de Nelio et al.[50][11] sur la localisation optimale d'un hub dans la zone UEMOA présentés en 2016.

1.5 Plan de la Thèse

La thèse est organisée en sept chapitres, le premier étant cette introduction. Ce chapitre situe le contexte général de notre étude et les objectifs à atteindre. Nous avons présenté dans ce chapitre l'état de l'art des travaux de référence qui existent sur les problèmes de transports aériens en général et en particulier sur les problèmes d'attributions de capacités et des créneaux. Le reste de la présente étude est répartie comme suit :

1. La partie I, comporte trois chapitres à savoir (2),(3) et (4).
   - Dans le chapitre (2), nous avons détaillé la configuration des aéroports du Sénégal dans la section (2.2), plus particulièrement de l'aéroport de Dakar et de l'aéroport international de Blaise Diagne de Diass. Nous avons également présenté les principaux rôles que joue l'ANACIM, l'ADS et l'ASCNA au sein des aéroports du Sénégal. Les différentes agences qui assurent le bon fonctionnement des aéroports du Sénégal. La section (2.3) présente les concepts généraux de la capacité d'un aéroport. Les droits du trafic aérien sont présentés dans la section(2.4). Nous avons fait la description des créneaux aéroportuaires dans la section(2.5) ;
   - Dans le chapitre (3), nous avons défini quelque notions fondamentales d'optimisation utilisés dans cette thèse. Il s'agit principalement de la notion de programmation linéaire en nombre entier présentée dans la section(3.2) et de la programmation dynamique dans la section(3.5). Des notions qui nous ont permis d'élaborer les modèles mathématiques developpés dans cette thèse. Quelques méthodes de résolutions comme l'algorithme de Branch and Bound et la méthode des coupes sont aussi présentées dans les sous sections.
   - Le chapitre (4) présente quelques modéles et résolution des problèmes d'attributions des capacités. Nous avons élaboré un modèle

d'optimisation de la capacité des sous-systèmes aéroportuaires dans la section (4.2). Plus particulèrement, nous avons modélisé la capacité des postes des stationnements par la programmation lineaire en nombre entier. La section (4.3) présente notre deuxième modèle d'attribution des capacités et un algorithme de résolution est présenté dans la section(4.4). Ce modèle a fait l'objet de notre premier publication([24]) en 2017 dans Journal of Mathematics Recherche(JMR). Nous avons testé notre modèle dans la section (4.5) en utilisant des données réelles extraites du diagramme des créneaux horaires de l'aéroport de Dakar.

2. La partie II, comporte deux chapitres (5) et (6) :
   - Dans le chapitre (5), nous avons decris les differentes fluctuations qui se trouvent sur l'élaboration des créneaux dans la section(5.2). Nous avons proposé deux modèles développés dans la section (5.3). Le premier modèle développé maximise les vols acceptés sur les périodes avec contraintes de capacité. Le deuxième modèle développé ordonnance les demandes confirmées par le premier modèle en attribuant un instant de début et un instant final. Ce modèle ne permet pas seulement d'ordonnancer les demandes, mais aussi de minimiser les ecarts entre les heures prévus et les debuts des créneaux attribués. Ces deux modèles ont fait l'objet de notre deuxième publication [23] en 2018. Pour chaque modèle, nous avons élaboré un algorithme dans la section (5.4) qui nous a servi d'implémenter et de tester nos modèles avec des donnée réelles de l'AIBD.
   - Nous finissons par le chapitre (6) qui est une conclusion générale. Celle-ci rappelle les principaux résultats trouvés et présente les perspectives de recherche.

Première partie

Facteurs influençant les créneaux horaires

CHAPITRE 2

CONFIGURATION DES AÉROPORTS DU SÉNÉGAL

Sommaire

2.1 Introduction 15
2.2 Description des aéroports du Sénégal 16
2.3 Capacité aéroportuaire 25
2.4 Droits de trafic 31
2.5 Description des créneaux horaires 31
2.6 Conclusion 36

2.1 Introduction

Nous distinguons plusieurs aéroports et aérodromes [1] au Sénégal. L'aéroport Intérnational de Diass ou Aéroport International Blaise Diagne (AIBD), remplace l'ancien Aéroport International Léopold-Sedar-Senghor (AILSS) ou ancien Aéroport International de Dakar. Il est utilisé pour les vols entre différents pays et son aérogare accueille les services de la douane. Dans ce

1. Une surface, destinée à être utilisée, (en totalité ou en partie), pour l'arrivée, le départ des aéronefs et pour leurs évolutions au sol, ils sont utilisés pour les activités de loisirs ou sportives et donc pour l'aviation légère.

chapitre, nous détaillons la configuration des aéroports du Sénégal plus particulièrement celui de l'AILSS et de l'AIBD et le mode de fonctionnement.

La capacité d'un aéroport et les droits du trafics sont des facteurs déterminants pour la mise en place de système d'attribution des créneaux aéroportuaires. Nous rappelons dans ce chapitre la description générale sur les créneaux et la capacité d'un aéroport.

2.2 Description des aéroports du Sénégal

Un aéroport est composé de deux organes à savoir :

1. L'aire des mouvements des avions, il s'agit d'une surface réservée aux mouvements des avions et les stationnements.
2. L'aérogare passager, c'est le bâtiment du processus administratif et technique qui rend possible un transfert (vente de billets, enregistrement des passagers et de leurs bagages, contrôles réglementaires de police, douane et sûreté...). Il permet également le transfert de personnes et de leurs bagages, d'un mode de transport terrestre vers un autre aérien et réciproquement.

2.2.1 Configuration de l'AILSS de Dakar

L'ancien aéroport International Léopold-Sédar-Senghor de Dakar est situé à proximité du village de Yoff, commune située au nord-ouest de la capitale Dakar (code AITA : DKR. code OACI : GOOY).

2.2.1.1. Configuration de l'aire des mouvements

L'aire de mouvement de l'aéroport de Dakar est composée de plusieurs maillons dont les principaux sont :

1. La piste, elle sert à la fois à l'atterrissage et au décollage. Nous distinguons deux pistes qui ne sont pas utilisables en même temps :
   - une grande piste qui mesure 3490 mètres ;
   - une petite piste qui mesure 1500 mètres.

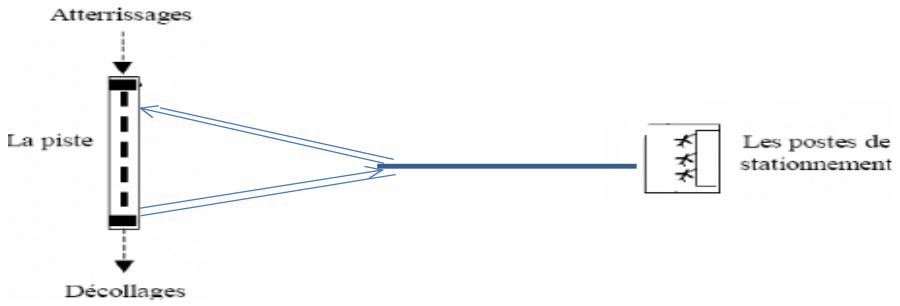


FIGURE 2.1 – Configuration de l'aire de mouvement de l'aéroport de Dakar

2. La grande piste a un seul bexcel d'accé, c'est-à-dire une seule voie qui la rélie avec le tarmac,

   comme l'indique la figure 2.1 et quatre autres taxiways qui la relient avec les aires de stationnement destinées aux avions, aux véhicules de services et de secours qu'on peut citer ci-dessous :
   - Taxiways Papa ; - Taxiways Tango ;
   - Taxiways Sierra ; - Taxiways Delta.

Selon la configuration de l'aéroport de Dakar, l'arrivée d'un avion nécessite un trajet qu'il doit effectuer entre la piste et le parking de stationnement. Un véhicule spécial (dit follow-me) peut venir précéder l'avion pour le guider jusqu'au tarmac.

- Les aires de stationnement sont les aires de la plate-forme aéroportuaire destinée à recevoir les avions pendant l'embarquement ou le débarquement des passagers, de la poste ou du fret, pendant le ravitaillement en carburant, le stationnement au repos et l'entretien. Nous distinguons deux parkings ou postes de stationnements à l'aéroport de Dakar :
  - Le parking civil de l'Aéroport de Dakar, qui s'étend sur une aire de 1000m de long et 140m de large, dispose de deux couloirs de stationnements : le premier couloir allant de $J_1 \rightarrow J_{14}$ et le second couloir allant de $G_{15} \rightarrow G_{29}$. Pour la bonne gestion du terminal, les contrôleurs dirigent les arrivées vers les couloirs en fonction des disponibilités et de la taille de l'avion.
  - Le parking militaire est réservé à l'armée de l'air.

La figure (2.2) ci-dessous est une vue aérienne de l'ancien aéroport interna-

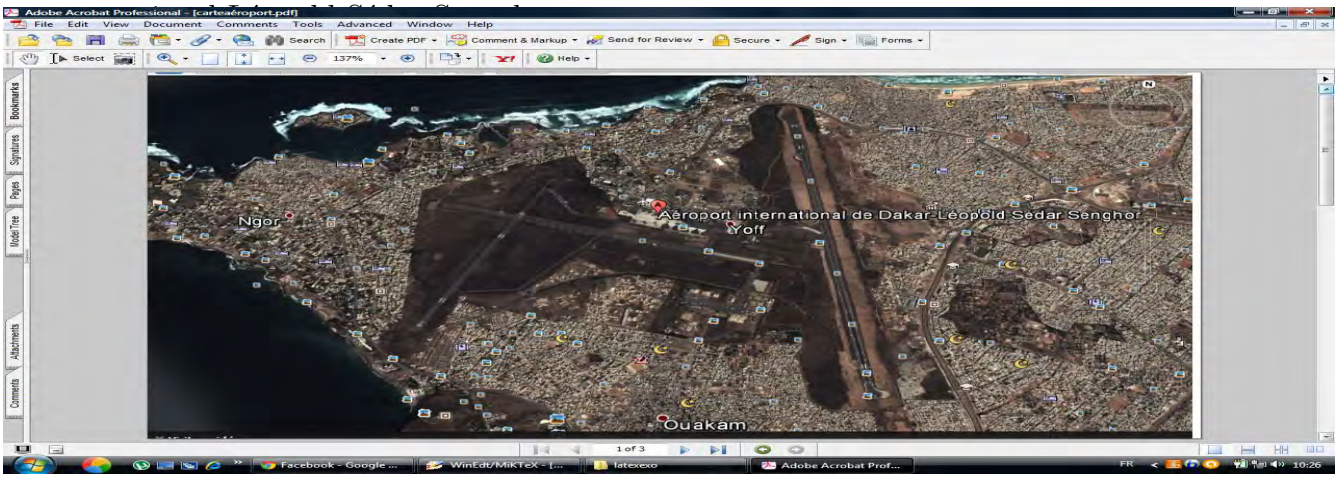


FIGURE 2.2 – Aéroport LSS de Dakar

2.2.1.2. Configuration de l'aérogare

La Convention de Chicago stipule que chaque État contractant adoptera des mesures pour que les passagers à l'arrivée ou au départ de vols de transport aérien commercial et leurs bagages de cabine soient soumis à une inspection/filtrage après le débarquement dans un aéronef d'une zone de sûreté à accès réglementé afin de lutter efficacement contre les actes illicites L'aérogare passager s'étend sur une superficie de 800ha, répartie en plusieurs

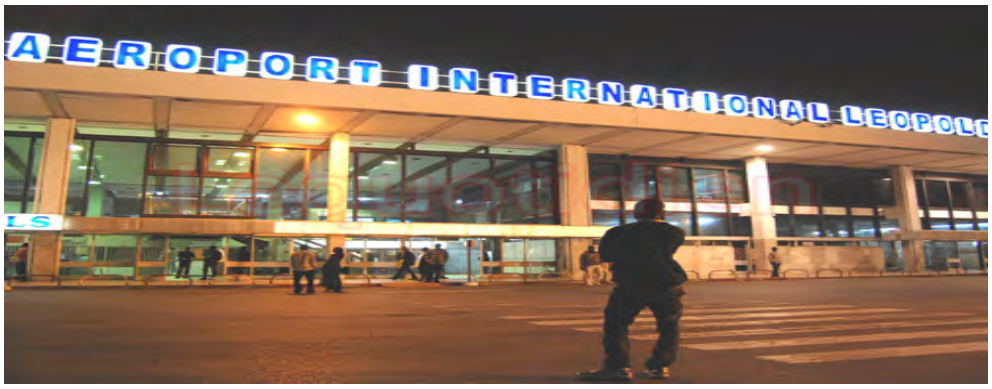


FIGURE 2.3 – Terminal passager de l'Aéroport LSS

salles indépendamment :

- la salle d'embarquement des passagers ;
- la salle d'arrivée des passagers ;
- la salle de VIP et salle de transit.

Chacune de ces salles génère des besoins spécifiques en zones et en espaces :

- Des zones de circulation des passagers et de leurs bagages ;
- Des filtres (administratifs ou techniques, pour le passager ou leurs bagages)
- Des espaces ou zones d'attente.

L'aéroport est composé par des modules et des passerelles qui transforment le flux d'avions en flux de passagers et de bagage et/ou des frets. L'aérogare traite quatre types de flux de passagers, de bagages et du fret :

- Le flux des arrivées des passagers et des bagages ;
- Le flux des départs des passagers et des bagages ;
- Le flux des passagers, des bagages et du fret en correspondance ;
- Le flux des arrivées et des départs du fret.

La limitation de la capacité d'utilisation de la piste principale, de même que la non fluidité de l'écoulement due à l'existence d'un seul Brexel d'accé constitue un frein au développement de l'actuel aéroport. Le trafic passagers et frêt estimé respectivement en 2020 à 3 000 000 et 54 000 tonnes du fait des nouvelles politiques touristiques et agricoles du gouvernement qui dépassent largement les capacités d'absorption de l'actuel aéroport (1 500 000 en terme de passagers) selon le site de la promotion des investissement du Sénégal [1]. Pour palier à tous ces manques, un nouveau aéroport est construit à 47 km de Dakar pour remplacer celui de Dakar.

2.2.2 Configuration de l'AIBD de Diass

L'Aéroport International Blaise Diagne de Diass s'étend sur une superficie de 2600ha. Il est considéré comme l'un des plus grands projets initiés par l'État du Sénégal. Cet aéroport a pour objectif d'être l'un des plus grands aéroports de l'Afrique de l'Ouest. Il est situé dans le village de Diass, à 47 km au Sud-Est de Dakar (code IATA : AIBD. code OACI : GOBD). La construction de ce nouveau aéroport remplace l'aéroport de Dakar et permet de répondre d'ici 2025 aux prévisions de trafics tout en garantissant ses possibilités d'extension.

2.2.2.1 Configuration de l'aire de mouvement

FIGURE 2.4 – Disposition de l'aire de mouvement de l'AIBD

1. La piste d'atterrissage et/ou de décollage qui est dimensionnée à 3500 m × 75m. Elle sert à la fois à l'atterrissage et au décollage toutefois, il existe une possibilité d'implanter deux pistes contrairement à l'aéroport de Dakar.
2. Sept voies de circulation qui se relient avec la piste d'envol, qui permettent d'optimiser l'utilisation de la piste. Elles lui donnent la possibilité d'enregistrer 80.000 mouvements d'avions par an contrairement à 30.000 mouvements d'avions de l'aéroport de Dakar.
3. Le parking avion ou les aires de stationnement pouvant accueillir près de 50 appareils contre 29 appareils pour l'aéroport de Dakar dont : 26 gros porteurs,6 petits et 18 avions de l'aviation générale.

Plusieurs catégories d'avions atterrissent à l'aéroport International Blaise Diagne. Nous pouvons citer entre autres :

- Boeing : B737-700,B737-800, B738,B737, B757, B772,B767 ;
- Airbus :A319, A320, A321, A330, A33, A340 ;
- MD87, DCBT, ATR, E90, EK340, CRG900.

2.2.2.2. Configuration de l'Aérogare passagers de Diass

L'aérogare de l'AIBD est muni d'une superficie de $42000m^2$ répartie en un niveau arrivée et un niveau départ comme le montre la figure 2.5 et dont

l'aménagement est constitué par :

FIGURE 2.5 – Aéroport International Blaise Diagne

- un pavillon présidentiel ;
- un espace pour les pèlerins ;
- une aérogare fret ;
- une centrale des utilités ;
- une station de lutte contre l'incendie ;
- un atelier de maintenance.

En terme de capacité, elle peut recevoir 3 000 000 passagers par an extensible par modules et 54.000 tonnes de volume de fret par an. Elle offre.

1. Les services offerts par l'aérogare passager sont les suivants :
   - le trafic passager et fret ;
   - des services commerciaux ;
   - un atelier de maintenance d'aéronefs ;
   - des complexes de stockage et de conservation de produits frais, catering, etc.
2. Un parking automobile pouvant accueillir prés de :
   - 700 voitures, 60 bus et 60 taxis.

2.2.3 Fonctionnement des aéroports du Sénégal

Le renforcement de la sécurité et de la sûreté en matière de transport aérien suppose la maîtrise de la météorologie qui est aussi un élément du

dispositif sécuritaire tant au niveau des plate-formes aéroportuaires qu'au niveau des itinéraires empruntés par les aéronefs [10].
Pour des raisons de cohérence, d'efficacité et d'optimisation des ressources financières, le Sénégal a fusionné l'Agence Nationale de l'Aviation Civile du Sénégal (ANACS) et l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAMS), par le décret 2011-1055 du 28 Juillet 2011 pour obtenir l'ANACIM (Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie).

2.2.3.1. Présentation de l'ANACIM

L'Aviation Civile Mondiale et l'Organisation Mondiale de la Météorologie aspirent, chaque jour à renforcer davantage la sécurité pour accompagner son développement. C'est la raison pour laquelle l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) a recommandé qu'un statut approprié soit conféré aux administrations nationales qui leur permettra d'assurer de manière adéquate leurs missions de supervision de la sécurité et de la sûreté de l'aviation civile. L'ANACIM est régi par deux organes à savoir :

- le Conseil de Surveillance ;
- la Direction Générale.

L'ANACIM assure entre autres missions la supervision de la sécurité par l'élaboration d'une réglementation technique de l'aviation civile conformément aux normes de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI).
Elle est composée de quatre directions qui sont :

- La Direction du Transport aérien (DTA) ;
- La Direction de la Navigation Aérienne (DNA) ;
- La Direction des Inspections Techniques (DIT) ;
- La Direction des Ressources Humaines (DRH).

Chaque direction est divisée en départements et services. La Direction du Transport Aérien se charge :

- d'établir les prévisions, à court, à moyen et à long terme, en matière de mouvements d'avions, de trafic de passagers et de trafic de fret ;
- d'élaborer les textes législatifs et réglementaires en matière de transport aérien en vertu des accords et conventions dont le Sénégal fait partie ;
- d'approuver les méthodes de préparation et d'exécution des vols.

Pour assurer ces missions de manière efficace, l'ANACIM collabore avec plusieurs autres agences telles que l'ASECNA et l'ADS.

2.2.3.2. Présentation de l'ASECNA

L'ASECNA est chargée de la réalisation et de la gestion des installations et services qui ont pour objet la transmission des messages techniques et de trafic, le guidage des aéronefs, le contrôle de la circulation aérienne, les informations en vol, la prévision et la transmission des informations dans le domaine météorologique aussi bien pour la circulation en route que pour l'approche et l'atterrissage sur les aérodromes communautaires.

C'est au niveau de la tour de contrôle qui ce dernier se positionne. La tour de contrôle est l'organe le plus visible de toute la chaîne dédiée au contrôle aérien. C'est à partir d'elle que les aiguilleurs du ciel opèrent pour guider les avions dans les phases du vol liées au survol de l'aéroport. Nous distinguons trois sortes de contrôle :

1. le contrôle en route géré par le CNRA (Centre Régional de la Navigation Aérienne), instructions pour les vols en route ;
2. le contrôle d'approche, instructions pour les phases finales d'approche et délivrance de l'autorisation d'atterrir, délivrance de l'autorisation de décollage ;
3. le contrôle d'aérodrome, instructions pour rejoindre le couloir aérien défini dans le plan de vol de l'avion.

Ils font atterrir les avions sur les pistes dans le sens contraire des vents dominants. Une manière de leur faire profiter des courants aériens qui vont faciliter le décollage et améliorer le freinage lors de l'atterrissage.

2.2.3.3. Présentation de l'ADS

L'agence des Aéroports du Sénégal (ADS) a été créée le 09 mai 2008 pour assurer la gestion technique et commerciale de l'ensemble des six aéroports du Sénégal. Ses missions sont entre autres :

- Promouvoir et développer les aérodromes au Sénégal ;
- Assurer l'exploitation et l'entretien des installations techniques et commerciales de l'ensemble des aéroports du Sénégal ;

– Assurer la facturation, la collecte, le recouvrement et la répartition des redevances aéroportuaires ;
– Réaliser toutes les études de faisabilité et de rentabilité des aéroports.

Ses objectifs sont entre autres :

– Maitriser les risques de sécurité, de sûreté et d'environnement. Développer les activités extra aéronautiques ;
– Optimiser le processus de traitement du passager, notamment en exploitant l'usage des nouvelles technologies (biométrie, portiques millimétriques) ;
– Améliorer l'accueil, l'écoute et la réactivité par rapport aux attentes des clients ;
– Développer les aéroports régionaux pour une politique de désenclavement.

2.2.4 Système général d'une plate-forme aéroportuaire

L'objectif principal d'un aéroport est d'assurer le transfert des passagers et de leurs bagages. Conformément à cet objectif principal, il est défini un certain nombre de fonctions destinées à permettre à l'aéroport de répondre efficacement aux exigences de ses principaux usagers que sont les passagers

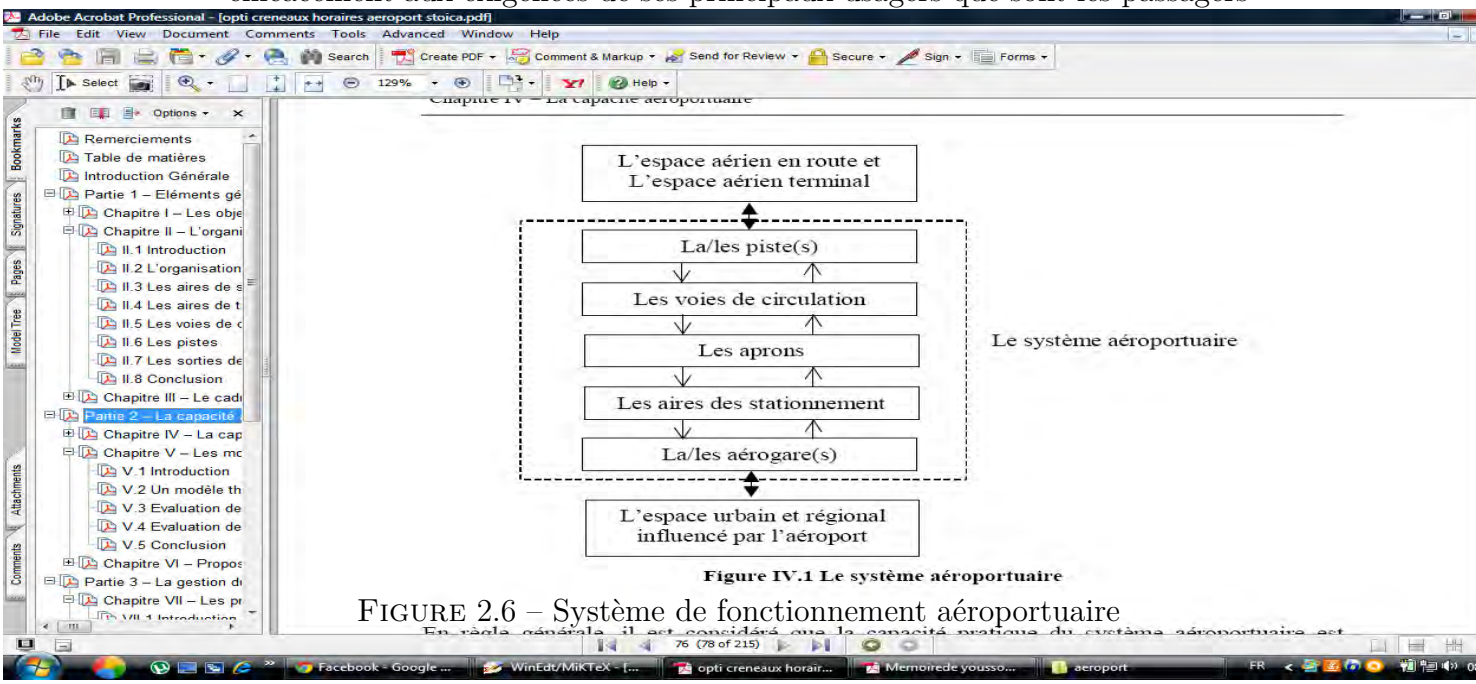


FIGURE 2.6 – Système de fonctionnement aéroportuaire

2.3 Capacité aéroportuaire

Les études de la capacité aéroportuaire ont pour objet d'évaluer les performances d'un aéroport, notamment par la détermination du débit maximal du trafic qu'il est en mesure d'écouler dans des conditions satisfaisantes pour les exploitants. La capacité aéroportuaire constitue un élément d'aide à la décision dans le cadre de la planification de l'infrastructure et dans celui de la coordination des aéroports.

En 2007, Isabelle et al. [64] ont défini la capacité aéroportuaire comme étant une limite. Mais si elle est dépassée, elle affectera la fluidité des opérations aéroportuaires et ne correspondra pas au niveau de qualité de service prédéfini selon les conformités et les normes de l'IATA. De manière générale, la capacité dépend du temps minimum nécessaire du traitement des éléments qui entrent dans l'un des ces sous-systèmes et la fréquence d'apparition, c'est-à-dire le nombre d'avions ou de passagers qui se présentent pendant une unité de temps. Nous distinguons dans ce cas plusieurs catégories de capacités tells que :

1. Capacité théorique qui, selon Zagaye [19] en 2012, représente la capacité idéale de l'aéroport. Elle est obtenue dans les situations où les avions sont positionnés à l'arrivée comme au départ de façon idéale sans qu'il ait perte de temps et aucun retard. Cette capacité est difficilement réalisable.
2. Capacité opérationnelle, c'est la capacité maximale réaliste en tenant compte des moyens disponibles au sein de l'aéroport et de la qualité de service à offrir aux passagers.
3. Capacité déclarée est la capacité fixée par les autorités aéroportuaires. Elle représente le débit d'aéronefs ou des passagers que l'aérogare est en mesure d'accepter toute l'année en prenant en compte l'ensemble des éléments de la chaine aéroportuaire ainsi que les contraintes extérieures et compte tenu d'un certain niveau de qualité de service.
4. Capacité programmée, c'est le nombre maximal des vols programmés par les compagnies aériennes sur une période donnée, choisie en concertation avec les gestionnaires, les compagnies aériennes, etc.
5. Capacité horaire d'un aéroport est le débit qui peut être écoulé par

l'ensemble des installations aéroportuaires (pistes, aérogares,..) pendant une heure au cours d'une année.

La différence entre la capacité de programmation et la capacité opérationnelle correspond à une marge de fonctionnement. Elle est relative aux incertitudes existant sur la demande. Cette marge est plus importante que la demande finale de trafic et dépasse la demande formulée lors de la programmation. La capacité, qu'elle soit théorique, opérationnelle ou de programmation, est le résultat global du fonctionnement de chaque sous-système impliqué dans la gestion du trafic.

Pour tout aéroport, nous distinguons deux catégories de flux. Le flux des avions et le flux des passagers. Les avions, par des passerelles transforment leurs contenus en flux des passagers et vice versa. À l'Aéroport International Blaise Diagne comme à l'aéroport de Dakar, la passerelle se fait via des bus ou/et apparaux.

L'organigramme de la figure (2.7) montre comment les flux d'avions se

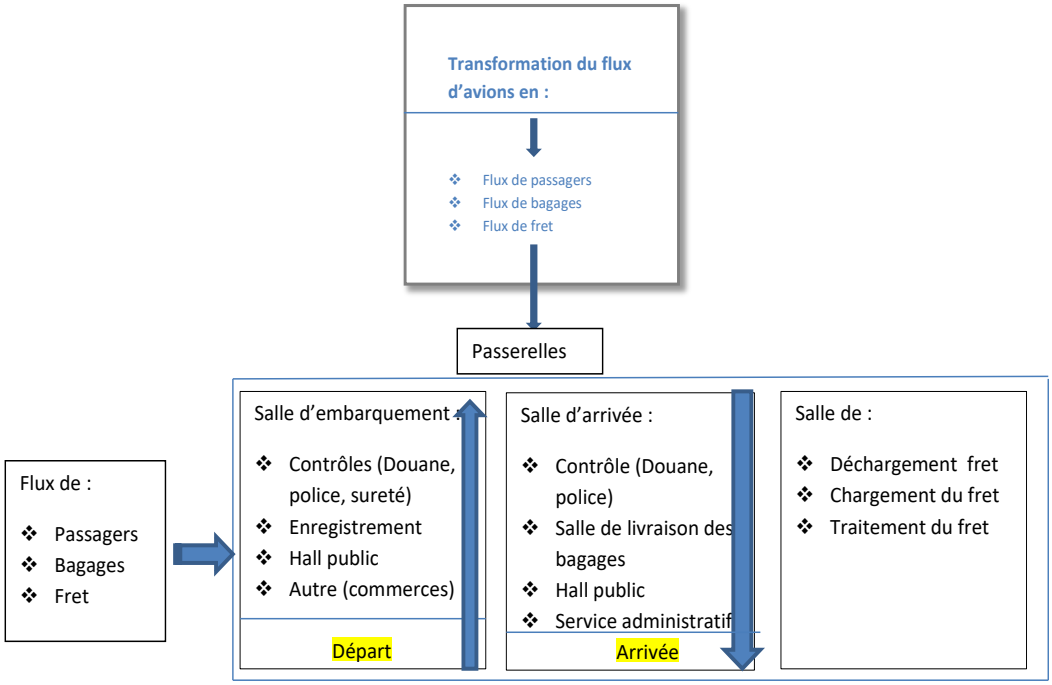


FIGURE 2.7 – Transformation des flux d'avions en flux de passagers

transforment en flux passagers. Nous pouvons dans ce cas décomposer la

capacité de l'aéroport en deux sous capacités :

1. La capacité de l'aire des mouvement, du coté des pistes et des voies de circulations ;
2. La capacité du terminal passager, du coté aérogare passager.

Chaque cotés du système est constitué par des maillons ayant chacun ses caractéristiques.

2.3.1 Capacité de l'aire des mouvements

La capacité de l'aire de mouvement est limitée par rapport aux demandes des compagnies aériennes et présente de vrais problèmes pour le réseau de transport aérien. Les mouvements sont classés en trois grandes catégories à savoir :

- arrivées d'un aéronef ;
- départs d'aéronef ;
- transferts d'un poste de stationnement à un autre.

La capacité de l'aire de mouvement est associée à un niveau de qualité et de service pour chaque sous-système qui le compose à savoir :

- la capacité de l'aire de la piste ;
- la capacité des voies de circulation ;
- la capacité des postes des stationnements.

Par définition, déterminer la capacité de l'aire des mouvements consiste à déterminer un équilibre entre arrivées et départs pendant un horizon de temps. Il existe plusieurs définitions de la notion de capacité de l'aire de mouvement qui dépendent du niveau de la zone aéroportuaire concernée.

Pour tout aéroport les opérations critiques se situent sur la piste [6], celle-ci devient le goulot d'étranglement de l'aire de mouvement. Optimiser l'aire de mouvement n'est rien d'autre qu'optimiser le mouvement des pistes d'envols, car elle représente la zone la plus limitative de l'aire de mouvement. Alors dans certains aéroport, la capacité de la piste est assimilée à celle de la capacité de l'aire de mouvement.

2.3.2 Capacité d'un terminal passager

Le fonctionnement du terminal passager constitue un système de files d'attente en interaction, il est donc un réseau de file d'attente comme le montre la figure 2.8. Pour plus de detail sur le formalisme des files d'at-

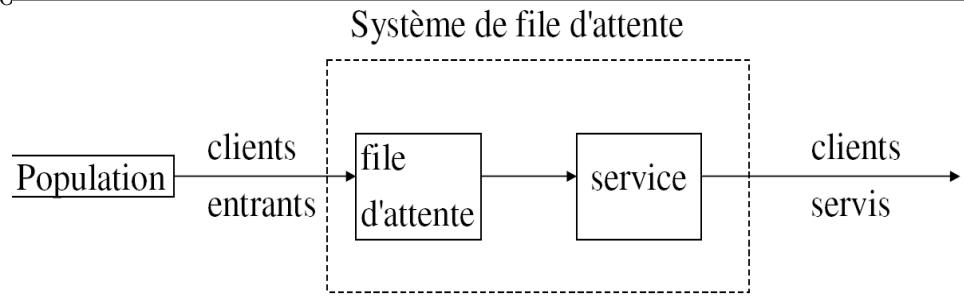


FIGURE 2.8 – Structure générale des files d'attentes

tentes et les réseaux de file d'attente, le lecteur peut consulter l'ouvrage de Robert [57], l'ouvrage de Hazlwood[20] mais aussi l'ouvrage de Rosignol [59], [7] et l'article de Banege [25]. La capacité d'une file d'attente est la longueur maximale en terme d'espace disponible. Théoriquement, dans le cas d'une population infinie, la file d'attente peut devenir indéfiniment longue et l'espace disponible peut être insuffisant pour accueillir tous les clients. Par exemple, dans un terminal aéroportuaire, l'espace disponible de la salle d'arrivée des passagers est limité. Le nombre de passagers qui peuvent attendre dans la salle d'arrivée pendant un intervalle de temps donnée avec satisfaction(sans perturbation) définissent la capacité maximal de la file.
Par contre, dans le cas des voitures qui se présentent dans une station d'essence, la longueur de la file correspond à toute l'autoroute. On peut toujours déterminer la longueur de la file d'attente qui ne sera pas dépassée pour un certain pourcentage de temps spécifié.

Le Sénégal est la première destination touristique en Afrique noire francophone, selon un rapport de l'O.M.T [2]. Le taux d'accroissement des passagers ne cessent de croître c'est pourquoi les aéroports deviennent de plus en plus saturés. L'objectif de l'État est d'atteindre trois millions de touristes en 2023. L'aérogare passager est construit à deux niveaux (niveau arrivé, niveau départ) comme le montre la la figure 2.9 ci-dessous. et chaque niveau

2. Organisation Mondiale du Tourisme

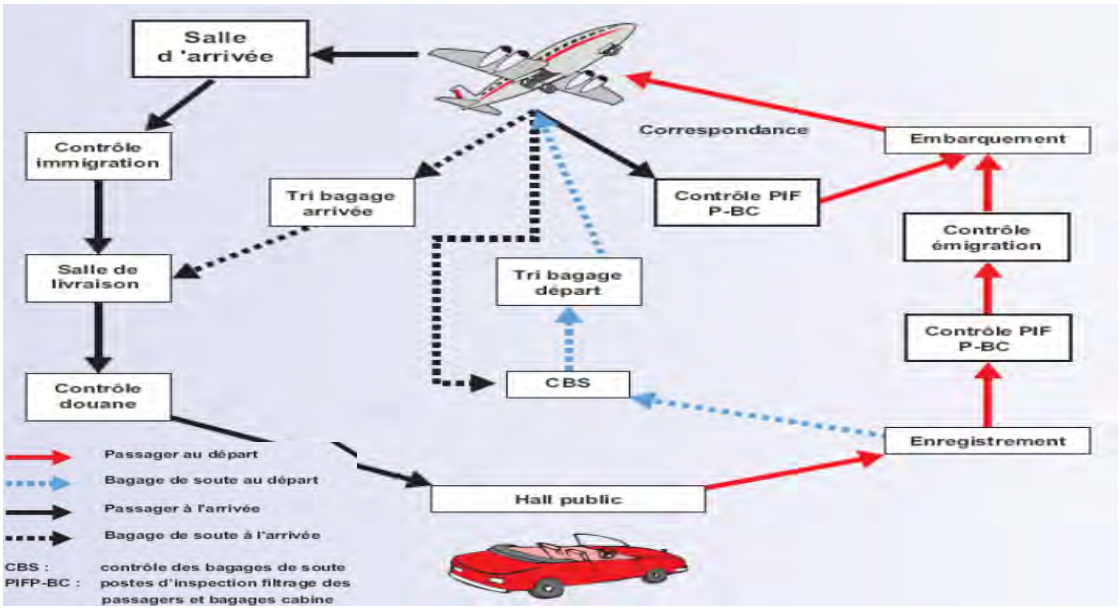


FIGURE 2.9 – Itinéraire du passager International, arrivée et depart

constitue une entité où un service est rendu. Le niveau arrivé est composé de :

- Salle d'arrivée ;
- Salle de livraison ;
- Hall publique ;

Le niveau départ est composé de :

- salle d'enregistrement ;
- salle d'embarquement ;

Définition 2.3.1. La capacité du terminal passager est le nombre de passagers que l'aérogare peut écouler avec une qualité de service selon les ratios des surfaces [63] proposé par l'IATA pour le traitement des passagers dans une unité de temps donnée.

Il est nécessaire de tenir compte des ces mesures de performance afin d'assurer une qualité de service optimale au passagers. C'est à partir de ces dernières et au cours de cette étude que pourront être déterminer, le flux de passager que peut traiter l'infrastructure et les zones bloquant la circulation des passagers dans l'aérogare.

Du coté de l'aérogare, elle est composée par :

– Capacité de la salle d'arrivée : Nombre de passager traitable à l'arrivée,
– Capacité de la salle d'embarquement : Nombre de passager traitable au départ,
– Capacité de la salle de VIP.

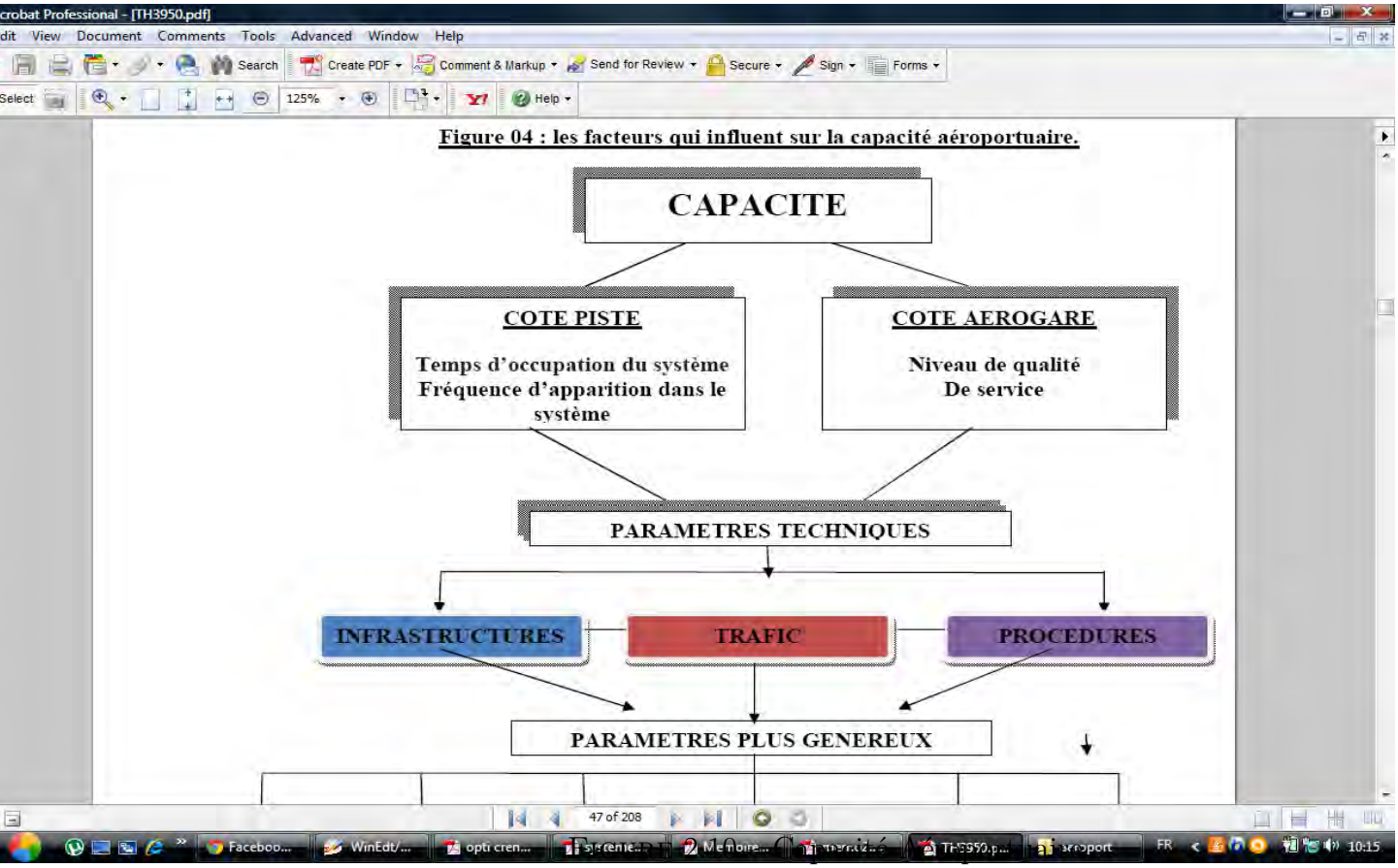
Chaque sous-capacité dépend principalement de deux critères du niveau de qualité de service :

le temps d'attente ou traitement des passagers/bagages aux différents points de passage ;

l'espace disponible par passager dans les zones d'attente et de circulation ;

La congestion d'un terminal passager se situe au niveau de l'arrivée. Déterminer la capacité du terminal passager revient à déterminer le nombre de passagers traitable au niveau d'arrivée pour une unité de temps.

2.3.3 Relation entre les sous-capacités d'un aéroport



- Infrastructure nous pouvons citer :
  - pour la piste : nombre, configuration et état des éléments, pistes, sorties, voies de circulation, aires de stationnement ;
  - pour l'aérogare nous pouvons citer : les surfaces des zones d'attente et de circulation ou bien les distances à parcourir ;
- Trafic : nature, mélange entre les catégories d'avions, mélanges entre arrivées et départs, les types des passagers, etc.
- Procédures : elles concernent les éléments qui induisent un espacement temporel ou spatial des avions (les procédures de traitement des passagers et des bagages.

Tous ces paramètres interagissent entre eux et dépendent des paramètres plus généraux à savoir : la météo, les facteurs humains, l'environnement, la nature de l'offre des transports des compagnies aériennes afin de déterminer la capacité de l'aéroport. Sur ceux, on distingue plusieurs sous-capacité dans un aéroport.

2.4 Droits de trafic

Les droits de trafic sont des droits commerciaux définis historiquement dans le cadre d'accords bilatéraux sur le service aérien entre deux États. Ces accords qui doivent être ratifiés par les parlements et sont déclinés par les administrations de l'aviation civile, définissent entre autres les fréquences de vols, les points de dessertes et d'escales, les possibilités de partages de codes. C'est la Convention de Chicago, signée en 1944 [[10],[14]], qui a établi ce cadre de relations définies d'État à État. Elles peuvent également évaluer, y compris du point de vue environnemental, certains concepts innovants, modifiant les règles d'exploitation. Ce débit est habituellement exprimé en nombre de mouvements d'avions ou de passagers par unité de temps.

2.5 Description des créneaux horaires

Un créneau horaire est défini lors du colloque de la Commission pour l'étude des Communautés Européennes [47] comme :

Définition 2.5.1. une autorisation d'utiliser les infrastructures aéroportuaires d'un aéroport coordonné à une date et une heure précises, selon l'attribution faite par le coordonnateur.

Les créneaux horaires sont attribués par un coordinateur qui les répartissent entre les compagnies. Il surveille aussi leur utilisation et sanctionne les compagnies qui intentionnellement ne respectent pas leurs horaires.

2.5.1 Objectif des créneaux

L'objectif de la réglementation et de la coordination est de pouvoir attribuer des créneaux dans des aéroports saturés. Il s'agit de trouver le bon équilibre entre les intérêts des transporteurs aériens en place, qui cherchent à s'agrandir sur l'aéroport où ils se sont installés, et les nouveaux arrivants qui veulent étendre leurs services et établir un réseau compétitif. L'allocation des créneaux aux compagnies contribue à la gestion optimale de l'aéroport. La conférence de coordination des horaires organisée par l'association international des transporteurs aériens, celle ci se tient deux fois par an, en novembre pour la saison été et en juin pour la saison d'hiver, elle est ouverte aux coordinateurs et à toutes les compagnies, qu'elles soient ou non membres de l'IATA. L'attribution des créneaux horaires suit le guide [10] de l'IATA (Wordwide Scheduling Guidelines) de 1972 qui fixe les procédures recommandées et les règles de priorité pour les attributions de créneaux. Il donne les procédures de travail et les différentes dates limites du processus de coordination.
La plupart des aéroports fonctionnent sur un principe First In First Out (FIFO). Par contre, d'autres aéroports saturés utilisent le système d'élaboration des créneaux ; un système qui permet d'allouer les sous-systèmes de l'aéroport à l'avance, tout en respectant les normes de sécurité et les exigences de l'environnement afin d'éviter les retards ou du moins de les plafonner à des niveaux acceptables.
L'élaboration des planning créneaux pour toute demande comporte plusieurs étapes dont les deux principales sont :

1. La détermination de la capacité à allouer ; c'est-à-dire le sous-système sur l'aire de mouvement ou sur le terminal passager à allouer à un

transporteur aérien ;

2. L'allocation proprement dite, c'est-à-dire l'attribution d'un intervalle de temps qu'il peut ajourné sur ce sous-système.

La première étape est bien transparente, c'est-à-dire le sous-système à allouer (piste, poste de stationnement, etc) au niveau de l'aire de mouvement ou (salle de bagage, fret etc). La seconde étape par contre fait l'objet de nombreuses réflexions et propositions d'optimisation, car l'attribution doit être associée à un niveau de qualité et de service, dont certains sont à minimiser et d'autres sont à maximiser pour chaque sous-système.

2.5.2 Règles d'attribution des créneaux

L'allocation des créneaux suit des règles de priorité. Les créneaux horaires historiques, c'est-à-dire les créneaux utilisés à 80% au moins par la compagnie de la période pour laquelle ils ont été attribués, lui sont affectés en priorité si elle les redemande. Ils peuvent être programmés à un horaire différent de l'horaire exploité la saison équivalente précédente. Le mécanisme actuel d'attribution des créneaux horaires se compose en trois étapes à savoir :

- la répartition primaires des créneaux ;
- l'attribution secondaire des créneaux ;
- l'échange combinatoire des créneaux.

2.5.2.1. Mécanisme d'attribution des créneaux primaires

La répartition primaire des créneaux se déroule six mois avant la mise en application, soit la saison d'été ou d'hiver. Les représentants des compagnies aériennes et les aéroports répondent à une conférence dont le but est de discuter sur les fréquences(créneaux) aéroportuaires pour la saison à venir selon la procédure suivante[32]. Les créneaux sont d'abord attribués selon les droits acquis «droit du grand père» d'une compagnie aérienne à garder un créneau de la saison précédente si et seulement si un tel emplacement a été utilisé au moins 80%[10] du temps. Ces droits acquis subsistent jusqu'à ce qu'une compagnie aérienne cesse d'utiliser ce créneau ou de le rendre au coordinateur du comité des horaires. Ensuite, les créneaux non acquis

sont répartis par le coordinateur du comité selon des priorités conformes aux directives de l'IATA de manière non discriminatoire. Autrement dit, la nationalité de la compagnie aérienne ne joue aucun rôle dans la décision du coordinateur lorsqu'il attribue un créneau. Les créneaux ainsi répartis deviennent acquis une fois utilisés. C'est l'attribution primaire des créneaux. Le système, pourtant, est vulnérable quand les aéroports sont congestionnés au point qu'ils sont pratiquement complets.

2.5.2.2. Mécanisme d'attribution secondaire

Le marché secondaire se produit après l'attribution à titre primaire [32] d'un transporteur aérien. Les compagnies sont autorisées à échanger les créneaux avec des concurrents à travers les transactions bilatérales, à finaliser l'autorisation avec les coordonnateurs des créneaux aéroportuaires. Les créneaux attribués à une compagnie aérienne, créneau acquis ou nouvellement disponible, peuvent être échangés contre les créneaux d'une autre compagnie aérienne. Le coordinateur peut faciliter ces échanges en mettant en contact les compagnies disposées. Il s'agit d'un mécanisme secondaire de créneaux. Ce mécanisme de marché secondaire des créneaux peut être efficace ou nécessaire pour allouer les ressources de l'aéroport, car les programmes des compagnies aériennes changent de temps à autre sans oublier les retards aléatoires c'est pourquoi, leur faut des créneaux correspondants aux aéroports du monde entier pour bien organiser le programme de vols.

Le mécanisme de marché secondaire suppose que chaque compagnie aérienne peut gérer plusieurs vols, peut avoir des droits acquis à l'aéroports et elle aimerait avoir une heure de départ et d'arrivée idéale pour chacun de ses vols. Lorsque l'heure idéal n'est pas disponible, la compagnie aérienne doit changer l'horaire des vols vers l'avant ou vers l'arrière, encourir un coût indésirable pour des raisons commerciales et opérationnelles. Ce mécanisme est distribué en tant qu'une politique basée sur les coûts indésirables des vols encourus par la compagnie aérienne.

L'attribution primaire et le marché secondaire des créneaux sont deux étapes importantes majeures pour les compagnies aériennes opérant dans les aéroports très encombrés. Les revenus de compagnies aériennes sont fortement influencés par les passagers d'affaires dont la demande est très inélas-

tique aux variations de prix, alors qu'il est très sensible aux modifications. Ainsi, l'heure de départ et d'arrivée est un facteur clé pour déterminer les revenus des compagnies aériennes.

2.5.2.3. Mécanisme d'échange combinatoire

Un échange combinatoire est un mécanisme de marché où les concurrents peuvent négocier entre eux les créneaux en temps réel [49]. Cette négociation sera finalisé par les autorités de l'aéroport. Les compagnies aériennes peuvent utiliser des négociations avec leurs concurrents en cas de retard. Ce système utilise la distribution des créneaux à titre primaire ou à titre secondaire, c'est-à-dire il faut avoir un droit acquis pour pouvoir entrer dans des négociations. Le mécanisme d'échange combinatoire de créneaux par des négociations en temps réelle nécessite une incitation financière et pourrait donner plus de souplesse à ce système. Les compagnies aériennes doivent tirer un bénéfice non négatif de la participation, alors que l'objectif des coordonnateurs est de faciliter l'exécution du mécanisme sans collecter ni injecter de l'argent.

2.5.3 Facteurs d'attribution des créneaux

Les fréquences d'apparition dans les systèmes aéroportuaires sont les facteurs sur lesquels le planificateur d'un aéroport cordonné peut agir en élaborant les diagrammes des créneaux, dans la limite des regèles de sécurité.

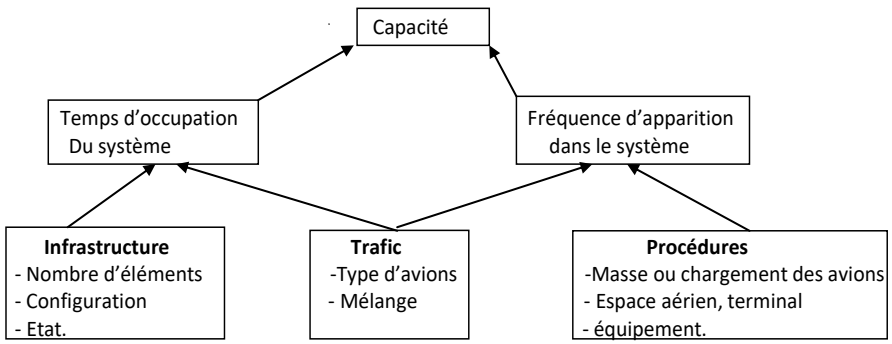


FIGURE 2.11 – Facteur de premier ordre de planification

2.6 Conclusion

Plusieurs aéroports et aérodromes se trouvent au Sénégal, mais seul l'Aéroport International Blaise Diagne de Diass qui remplace l'aéroport de Dakar, accueil les vols des différents pays. L'ANACIM se charge de la certification, de l'élaboration de planning des vols. L'organisation et le bon fonctionnement de l'aéroport est assuré par l'ADS et par des sociétés privées. Par contre, la sécurité de la navigation est assurée par l'ASECNA.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts généraux du système aéroportuaire et une description de la configuration des aéroports du Sénégal plus particulièrement de l'aéroport de Dakar et celui de l'Aéroport International Blaise Diagne. Nous avons présenté aussi une description du problème des créneaux et les règles d'attribution. L'heure de départ et d'arrivée d'un avion dans les plate-formes aéroportuaires est un facteur clé pour déterminer les revenus des compagnies aériennes, d'où l'importance et l'utilité des créneaux, tant pour les compagnies que pour l'aéroport. Les créneaux sont établis dans les aéroports coordonnés afin de pallier aux problèmes de saturation.

CHAPITRE 3

NOTIONS GÉNÉRALES D'OPTIMISATION

Sommaire

3.1 Introduction 37
3.2 Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE) 38
3.3 Modélisation d'un PLNE 39
3.4 Méthode de résolution 40
3.5 Programmation Dynamique (PD) 44
3.6 Conclusion 47

3.1 Introduction

La recherche opérationnelle est une méthode d'analyse scientifique d'un problème. Cette méthodologie est une mélange d'analyse et de méthodes mathématique réunies pour aider un décideur à prendre une décision. Elle consiste à recevoir un maximum d'information sur le problème afin de proposer des solutions mais surtout pas de décider laquelle est la meilleure. La solution choisie dépend surtout des intérêts du décideur.

Dans ce chapitre, nous rappelons quelques notions générales sur les modèles d'optimisation utilisées dans cette thèse et quelques méthodes de résolutions. Il s'agit plus précisément des notions de la programmation linéaire en nombres entiers, de quelques éléments sur la programmation dynamique.

Une revue de littérature dans chaque section ou dans chaque modèle est définie. Pour les méthodes de résolutions, nous parlerons de l'algorithme de Branch & Bound et les méthodes de coupes.

3.2 Programmation Linéaire en Nombre Entier (PLNE)

3.2.1 Programmation linéaire

Un problème d'optimisation linéaire est un problème d'optimisation où la fonction objectif et les contraintes sont linéaires. Il peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \min Z &= c.x \\ \textit{Sous contraintes} & \\ Ax &\geq b \\ x &\geq 0 \end{aligned}$$

ou de la forme :

$$\begin{aligned} \max Z &= c.x && (3.1) \\ \textit{Sous contraintes} & \\ Ax &\leq b && (3.2) \\ x &\geq 0 && (3.3) \end{aligned}$$

où A est une matrice $n \times m$ à coefficients réels, $b \in \mathbb{R}^m$, $c \in \mathbb{R}^n$ et $x \in \mathbb{R}^n$ Cette forme est appelée forme canonique.

La méthode du simplexe, ou algorithme de simplexe est une méthode développée par G. Dantzig en 1947. Elle reste jusqu'à présent l'algorithme connu le plus performant pour les tailles classiques. Le lecteur intéressé par cette notion peut consulter les ouvrages [15] [16][31].

Parmi les problèmes d'optimisation classique, nous pouvons citer le problème de couverture ou «the set covering problem» [21] [28] qui consiste à déterminer un couplage de valeur maximale. Nous pouvons citer aussi le problème de plus court chemin[34] [36]dans un graphe qui, étant donné un

graphe et une valuation sur les arcs du graphe, consiste à trouver le chemin qui minimise la somme des valuations des arcs reliant deux sommets du graphe. Le problème de voyageur de commerce [31][43], parmi les plus connus, consiste à trouver, dans un graphe, un cycle Hamiltonien dont le coût est minimal.

3.2.2 Programmation linéaire en nombres entiers

La programmation linéaire en nombres entiers(PLNE) étudie des programmes linéaires dans lesquels les variables sont astreintes à être entières. En particulier, les variables peuvent être booléennes, c'est-à-dire ne prendre que les valeurs 0 ou 1. La contrainte d'intégrité sur la variable est nécessaire pour modéliser certains problèmes tels les créneaux étudiées dans cette thèse, en particulier des problèmes algorithmiques. Cette contrainte complémentaire rend le problème plus complexe et demande des techniques particulières.
Elle est un domaine très riche de la programmation mathématique. Les recherches dans ce domaine sont nombreuses et ont vraiment commencé avec GOMORY en 1958. Pour plus de détails sur la PLNE, le lecteur intéressé peut consulter les ouvrages [30][35].

3.3 Modélisation d'un PLNE

Considérons la forme matricielle d'un programmation linéaire (3.1). Si on introduit de nouvelles contraintes (appelées contraintes d'intégrité), nous obtenons la formulation de la programmation linéaire en nombres entiers.

$$\begin{aligned} \min Z(x) &= c.x \\ \textit{Sous contraintes} & \\ Ax &\geq b \\ x &\geq 0 \quad x \quad \textit{entiers} \end{aligned}$$

où $x = (x_1, x_2, ..., x_n)$.

Lorsque les variables sont astreintes à prendre que les valeurs 0 ou 1, on parle de programmation linéaire en 0-1 ou programme binaire.

3.4 Méthode de résolution

Pour résoudre un PLNE, une des premières idées que l'on pourrait avoir serait d'abord de résoudre le PL continu, puis de prendre la valeur entière la plus proche, un arrondi de la solution optimale non entière que l'on aurait trouvé. Malheureusement, cette méthode est complètement fausse. Il existe des méthodes des résolutions propres et de nombreux solveurs aux PLNE. Par exemple, quelques solveurs commerciales, on peut citer, Cplex, Xpress ou Gurobi et des solveurs libres : Glpk ou Scip. Dans cette thèse, nous ne présentons que les méthodes de recherches arborescentes par séparation et évaluation. Ces méthodes utilisent le logiciel Cplex que nous avons utilisé pour nos simulations. Le lecteur intéressé par ces différentes méthodes peut consulter [17][13].

3.4.1 Méthode de séparation et évaluation (Branch and Bound)

L'algorithme de séparation et évaluation, plus connu sous son appellation anglaise *Branch and Bound* (B & B) [45],[33] repose sur une méthode arborescente de recherche d'une solution optimale par séparations et évaluations, en représentant les états solutions par un arbre d'états, avec des nœuds, et des feuilles.
Le *branch-and-bound* est basé sur trois axes principaux :

- L'évaluation ;
- La séparation,
- la stratégie de parcours.

L'évaluation permet de réduire l'espace de recherche en éliminant quelques sous-ensembles qui ne contiennent pas la solution optimale. L'objectif est d'essayer d'évaluer l'intérêt de l'exploration d'un sous-ensemble de l'arborescence. Le *branch-and-bound* utilise une élimination de branches dans l'arborescence de recherche de la manière suivante : la recherche d'une solution

de coût minimal consiste à mémoriser la solution du plus bas coût rencontré pendant l'exploration, et à comparer le coût de chaque nœud parcouru à celui de la meilleure solution. Si le coût du nœud considéré est supérieur au meilleur coût, on arrête l'exploration de la branche et toutes les solutions de cette branche seront nécessairement de coût plus élevé que la meilleure solution déjà trouvée.

La séparation consiste à diviser le problème en sous-problèmes. Ainsi, en résolvant tous les sous-problèmes et en gardant la meilleure solution trouvée, on est assuré d'avoir résolu le problème initial. Cela revient à construire un arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de noeuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptible de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des noeuds actifs.

La stratégie de parcours peut s'effectuer de 3 manières différentes :

- **La largeur d'abord** : Cette stratégie favorise les sommets les plus proches de la racine en faisant moins de séparations du problème initial. Elle est moins efficace que les deux autres stratégies présentées.
- **La profondeur d'abord** : Cette stratégie avantage les sommets les plus éloignés de la racine (de profondeur la plus élevée) en appliquant plus de séparations au problème initial. Cette voie mène rapidement à une solution optimale en économisant la mémoire.
- **Le meilleur d'abord** : Cette stratégie consiste à explorer des sous-problèmes possédant la meilleure borne. Elle permet aussi d'éviter l'exploration de tous les sous-problèmes qui possèdent une mauvaise évaluation par rapport à la valeur optimale.

La méthode de *Branch and Bound* permet de résoudre le problème de localisation de façon optimale. Toutefois, elle n'est efficace que pour les problèmes de petites tailles (problèmes avec au plus 50 noeuds)[15].

3.4.2 Méthodes de coupes de Gomory

La méthode de Gomory permet de générer des coupes garantissant la convergence en temps fini de l'algorithme. Nous resolvons en variables continues le problème linéaire (PL) à coefficients entiers.

Principe de la méthode

Introduire de nouvelles contraintes linéaires au problème pour réduire le domaine réalisable du problème relaxé. Ceci sans pour autant éliminer les points du domaine réalisable du problème avec les contraintes de nombre entier sur les variables.

La procédure consiste à résoudre une suite de problèmes relaxés jusqu'à ce qu'une solution optimale en nombres entiers soit obtenue.

La suite du problème précédent est obtenu en lui ajoutant une contrainte linéaire (coupe) supplémentaire.

Considérons le problème de programmation linéaire en nombres entiers suivant :

$$
\begin{aligned}
(P) \qquad & \min \sum_{j=1}^{n} c_j.x_j \\
\textit{Sous contraintes} & \\
\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \quad & = b_j \quad i = 1, ..., m \\
x_j \quad & \geq \quad 0 \quad \textit{entier}, (j \quad = 1, 2, ..., n).
\end{aligned}
$$

Voyons comment construire une coupe de Gomory. Soit B une base optimale de $(\bar{P})$, et la variable de base dans la $i^{ème}$ ligne du tableau optimal prenant une valeur qui n'est pas entière. Le tableau optimal est de la forme : La

TABLE 3.1 – Forme du tableau optimal

V. Base	x_1	x_2	...	x_k	x_{j_1}	x_j	x_{j_m}	...	x_n	-z	terme droite
x_{j_1}	t_{11}	t_{12}	...	0	1	t_{1j}	0		t_{1n}	0	$\bar{b_1}$
$\vdots$	$\vdots$							$\vdots$			$\vdots$
x_k	t_{i1}	t_{i2}		1	0	t_{ij}	0		t_{in}	0	$\bar{b_i}$
$\vdots$	$\vdots$						0	$\vdots$			
x_{j_m}	t_{m1}	t_{m2}		0	0	t_{mj}	1		t_{mn}	0	$\bar{b_m}$
-z	$\bar{c_1}$	$\bar{c_2}$		0	0	$\bar{c_j}$	0		$\bar{c_n}$	1	$-\bar{z}$

ligne correspondante du tableau optimal est de la forme :

$$x_k + \sum_{j \in J} t_{ij} x_j = \bar{b_i} \tag{3.4}$$

où $J = \{j \in J \textit{ est l'indice de la variable hors base}\}$ et $\bar{b_i}$ n'est pas un entier. Dénotons $\lfloor d \rfloor$ le plus grand entier $\leq d$. Puisque $x_j \geq 0$, $\forall j$ alors

$$\sum_{j \in J} \lfloor t_{ij} \rfloor x_j \leq \sum_{j \in J} t_{ij} x_j$$

et par conséquent nous avons :

$$x_k + \sum_{j \in J} \lfloor t_{ij} \rfloor x_j \leq x_k + \sum_{j \in J} t_{ij} x_j = \bar{b_i} \tag{3.5}$$

Si nous considérons la contrainte d'intégrité de variable x_j, il découle de l'équation (3.5) que

$$x_k + \sum_{j \in J} \lfloor t_{ij} \rfloor x_j \leq \lfloor \bar{b_i} \rfloor \tag{3.6}$$

Ainsi toute solution de (P) satisfait la contrainte (3.6). Considérons la relation qui fait la différence entre (3.4) et (3.6)

$$\sum_{j \in J} (\lfloor t_{ij} \rfloor - t_{ij}) x_j \leq (\lfloor \bar{b_i} \rfloor - \bar{b_i}) \tag{3.7}$$

Puisque toute solution de (P) satisfait (1) et (3), alors elle satisfait (4). Puisque toute solution de (P) vérifie (3.4) et (3.6), alors elle satisfait aussi (3.7) et son introduction dans (P) n'élimine aucune solution de (P).

Par contre la solution actuelle du problème relaxé ($\bar{P}$) où $x_j = 0$ $\forall j \in J$ ne vérifie pas3.7) et son introduction réduit le domaine réalisable du problème relaxé ($\bar{P}$). Pour poursuivre la résolution, il suffit d'introduire la contrainte

$$\sum_{j \in J} (\lfloor t_{ij} \rfloor - t_{ij}) x_j + x_\tau \leq (\lfloor \bar{b_i} \rfloor - \bar{b_i}) \tag{3.8}$$

ou x_τ est une variable d'écart avec coût nul, au dernier tableau du simplexe pour générer une solution de base au nouveau problème en considérant x_τ la variable de base dans la nouvelle ligne du tableau.

TABLE 3.2 – Introduction d'une variable d'écart

V.B	x_1	x_2	x_k	x_{j_1}	x_j	x_{j_m}	...	x_n	x_τ	-z	T. droite
x_{j_1}	t_{11}	t_{12}	0	1	t_{1j}	0		t_{1n}	0	0	$\bar{b_1}$
$\vdots$	$\vdots$						$\vdots$				$\vdots$
x_k	t_{i1}	t_{i2}	1	0	t_{ij}	0		t_{in}	0	0	$\bar{b_i}$
$\vdots$	$\vdots$					0	$\vdots$				
x_{j_m}	t_{m1}	t_{m2}	0	0	t_{mj}	1		t_{mn}	1	0	$\bar{b_m}$
x_τ	$\lfloor t_{i1} \rfloor - t_{i1}$	$\lfloor t_{i2} \rfloor - t_{i2}$	0	$\lfloor t_{ij} \rfloor - t_{ij}$	0				1	0	$\lfloor \bar{b_i} \rfloor - \bar{b_i}$
-z	$\bar{c_1}$	$\bar{c_2}$	0	0	$\bar{c_j}$	0		$\bar{c_n}$	0	1	$-\bar{z}$

Cette solution de base n'est pas réalisable puisque $x_\tau = (\lfloor \bar{b_i} \rfloor - \bar{b_i}) < 0$. Il suffit de poursuivre la résolution avec l'algorithme Dual du simplexe.

si $\lfloor t_{ij} \rfloor = t_{ij}$, c'est-à-dire t_{ij} est un entier $\forall j \in J$ et $\bar{b_i}$, n'est pas un entier alors l'équation (3.4) indique que (P) n'est pas réalisable, puisque le terme de gauche prend une valeur entière pour toute solution réalisable alors que le terme de droite n'est pas entier.

Une dérivation similaire s'applique pour toute les itérations.

Pour plus de details sur les méthodes de coupes, le lecteur peut consulter les ouvrages[35], [41].

3.5 Programmation Dynamique (PD)

La programmation dynamique est une méthode algorithmique pour résoudre des problèmes d'optimisation. Le concept a été introduit au début des années 50 par Richard Bellman. La programmation dynamique consiste à résoudre un problème en le décomposant en sous-problèmes, puis à résoudre les sous-problèmes, des plus petits aux plus grands en stockant les résultats intermédiaires. Elle évite de dénombrer tous les cas possibles dans les problèmes combinatoires. Pour définir un problème d'optimisation dynamique, prenons un système donné et associons lui les éléments suivants :

– Une variable t, de temps ou d'étape prenant des valeurs discrètes ou continues dans un intervalle $[0, T]$ appelé horizon du problème.

- Une variable d'état $x(t)$ou (x_t), représentant l'état du système à l'instant ou l'étape t,
- Une variable de décision ou de contrôle ou la demande $u(t)$ ou (u_t) à l'instant t,
- L'évolution du système est donnée par une relation de récurrence entre $x(t)$ et $x(t+1)$ dans le cas discret de la forme :

$$x(t+1) = f(x(t), u(t), t) \qquad ou \quad \frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), t) \tag{3.9}$$

  appelée équation d'état ou équation d'évolution du système. Elle désigne aussi la trajectoire ou la dynamique du système.

Un système est donc défini par son état $x(t)$ qui évolue en fonction de t, sous la décision de $u(t)$ qui est soumise à certaines restrictions. On veut choisir le contrôle, de façon qu'une certaine fonctionnelle de x et u soit minimale ou maximale. On désigne par :
$S_t(x_t)$ l'ensemble des états du système à l'instant t ;
$U_t(x_t)$ l'ensemble des décisions admissibles à l'état x_t ;
f_t les fonctions de transition ou de transfert à l'instant t d'un état x_t à un état x_{t+1}.

Définition 3.5.1. Le triplet (S_t, U_t, f_t) est appelé processus de décision séquentiel. C'est un modèle mathématique par lequel on schématise les problèmes d'optimisation qui évoluent en fonction du temps.

Définition 3.5.2. Une politique $(u_0, u_1, u_2, ..., u_{T-1})$ est une séquence de décisions prise aux différentes phases du processus. Elle est dite optimale si pour chaque état du système une décision est prise dans le but d'optimiser un critère donné.

Définition 3.5.3. On appelle sous-politique toute politique d'un sous-problème.

Connaissant une décision et l'état initial du système, les états ultérieurs sont donnés par les équations (3.9).
La programmation dynamique est basée sur le théorème ou principe d'optimalité de Richard Bellman ci-dessous :

3.5.1 Principe de Bellman

Théorème 3.5.1. *Une politique optimale a la propriété que, quels que soient l'état initial et la décision initiale, les décisions restantes doivent constituer une politique optimale vis-à-vis de l'état résultant de la première décision [15], c'est à dire : «Toute politique optimale ne peut être formée que de sous politiques optimales».*
En d'autres termes, si une suite de décisions $J = \{\mu_0, \mu_1, ..., \mu_{N-1}\}$ *est politique optimale alors il en est de même de la suite de décisions* $J_p = \{\mu_p, \mu_{p+1}, ..., \mu_{N-1}\}$ *pour l'etat initial* x_p *et le critère* $f(x_p, u_p)+f(x_{p+1}, u_{p+1})+ .... + f(x_{N-1}, u_{N-1})$.

Démonstration. Posons

$$J_p = \min_{u_p,...,u_{N-1}} \{f(x_p, u_p) + f(x_{p+1}, u_{p+1}) + ... + f(x_{N-1}, u_{N-1})\}$$

Le minimum étant pris sur l'ensemble des vecteurs, $u_p, u_{p+1}, ..., u_{N-1}$ d'après l'équation 3.9, tout compte fait, J_p ne dépend que de x_p donc on peut écrire $J_p(x_p)$ on a dans ce cas :

$$J_p(x_p) = \min_{u_p}\{f(x_p, u_p) + \min_{u_{p+1},...,u_{N-1}} f(x_{p+1}, u_{p+1}) + ... + f(x_{N-1}, u_{N-1})\} \tag{3.10}$$

c'est à dire

$$J_p(x_p) = \min_{u_p}\{f(x_p, u_p) + J_{p+1}(x_{p+1})\}$$

et comme $x_{p+1} = f(x_p, u_p, p)$ alors l'équation 3.10 prend la forme

$$J_p(x_p) = \min_{u_p}\{f(x_p, u_p) + J_{p+1}f(x_p, u_p, p)\} \tag{3.11}$$

Pour $p = N - 1$, on a :

$$J_{N-1}(x_{N-1}) = \min_{u_{N-1}}\{f(x_{N-1}, u_{N-1}) + J_N(x_N)\}$$

Par convention $J_N(x_N) = 0$ □

Ces équations de Bellman ou équations de la programmation dynamique (3.9), (3.10), (3.11), sont des relations de récurrence qui permettent de cal-

culer de proche en proche les $J_p(x_p)$ et par conséquent la quantité $J_0(x_0)$ qui est l'optimum cherché.

3.5.2 Avantage du principe de Bellman

La programmation dynamique fait partie des instruments les plus robustes et efficaces en optimisation. Elle est un des outils remarquables des méthodes de l'automatique. Des nombreuses fonctions économiques de l'industrie sont de ce type. Elle est très simple pour résoudre les sous problèmes d'un problème donné. La programmation dynamique :

- Fournit directement la solution optimale pour les problèmes de nature séquentielle ;
- Permet de traiter des problèmes déterministes, stochastiques ;
- S'adapte à des situations où le temps, les états et les décisions varient continûment ;
- Intervient dans les systèmes dynamiques et autres systèmes de décisions séquentielles ;
- Fournit de nombreuses applications en recherche opérationnelle : investissements, stocks, transports, renouvellement du matériel, réapprovisionnement.

Cependant elle est très complexe pour la résolution des problèmes de grande taille (où le nombre d'états croit de manière exponentielle en fonction du nombre d'étapes)[[15][54]].

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait ressortir les principales notions de la Recherche opérationnelle utilisées dans cette thèse. Ces notions nous ont permis de montrer comment la programmation linéaire en nombres entiers et la programmation dynamique peuvent être utilisées pour le problème d'attribution des créneaux horaires. Quelques méthodes de résolution comme la méthode de Branch and Bound et les coupes de Gomory sont présentées.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION ET RÉSOLUTION DES PROBLÈMES D'ATTRIBUTION DES CAPACITÉS

Sommaire

4.1 Introduction 48
4.2 Quelque modèles existants des sous-capacités . 49
4.3 Optimisation de la capacité aéroportuaire 56
4.4 Algorithme de résolution 62
4.5 Application du modèle à l'AILSS 64
4.6 Conclusion 66

4.1 Introduction

Les droits du trafic, les capacités aéroportuaires et la coordination sont trois facteurs très utiles pour élaborer le planning horaire de l'aéroport. La croissance très rapide du trafic aérien impose aux aéroports de s'organiser de façon plus efficace afin d'absorber les flux qui dépassent largement les capacités des aéroports. Il est question de l'exploiter de façon optimale dans le but d'atteindre les objectifs fixés par l'Etat. Dans ce chapitre, nous avons commencé par quelques modèles d'optimisation des sous capacités aéroportuaires à savoir, un modèle d'optimisation des postes de stationnements, un modèle d'optimisation de la piste et une technique d'optimisation de la ca-

pacité du terminale passager. Nous proposons des modèles mathématiques qui maximisent le nombre de demandes à satisfaire dans une plate-forme-aéroportuaire.

Ainsi, nous avons proposé un premier modèle de programmation linéaire en nombre entiers qui a fait l'objet de la publication Ahamada et al. [24] présenté en 2017. Nous avons ensuite étendu ce modèle en intégrant les demandes non satisfaites d'une période donnée à la période suivante. Nous avons aussi proposé un algorithme de résolution implémentant nos modèles. Enfin nous avons évalué les performances de nos modèles en utilisant des données réelles de l'aéroport da Dakar.

4.2 Quelque modèles existants des sous-capacités

La détermination de la capacité d'un module de stockage ne pose pas de gros problèmes, par exemple la capacité d'une citerne est 1000 hectolitres. Par contre, il est plus délicat de déterminer la capacité d'un module où s'écoulent des flux, car la présentation de ces flux à l'entrée du module ou du système est aléatoire. En effet, et sauf cas irréaliste, il est toujours possible d'écouler une quantité donnée au niveau de l'aires des mouvements ; et du terminal passager. Suivant son importance, les conditions et le temps dans lesquels elle va être écoulée seront différents.

4.2.1 Optimisation des postes de stationnements

La figure (4.1), présente un schéma simplifié comportant les arrivées et

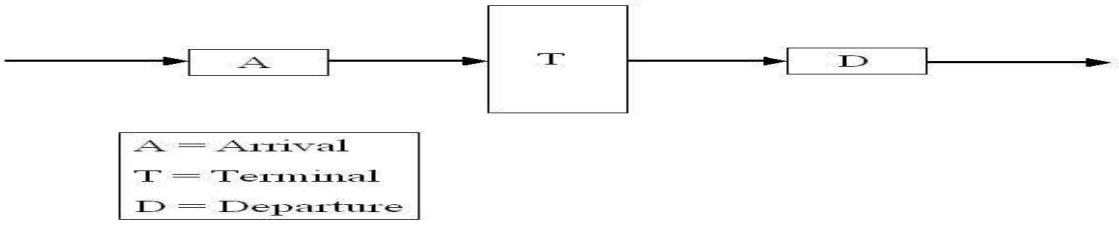


FIGURE 4.1 – Schéma simplifié d'un aéroport

au niveau du point **A** et les départs se situent au niveau du point **D** et **T** représente la parking des avions. La capacité des aires de stationnements est définie dans [42] par Idrissi et al. comme :

Définition 4.2.1. le nombre maximum d'avions pouvant utiliser les postes de stationnement pendant un intervalle de temps avec un niveau constant de demande.

Nous avons modélisé ce problème dans[18] en utilisant la programmation linéaire avec contraintes. Nous avons découpé l'horizon par des intervalles de temps. Si une demande se manifeste sur un intervalle i et si nous n'avons pas la possibilité de la satisfaire, nous avons choisi de lui associer une pénalité P_i.

4.2.1.1. Paramètres et variables

X^i : est le nombre de demandes d'arrivées de l'intervalle i ;
Y^i : est le nombre de demandes de départs de l'intervalle i ;
X_e^i : est le nombre effectifs d'arrivées dans l'intervalle i ;
Y_e^i : est le nombre effectifs de départ de l'intervalle i.
R_a^i : est le nombre d'avions retardés à l'arrivée à l'intervalle i, tel que

$$R_a^i = X^i - X_e^i$$

R_d^i : est le nombre d'avions retardés au départ de l'intervalle i, tel que

$$R_d^i = Y^i - Y_e^i$$

4.2.1.2. Fonction objectif

Le problème consiste à minimiser la somme de ces pénalités, sa formulation mathématique est :

$$\min \sum_{i=1}^{N} P_i = \min \sum_{i=1}^{N} R_a^i + R_d^i \tag{4.1}$$

Les contraintes liées à ce problème sont :

$$X_e^i + Y_e^i \leq C_i \qquad i = 1, 2, ..., N \tag{4.2}$$

$$X_e^i \leq X^i \qquad i = 1, 2, ..., N \tag{4.3}$$

$$Y_e^i \leq Y^i \qquad i = 1, 2, 3, ..N \tag{4.4}$$

$$C_v^{i+1} = C_v^i + Y_e^i - X_e^i \qquad i = 1, 2, 3, ..N \tag{4.5}$$

$$C_o^{i+1} = C_o^i + X_e^i - Y_e^i, \qquad i = 1, 2, 3, ..N \tag{4.6}$$

4.2.1.3. Algorithme : Attribution des postes des stationnement

Nous avons proposé une résolution à ce problème en élaborant un algorithme basé sur le principe de Branch and Bound. L'évaluation consiste à étudier la demande X^i et la comparer avec la capacité vide du terminal C_v^i à l'intervalle i. De même pour les cas de départs, nous évaluons la demande Y^i et nous la comparons avec la capacité occupé du terminal C_o^i. A l'intervalle $i+1$, l'algorithme calcule C_v^{i+1} et C_o^{i+1} avant d'étudier les demandes d'arrivées et de départs à l'intervalle $i+1$. L'algorithme 1 ci-dessous présente l'intégralité du pseudo-code de cet algorithme de résolution.

Algorithm 1 Résolution du problème de poste des stationnements

ENTRÉES:

H : Horizon en intervalle de temps i
A : Point de demande d'arrivée
D : Point de demande de départ
T : Le terminale final «parking»
C_T : Capacité total du terminal.
C_{T_i} : Nombre de places du terminal à l'intervalle de temps i
C_v^i : Nombre de places vides du terminal à l'intervalle i
C_o^i : Nombre places occupées du terminal à l'intervalle i
N : Nombre d'intervalles de temps
X^i : Nombre de demandes d'arrivées à la période i
Y^i : Nombre de demandes de départs à la periode i
R_a^i : Nombre d'arrivées retardées à l'intervalle i
R_d^i : Nombre des départs retardés à l'intervalle i
X_e^i, Nombre effectifs d'arrivées dans l'intervalle i,
Y_e^i, Nombre effectifs de départ de l'intervalle i.

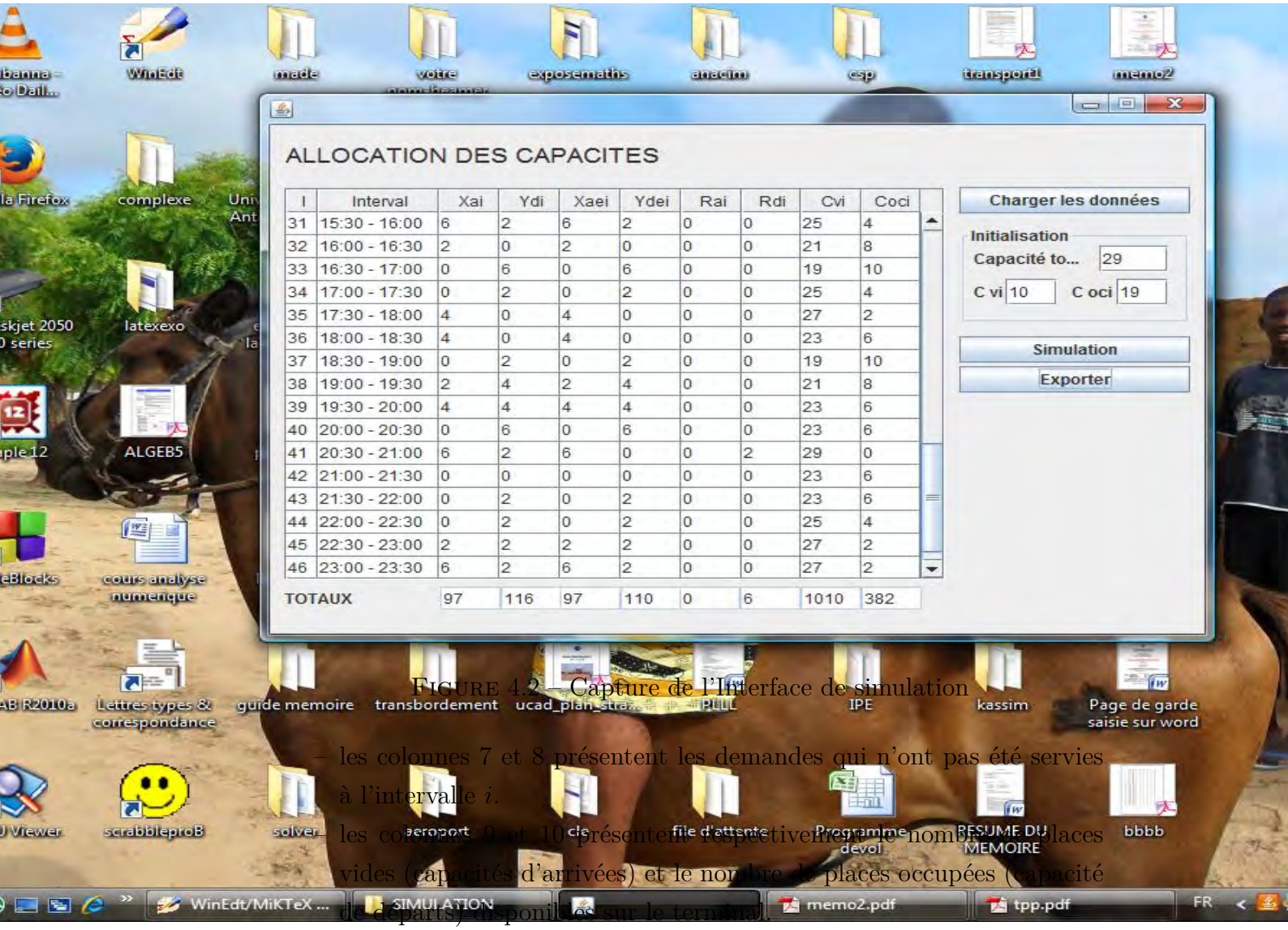
INITIALISATION : Nous posons $C_T = \lambda$

POUR $i = 0$ **FAIT**
$C_v^i + C_o^i = \lambda$ et $\varphi* = 0$
SÉPARATION ET ÉVALUATION
SI $X^i \leq C_v^i$ **ALORS**
POUR $i = 1$ **FAIT**
$X_e^i = X^i$ et $R_a^i = 0$
$Y_e^i = C_o^i$ et $R_d^i = Y^i - Y_e^i$
FIN POUR
FIN SI
SI $Y^i \leq C_o^i$ **ALORS**
POUR $i = 1$ **FAIT**
$Y_e^i = Y^i$ et $R_d^i = 0$
$Y_e^i = C_o^i$ et $R_d^i = Y^i - Y_e^i$
FIN POUR
FIN SI
$\varphi_i* = \varphi* + (R_a^i + R_d^i)$
BRANCHEMENT :
POUR $i = i + 1,$ à $i \leftarrow n$ **FAIT**
$C_v^{i+1} = C_v^i + Y_e^i - X_e^i$
$C_o^{i+1} = C_o^i + X_e^i - Y_e^i$
FIN POUR
FIN POUR

4.2.1.4. Application à l'AILSS

Nous avons implémenté cet algorithme avec des données réelles de l'aéroport de Dakar, en découpant une journée de trafic par des intervalles d'amplitude 30min. Les résultats intégrales obtenus lors de la simulation sont résumées dans le tableau (4.2).

– les colonnes 1 et 2 présentent respectivement le numéro de l'intervalle et l'heure, de période $p = 30min$ pour chaque intervalle.



I	Interval	Xai	Ydi	Xaei	Ydei	Rai	Rdi	Cvi	Coci
31	15:30 - 16:00	6	2	6	2	0	0	25	4
32	16:00 - 16:30	2	0	2	0	0	0	21	8
33	16:30 - 17:00	0	6	0	6	0	0	19	10
34	17:00 - 17:30	0	2	0	2	0	0	25	4
35	17:30 - 18:00	4	0	4	0	0	0	27	2
36	18:00 - 18:30	4	0	4	0	0	0	23	6
37	18:30 - 19:00	0	2	0	2	0	0	19	10
38	19:00 - 19:30	2	4	2	4	0	0	21	8
39	19:30 - 20:00	4	4	4	4	0	0	23	6
40	20:00 - 20:30	0	6	0	6	0	0	23	6
41	20:30 - 21:00	6	2	6	0	0	2	29	0
42	21:00 - 21:30	0	0	0	0	0	0	23	6
43	21:30 - 22:00	0	2	0	2	0	0	23	6
44	22:00 - 22:30	0	2	0	2	0	0	25	4
45	22:30 - 23:00	2	2	2	2	0	0	27	2
46	23:00 - 23:30	6	2	6	2	0	0	27	2
TOTAUX		97	116	97	110	0	6	1010	382

FIGURE 4.2 – Capture de l'interface de simulation

– les colonnes 7 et 8 présentent les demandes qui n'ont pas été servies à l'intervalle i.

– les colonnes 9 et 10 présentent respectivement le nombre de places vides (capacités d'arrivées) et le nombre de places occupées (capacité de départs) disponibles sur le terminal.

Le résultat intégrale de la simulation est résumé dans le tableau 1 de l'annexe.

4.2.1.5. Interprétation

Nous remarquons qu'il y a plus d'avions du côte départ que du côté d'arrivée qui sont mis en attente. La somme totale des retardés est égale à 6. Nous constatons que le problème ne se pose pas à l'aéroport de Dakar car les capacités sont assez grandes pour qu'aucune congestion n'ait lieu.

Nous remarquons aussi que le problème de congestion se poserait, lorsqu'il avait plus de demandes d'arrivées que de départs sur une durée de temps assez élevée, ou plus de départs que d'arrivées. Idrissi et al. [42] ont proposé un modèle de contrôle et de régulation pour réduire au minimum les nombres d'avions retardés ou maximiser au mieux les flux de départ.

La gestion optimale des ces aires de stationnement est un problème d'attribution de capacité qui a un impact majeur sur l'attribution des créneaux horaires aux compagnies aériennes.

4.2.2 Optimisation de la capacité d'une piste

La piste est une ressource importante et sa planification doit tenir compte de la direction des vents, de l'estimation de la demande de trafic, de l'implantation actuelle et future, des riverains, des conditions géologiques etc. La capacité des pistes est le nombre maximum d'opérations (atterrissages et décollages) pouvant être effectués dans un intervalle de temps de manière fluide avec un niveau constant de demande. Un premier modèle d'évaluation de la capacité d'un système de piste est celui proposé par le STBA [9] Europeen en 1975. Le principe de calcul est basé sur l'application de la théorie de files d'attente à une seule piste. Ce modèle empirique

$$C_H = \frac{1}{t_{AA}p^2 + (t_{AD} + t_{DA})p(1-p) + t_{DD}(1-p)^2} \tag{4.7}$$

n'est que théorique, car ils ont assimilé la capacité de la piste à la cadence horaire aéroportuaire C_H où :
p, désigne la proportion d'atterrissage sur les décollages ; t_{AA} les temps moyens d'occupation de la piste pour une opération d'atterrissage suivi d'un atterrissage ; t_{AD} les temps moyens d'occupation de la piste pour une opération d'atterrissage suivi d'un décollage ; t_{DA} les temps moyens d'oc-

cupation de la piste pour une opération décollage suivi d'un atterrissage. t_{DD} les temps moyens d'occupation de la piste pour une opération décollage suivi d'un décollage. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte la distribution des instants d'arrivées ou de départs des avions.

4.2.3 Optimisation de la capacité du terminal passager

La capacité du terminal passager est le nombre de passagers que l'aérogare peut écouler avec une qualité de service selon les ratios des surfaces [63] proposé par l'IATA pour le traitement des passagers dans une unité de temps donnée.

Il est nécessaire de tenir compte des certaines mesures de performance afin d'assurer une qualité de service optimale au passagers. C'est à partir de ces dernières et au cours de cette étude que pourront être déterminer, le flux de passager que peut traiter l'infrastructure et les zones bloquant la circulation des passagers dans l'aérogare.

La congestion d'un terminal passager se situe au niveau de l'arrivée. Déterminer la capacité du terminal passager revient à déterminer le nombre de passagers traitable au niveau d'arrivée pour une unité de temps. L'objectif de l'optimisation de la capacité du terminal passager est de minimiser le coût C_T qui est égale à la somme de coût de service et le coût d'attente.

- le coût associé à la capacité de service mise en place (coût de service)
- le coût associé à l'attente des clients (coût encouru par l'entreprise en raison d'attente des clients dans le système).

$$C_T = C_a + C_s$$

L'approche d'optimisation de C_T consiste à calculer le coût total du système en fonction de différentes valeurs correspondant au nombre de serveurs. Il s'agit d'un paramètre qui doit être fixé par l'exploitant du terminal et elle représente le nombre de passagers traitables pour une unité de temps.

Pour plus de détails sur la capacité d'une file d'attente, le lecteur peut consulter les ouvrages [53], [46]et [22][66]et [6].

4.3 Optimisation de la capacité aéroportuaire

Pour notre modélisation, nous posons les hypothèses suivantes.

Hypothèses

♢ H_2 : Les demandes sont bien enregistrées à l'avance et deux fois par an.

♢ H_1 : Le nombre de sièges de l'avion déclarés par la compagnies correspond au nombre de passagers de l'avion, c'est-à dire tous les avions sont supposés pleins.

♢ Le modèle élaboré ici ne tient pas compte de la loi du grand père [1].

♢ H_3 : L'horizon d'optimisation est découpé en fenêtres de temps et chaque fenêtre désigne une période de demande comme le montre la figure-4.3 ci-dessous.

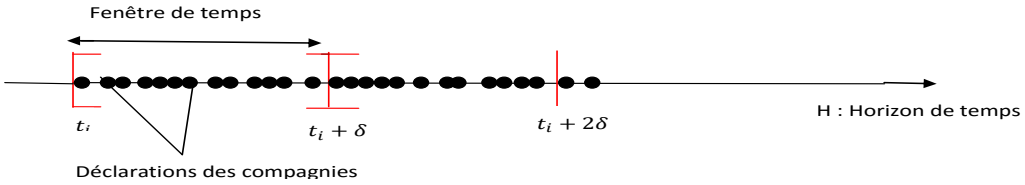


FIGURE 4.3 – Horizon d'optimisation

4.3.1 Modélisation et résolution par la PLNE

Le modèle de programmation linéaire en nombres entiers que nous proposons dans cette section permet de maximiser le nombre de demandes des vols dans les périodes considérées.

4.3.1.1. Terminologie Mathématique utilisée

I : Ensemble des périodes de l'horizon d'optimisation indexé par i= 1, 2, 3,. . . i,. . . . . N

A : Capacité maximale en nombre d'avions de la piste pour une période à

1. Première demande première servi

l'arrivée
D : Capacité maximale en nombre d'avions de la piste pour une période au départ
C_a : Nombre maximum des passagers traitables à l'arrivée dans une période
C_d : Nombre maximum des passagers traitables au départ dans une période
A_i : Ensemble des avions qui ont demandé à venir à la période i.
D_i : Ensemble des avions qui ont demandé à partir à la période i.
p_{ik} : Nombre de passagers de l'avion k à l'arrivée pour la période i
q_{ik} : Nombre de passagers de l'avion k au départ de la période i

4.3.1.2. Les Variables

Nous désignons par x_{ik} et y_{il} les variables de décisions.

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande de l'avion } k \text{ à l'arrivée pour la periode } i \text{ est confirmée}; \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$$y_{il} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande de l'avion } l \text{ au départ pour la periode } i \text{ est confirmée}; \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

P_i : Nombre total des passagers confirmés à l'arrivée à la période i.

$$P_i = \sum_{k \in A_i} p_{ik} x_{ik} \qquad \forall i \in I \tag{4.8}$$

Q_i : Nombre total des passagers confirmés au départ de la période i.

$$Q_i = \sum_{l \in D_i} q_{ik} y_{il} \qquad \forall i \in I \tag{4.9}$$

4.3.1.3. Formulation Mathématique :

Pour élaborer le planning de l'aéroport d'une saison, nous nous proposons de l'établir de façon à satisfaire au maximum les demandes d'arrivées et de départs, ce qui nous amène à formuler le problème ($\mathbb{P}_1$) suivant.

$$\max_{i \in I} \sum_{k \in A_i} x_{ik} + \sum_{l \in D_i} y_{il} \tag{4.10}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{k \in A_i} x_{ik} \leq A \qquad \forall i \in I \tag{4.11}$$

$$\sum_{l \in D_i} y_{il} \leq D \qquad \forall i \in I \tag{4.12}$$

$$\sum_{k \in A_i} p_{ik} x_{ik} \leq C_a \qquad \forall i \in I \tag{4.13}$$

$$\sum_{l \in D_i} q_{il} y_{il} \leq C_d \qquad \forall i \in I \tag{4.14}$$

$$x_{ik}\,, y_{il} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in I \tag{4.15}$$

Les contraintes (4.11),(4.12), (4.13) et (4.14) sont des contraintes de capacités.
Les contraintes (4.11),(4.12) assurent que le nombre de demandes acceptées à l'arrivée et au départ respectivement ne dépassent pas la capacité maximale à l'arrivée et au départ.
Les contraintes (4.13) et (4.14) signifient respectivement que la somme du nombre de passagers de toutes les demandes acceptées à l'arrivée et au départ est inférieure au nombre maximum de passagers traitables dans une période à l'arrivée et au départ. Les contraintes (4.15) sont des contraintes d'intégrités.

4.3.1.4. Existence de la solution du modèle de PLNE

Un nombre des questions peuvent se poser à propos de l'existence de la solution optimale du modèle mathématique cité ci-dessus. Existe t-il des solutions optimales à ce problème ?

Proposition 4.3.1. Soit D, l'ensemble admissible du programme linéaire en nombres entiers $(\mathcal{P})$. $(\mathcal{P})$ admet une solution optimale dans D.

Démonstration. 1. La fonction objectif (4.10) est continue en D, car elle est la somme de deux fonctions continuent à savoir $f(x_i)$ et $g(y_i)$ définies telles ques :

f : $A_i \to \mathbb{R}$, g : $D_i \to \mathbb{R}$

$x_i \mapsto \sum_{k \in A_i} x_{ik}$ et $y_i \mapsto \sum_{l \in D_i} y_{il}$

2. Montrons que les contraintes peuvent s'écrire de la forme $AZ \leq b$.
   Pour une période i fixé, nous prenons $N = N_a + N_d$;
   Avec :
   – N_a, nombre de demandes d'arrivés dans la période
   – N_d, nombre de demandes de départs dans la période et
   – Posons $z_k \in \{0, 1\}$, une variable binaire
   – $\mathbb{1}_{[k]}$ un vecteur colonne. $\mathbb{1}_{[k]} = (1, 1, 1, ..., 1)'$
   Le problème peut s'écrire sous la façon suivante.

$$\max \sum_{k=1}^{N} z_k.\mathbb{1}_{[k]} = \max(z_1 + z_2 + ... + z_N).\mathbb{1}_{[k]} \tag{4.16}$$

   Sous les contraintes :

$$\sum_{k=1}^{N_a} z_k \leq A \tag{4.17}$$

$$\sum_{k=Na+1}^{N} z_k \leq D \tag{4.18}$$

$$\sum_{k=1}^{N_a} p_k z_k \leq C_a \tag{4.19}$$

$$\sum_{k=N_a+1}^{N} q_k z_k \leq C_d \tag{4.20}$$

   Nous pouvons dans ce cas réécrire le problème ci-dessous.

$$\max Z^t.\mathbb{1}_{[k]} \tag{4.21}$$

$$\begin{cases} BZ \leq b \\ Z \geq 0 \end{cases}$$

   Avec $b = [A, D, C_a, C_d]^t$, matrice de seconde membre
   B, la matrice technologique associée aux demandes définie par :

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & ... & 1 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & 1 & ... & 1 \\ p_1 & p_2 & ... & p_{Na} & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 & q_{Na+1} & ... & q_N \end{pmatrix} \quad et \quad Z = \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ Z_N \end{pmatrix}$$

Les fonctions $g(Z)$ définissant les contraintes sont linéaires par conséquent continues. Les demi-espaces $[g(Z) \leq 0]$ qu'elles déterminent sont convexes et fermés. D étant l'intersection de ces demi-espaces est convexe et fermé car l'intersection de convexes est convexe. D'où D est un polyèdre convexe fermé.

La fonction g continue et D un compact, d'après le théorème de Weierstrass toute fonction continue sur un compact y atteint son optimum d'où le problème $(\mathcal{P})$ admet une solution optimale. □

Dans le modèle de programmation linéaire présenté ci-dessus (4.3.1), toute demande non satisfaite dans la période i, n'est pas pris en compte dans la période $i+1$. Nous introduisons les contraintes qui permettent d'incorporer dynamiquement ces demandes.

4.3.2 Modélisation et résolution par la PD

Le modèle de programmation dynamique que nous proposons dans cette sous-section permet de maximiser les nombre de demandes d'une période et aussi d'incorporer les demandes des vols non-satisfaite d'une période i à la période suivante $i+1$. Nous introduisons dans ce cas deux contraintes logiques (4.22) et (4.23) imposantes que si la demande n'est pas acceptée en i, elle doit l'être à la période $i+1$ suivante.

$$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1 \qquad \forall i \in I \qquad \forall k \in A_i \tag{4.22}$$

$$y_{il} + y_{i+1\,l} = 1 \qquad \forall i \in I \qquad \forall l \in D_i \tag{4.23}$$

En réalité ces demandes non acceptées en i s'ajoutent dynamiquement avec celles qui ont formulé les demandes d'arrivées ou de départs dans la période $i+1$. Nous définissons les paramètres supplémentaires suivants :
P_{i-1}^{ra} : Nombre total des passagers des demandes non acceptées à l'arrivée à la période $i-1$.
Q_{i-1}^{ra} : Nombre total des passagers des demandes non acceptées au départ à la période $i-1$.

X_i : Nombre de demandes non acceptées à l'arrivée i,

$$X_i = |A_i| - \sum_{k \in A_i} x_{ik}$$

Y_i : Nombre de demandes non acceptées au départ dans la période i

$$Y_i = |D_i| - \sum_{l \in D_i} x_{il}$$

Dans ce cas le nombre total de passager réellement acceptés à la période i à l'arrivée est :

$$P_i = P_{i-1}^{ra} + \sum_{k \in A_i} p_{ik} x_{ik}$$

et le nombre nombre total de passagers réellement acceptés au période i au départ est :

$$Q_i = Q_{i-1}^{rd} + \sum_{l \in D_i} q_{il} y_{il} \qquad \forall i \in I$$

4.3.2.1. Formulation Mathématique

Pour élaborer le planning de la période, nous proposons de l'établir de façon à satisfaire au maximum les demandes, ce qui nous amène à formuler le problème suivant :

$$\max_{i \in I} \sum_{k \in A_i} x_{ik} + \sum_{l \in D_i} y_{il} \tag{4.24}$$

Sous les contraintes :

$$X_i = |A_i| - \sum_{k \in A_i} x_{ik} \qquad \forall i \in I \tag{4.25}$$

$$Y_i = |D_i| - \sum_{l \in D_i} x_{il} \qquad \forall i \in I \tag{4.26}$$

$$X_{i-1} + \sum_{k \in A_i} x_{ik} \leq A \qquad \forall i \in I \tag{4.27}$$

$$Y_{i-1} + \sum_{l \in D_i} y_{il} \leq D \qquad \forall i \in I \tag{4.28}$$

$$P_{i-1}^{ra} + \sum_{k \in A_i} p_{ik} x_{ik} \leq C_a \qquad \forall i \in I \tag{4.29}$$

$$Q_{i-1}^{rd} + \sum_{l \in D_i} q_{il} y_{il} \leq C_d \qquad \forall i \in I \tag{4.30}$$

$$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{4.31}$$

$$y_{il} + y_{i+1\,l} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{4.32}$$

$$x_{ik}\,, y_{il} \in \{0, 1\} \qquad \forall\, i \in I \tag{4.33}$$

$$X_i \geq 0, \quad Y_i \geq 0 \quad \forall i \in I \tag{4.34}$$

Les contraintes (4.27),(4.28), (4.29) et (4.30) sont des contraintes des capacités. Les contraintes (4.27),(4.28) assurent que le nombre de demandes acceptées à l'arrivées et au départ respectivement ne dépasse pas la capacité maximale à l'arrivée et au départ.
Les contraintes (4.29) et (4.30) signifient respectivement que la somme des passagers de toutes les demandes acceptées à l'arrivée et au départ est inférieure au nombre maximum de passagers traitables dans un créneau à l'arrivée et au départ. Les contraintes (4.31) et (4.32) sont deux contraintes logiques imposantes que si la demande n'est pas acceptée en i, elle doit l'être à la période $i+1$ suivante. Les contraintes (4.33) sont des contraintes d'intégrités. En fin, les contraintes (4.34), sont des contraintes de positivités.

4.4 Algorithme de résolution

Pour la résolution de ce modèle, nous avons élaboré l'algorithme (2) ci-dessous.

Algorithm 2 Résolution du modèle basé sur la programmation dynamique

ENTRÉES:

I : Ensemble des période
A : Capacité de la piste à l'arrivée pour une période
D : Capacité de la piste au départ pour une période
C_a : Nombre des passagers traitables à l'arrivée dans une période
C_d : Nombre des passagers traitables au départ dans une période
A_i : Demandes d'arrivées dans la période i.
D_i : Demandes de départs dans la période i.
p_{ik} : Nombre de passagers de l'avion k à l'arrivée, pour la période i
q_{il} : Nombre de passagers de l'avion l au départ, de la période i
P_i : Nombre total des passagers confirmés à l'arrivée à la période i.
Q_i : Nombre total des passagers confirmés au départ de la période i.
X_i : Nombre de demandes d'arrivées non acceptées à la période i
Y_i : Nombre de demandes de départs non acceptées à la période i

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande de l'avion } k \text{ à l'arrivée pour la période } i \text{ est confirmée.} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$y_{il} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande } l \text{ au départ pour la période } i \text{ est confirmée.} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

DEBUT: $X_0 = 0$ et $Y_0 = 0$

POUR $i \in I$ **FAIT**
POUR $k \in A_i$ et $l \in D_i$ **FAIT**
SI $X_{i-1} + \sum_{k \in A_i} x_{ik} \leq A$ **ALORS**
SI $Y_{i-1} + \sum_{l \in D_i} y_{il} \leq D$ **ALORS**
SI $P^{ra}_{i-1} + \sum_{k \in A_i} p_{ik} x_{ik} \leq C_a$ **ALORS**
SI $Q^{rd}_{i-1} + \sum_{l \in D_i} q_{il} y_{il} \leq C_d$ **ALORS**
$Z_i = \max\{\sum_{k \in A_i} x_{ik} + \sum_{l \in D_i} y_{il}\}$
$X_i = |A_i| - \sum_{k \in A_i} x_{ik}$
$Y_i = |D_i| - \sum_{l \in D_i} y_{il}$
FIN SI
FIN SI
FIN SI
FIN SI
$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1$
$y_{il} + y_{i+1\,l} = 1$
FIN POUR
FIN POUR

4.5 Application du modèle à l'AILSS

L'expérience a été exécuté sur un ordinateur de marque Dell avec Intel(R) core(TM)i5-6200U CPU @2.30GHz 2,40GHz de microprocesseur, de 8.00Go de mémoire RAM, de 1TB de disque dur et fonctionnant sur une plate- forme Windows 10, Edition Famille à 64 bits. Nous avons implémenté nos algorithmes dans le logiciel Cplex, pour expérimenter notre modèle.

4.5.1 Données utilisées

Afin d'évaluer nos modèles, nous avons utilisé des données réelles extrait du planning horaire de l'été 2015 de l'agence nationale de l'aviation civil et de la météorologie du Sénégal, de l'aéroport de Dakar.
Nous avons relevé toutes les demandes d'arrivées et de départs du mardi, entre 19h et 23h qui nous avons résumées dans le tableau (4.1) suivant.

4.5.2 Résultats de l'expérimentation et Interprétation

Nous avons implémenté notre modèle dans le logiciel Cplex. Nous avons résumé les résultats obtenues dans le tableau (4.2) suivants :

- Dans la période $i = 1$, c'est-à-dire entre $]19h - 20h[$, trois demandes seulement parmi les cinq demandes ont été acceptées dans cette période.
- Dans la période $i = 2$, c'est-à-dire entre $]20h - 21h[$, Une demande seulement sur les quatre demandes d'arrivées a été refusée dans cette période.
- Dans la période $i = 3$, c'est-à-dire entre $]22h - 23h[$, deux demandes seulement parmi les sept demandes ont été refusées dans cette période.

Pour qu'il y ait une qualité de service optimale au niveau de la piste et au niveau du terminal passager, le modèle de la programmation linéaire en nombres entiers rejette certaines demandes et impose les résultats du tableau (4.2) ci-dessus. Les demandes confirmées font le planning en respectant les heures préférentielles dans les périodes. Par contre, pour les vols rejetés, nous distinguons deux possibilités pour les demandes non confirmées dans la période souhaitée :

TABLE 4.1 – Demandes d'arrivées et de départs de tous les mardi de l'été 2015 entre 19h00 et 20h00

créneaux	Demandes		Passagers	
	Arrivée	Départs	à l'arrivées	au départs
	KP97	–	120	–
$i = 1$	AEA132	–	186	–
]19h, 20h]	IST/NK	–	102	–
	AF718/9	–	381	–
	AF718/9	–	309	–
	LH826	–	0	—
	AF718/9	–	381	–
$i = 2$	SN206	–	288	–
]20h, 21h]	DN64	–	56	–
	–	KP028	–	120
	–	NST/NK	–	102
	DN64	–	120	–
	–	KP97	–	120
$i = 3$	–	AF718/9	–	381
]22h-23h]	–	AF718/9	–	309
	–	AF718/9	–	381
	QC376	–	131	–
	IB69	–	289	
	–	SS990/1	–	304
	AT501	–	236	–
]23h, 24h]	WC	–	124	
	–	QC376	–	131

- Le coordonnateur peut proposer à la compagnie de desservir dans un autre aéroport avec son heure préférentielle. Ceci n'est valable que dans un pays ou il y a deux ou plus d'aéroports de même spécificité (International ou national).
- Soit le coordonnateur propose à la compagnie de desservir dans une autre période et avec une autre heure qu'il lui attribuera.

Cette dernière proposition fait l'objet du modèle de programmation dynamique (4.3.2). Pour tenir compte de ces demandes non confirmées au créneau voulus, nous avons complété le modèle de PLNE par la programmation dynamique et un algorithme de résolution est établi dans la section (4.4).

TABLE 4.2 – Demandes acceptées et non acceptées de tous les mardi de l'été entre 19h00 et 21h00

i	Demandes	Résultats	
i=1 19h-20h	KP97	$x_{11} = 1$	Acceptée
	AEA132	$x_{12} = 1$	Acceptée
	IST/NK	$x_{13} = 0$	Non acceptée
	AF718/9	$x_{14} = 0$	Non acceptée
	AF718/9	$x_{15} = 1$	Acceptée
i=2 20h-21h	LH826	$x_{21} = 1$	Acceptée
	AF718/9	$x_{22} = 0$	Non acceptée
	SN206	$x_{23} = 1$	Acceptée
	DN64	$x_{24} = 1$	Acceptée
	KP028	$y_{21} = 1$	Acceptée
	NST/NK	$y_{22} = 1$	Acceptée
i=3 22h-23h	DN64	$x_{31} = 1$	Acceptée
	QC376	$x_{32} = 1$	Acceptée
	KP97	$y_{31} = 1$	Acceptée
	AF718/9	$y_{32} = 1$	Acceptée
	AF718/9	$y_{33} = 0$	Non Acceptée
	AF718/9	$y_{34} = 1$	Acceptée
	IB69	$x_{33} = 0$	Non acceptée

4.6 Conclusion

Nous avons testé le modèle de PLNE en considérant trois créneaux d'amplitudes 60 min avec le CPLEX. Il s'est avéré que certaines demandes ne devraient pas être acceptées aux créneaux voulus pour assurer la qualité de service. Sous l'hypothèse que chaque demande non satisfaite sur un créneau voulu doit l'être au créneau suivant, nous avons fait une extension du modèle afin d'intégrer ces demandes dans le créneau suivant. Nous obtenons un modèle de programmation dynamique. La capacité aéroportuaire est un facteur déterminant pour l'attribution des créneaux aux compagnies aériennes. Nous l'avons subdivisé en deux catégories à savoir :

- La capacité de l'aire mouvement en générale est assimilé à celle de la piste ;
- La capacité de l'aérogare est assimilé à celle de la salle d'arrivée dans le cas de ce mémoire.

Deuxième partie

Gestion optimale des créneaux aéroportuaires

CHAPITRE 5

OPTIMISATION DES CRÉNEAUX D'AÉROPORT POUR LA GESTION DU TRAFIC AÉRIEN

Sommaire

5.1 Introduction 68
5.2 Système d'attribution des créneaux 69
5.3 Gestion optimale des créneaux 71
5.4 Algorithmes de résolutions 76
5.5 Application du modèle avec des données réelles de l'AIBD 78
5.6 Conclusion 81

5.1 Introduction

Afin de contribuer au problème d'élaboration des créneaux à l'Aéroport International Blaise Diagne de Diass, nous proposons dans ce chapitre deux modèles d'optimisation à deux niveaux. Tout d'abord, nous proposons un modèle pour la résolution du problème d'affectation et ensuite, nous proposons un modèle pour la résolution du problème d'ordonnancement.

Pour le problème d'affectation, nous proposons un modèle dynamique permettant d'optimiser les demandes dans chaque intervalle. Du point de vue pratique, la résolution d'un tel problème consiste à l'affectation de ma-

nière efficiente des demandes de vols dans des périodes pour toute l'horizon du temps considéré. Lors de ces affectations, les demandes non satisfaites dans une période donnée sont automatiquement prises en compte dans la période suivante.

Pour le problème d'ordonnancement, nous proposons un modèle linéaire permettant de minimiser les marges entre l'heure préferentielle de la compagnie aérienne et le début du créneau imposé. Ce modèle permet d'assurer une répartition optimale des vols en attribuant un créneau à chaque demande acceptée par le modèle d'affectation.

Ces deux modèles permettent de faciliter les coordonnateurs centraux lors de l'élaboration du planning horaire. Nous avons proposé un algorithmes de résolution pour chacun de ces deux modèles. Nous avons utilisé des données réelles de l'aéroport de Diass du 6 Janvier 2018 pour évaluer les performances de nos modèles.

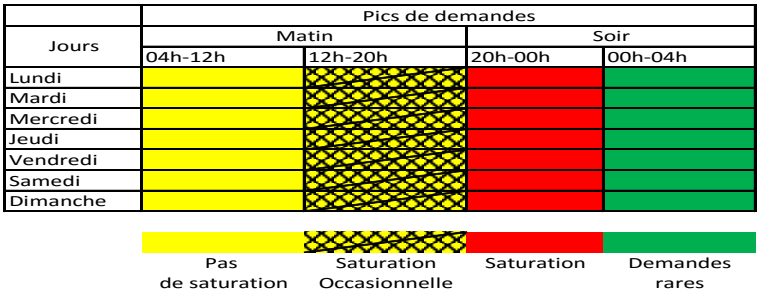
5.2 Système d'attribution des créneaux

5.2.1 Règles d'attribution des créneaux

L'allocation des créneaux suit des règles de priorité. Les créneaux horaires historiques, c'est-à-dire utilisés par une compagnie pendant 80% au moins de la période pour laquelle ils ont été attribués, lui sont affectés en priorité si elle les redemande. Ils peuvent être programmés à un horaire différent de l'horaire exploité la saison équivalente précédente.

La capacité est un facteur déterminant pour l'attribution des créneaux horaires. Les droits de trafic, la capacité aéroportuaire et les créneaux d'aéroport sont des questions entièrement différentes mais qui se complètent. Les coordonnateurs jouent un rôle de chef de file en élaborant les diagrammes de créneaux et ils supervisent aussi l'efficacité de ces créneaux.

TABLE 5.1 – Périodes de demande de la semaine



5.2.2 Contraintes de limitations des créneaux

Dans la modélisation, nous assimilons cette capacité [1] à la cadence horaire K et nous utilisons le résultat du STBA [9] que nous l'avons énoncé dans (4.7), pour un aéroport ayant une seule piste. Pour ordonnancer les demandes, nous introduisons des variables qui prendront en compte l'instant initial et final des créneaux dans le modèle. L'amplitude entre l'instant initial et l'instant final forme le créneau. En fonction des fortes demandes d'arrivées et de départs de l'aéroport, les créneaux horaires constituent une ressource précieuse et convoitée par les compagnies aériennes surtout dans les périodes saturées.
Les demandes rencontrent des nombreuses fluctuations comme le montre la figure (5.1) : dans la journée (pics le matin et le soir), des mois creux en hiver et demande plus importante en été.

Les transporteurs aériens fournissent au coordonnateur les informations pertinentes qui composent la demande. Lorsqu'une demande ne peut pas être satisfaite dans un créneau, le coordonnateur en communique les raisons au demandeur et lui indique le créneau de remplacement le plus proche ou il lui propse de deservir dans un autre aéroport. Avant de confirmer les demandes des compagnies, le coordonnateur devrait se poser un certains nombre de questions telles que : en moyenne combien de demandes doit-il confirmer dans une période ? pour une journée ? pour une semaine ou pour la saison ? etc...

1. Nombre maximums d'opérations (atterrissages et décollages) pouvant être effectués dans un intervalle de temps de manière fluide avec un niveau constant de demande

Pour répondre à ces questions le coordonnateur doit satisfaire la contrainte de capacité durant les périodes concernées, les droits acquises entre les états et la loi du grand père.

5.3 Gestion optimale des créneaux

Dans cette section, nous proposons les deux modèles pour résoudre le problème d'attribution des créneaux, à savoir le modèle d'affectation des vols dans les périodes et le modèle d'ordonnancement des vols.

5.3.1 Modèle d'affectation dans les périodes

Le modèle d'affectation que nous proposons ici permet de maximiser les demandes des vols dans les périodes considérées. La capacité de l'aire de mouvement est la principale contrainte du problème. Nous considérons les notations mathématiques suivantes :

5.3.1.1. Notations Mathématiques utilisées :

- **I**=$\{1, 2, 3, ..., n\}$: Ensemble des périodes de demandes.
- A_i : Ensemble des avions qui ont formulé des demandes de mouvement dans la période $i \in I$.
- **K** : cadence horaire de l'aéroport, nombre maximum des vols par periode qui peuvent être servis par la piste.

5.3.1.2. Variables de décisions

Nous désignons par x_{ik}, les variables de décisions telles que $\forall i \in I$ et $k \in A_i$ on a :

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande de l'avion } k \in A_i \text{ dans la période } i \in I \text{ est confirmée.} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

X_i : Nombre de demandes non confirmées à la période $i \in I$,

$$X_i = |A_i| - \sum_{k \in A_i} x_{ik} \quad \forall i \in I$$

Les demandes non acceptées en $i \in I$ doivent être acceptées à la période suivante. Sous cette hypothèse, nous introduisons des contraintes logiques (5.1) imposant que si la demande n'est pas acceptée en i, elle doit l'être à la période $i+1 \in I$.

$$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1 \qquad \forall i \in I \quad et \quad k \in A_i \tag{5.1}$$

En réalité, ces demandes non acceptées en $i \in I$, s'ajoutent dynamiquement avec celles de la période $i+1$.

5.3.1.3. Formulation Mathématique

Pour déterminer le nombre maximum de demandes acceptées dans une période $i \in I$, nous proposons le modèle linéaire (5.2) suivant :

$$\max_{i \in I} \sum_{k \in A_i} x_{ik} \tag{5.2}$$

Sous les contraintes :

$$X_{i-1} + \sum_{k \in A_i} x_{ik} \leq K \qquad \forall i \in I \tag{5.3}$$

$$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{5.4}$$

$$X_i = |A| - \sum_{k \in A_i} x_{ik} \qquad \forall i \in I \tag{5.5}$$

$$x_{ik} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in I \forall k \in A_i \tag{5.6}$$

$$X_i \geq 0, \quad \forall i \in I \tag{5.7}$$

La fonction objectif (5.2) maximise le nombre de demandes dans les périodes souhaitées. Les contraintes (5.3) imposent que les demandes confirmées dans une période ne doivent pas dépasser la capacité horaire de l'aéroport. Ces sont des contraintes des capacités où la cadence K est désignée comme la capacité horaire de l'aéroport. Les contraintes (5.4) sont des contraintes logiques qui imposent que chaque demande doit être acceptée au plus dans une période. Les contraintes (5.6) et (5.7) sont des contraintes d'intégrités.

Nous désignons par V une séquence d'allocation de demandes obtenue à la période i, en particulier un vecteur dont les composantes sont les variables

$$x_{ik} = 1, \qquad i \in I \quad et \quad k \in A_i$$

Le vecteur V est une solution optimale du problème d'affection dans la période $i \in I$. En d'autres termes, le nombre de créneaux de la période $i \in I$ alloués aux compagnies aérienne doit être égale au $CardV$.

Conformément à la politique du premier arrivé-premier servis, nous introduisons des variables qui prennent en compte le temps du début et de fin de créneau afin d'ordonnancer les demandes dans les périodes. Chaque demande est affectée à un créneau et tous les créneaux sont fixés. Dans le modèle d'ordonnancement ci-dessous, V désigne l'ensemble des demandes confirmées par le premier modèle

5.3.2 Modèle d'ordonnancement dans les périodes

Le modèle d'ordonnancement que nous proposons permet de minimiser la marge de temps qui sépare l'heure prévue par la compagnie aérienne et le debut du créneau attribué. Nous considérons les notations mathématiques complementaires suivantes :

5.3.2.1. Notations Mathématiques utilisées

- $J = \{1, 2, ...j, ..., n\}$: Ensemble des créneaux sur l'horizon d'optimisation ; **K** : nombre maximum des vols dans l'horizon qui peuvent être servis par la piste.
- $V = \{v_1, v_2, ..., v_p, ...v_P\}$: Ensemble des vols acceptés dans l'horizon ;
- h^{v_p} : Heure prévue du vol $v_p \in V$.
- α : Le pas de séparation entre deux débuts des créneaux successifs.
- d_j : instant de début du créneau $j \in J$.

$$d_{j+1} = d_j + \alpha \tag{5.8}$$

- t_j : instant de fin du créneau $j \in J$.

– δ : Amplitude du créneau et tous les créneaux ont la même amplitude

$$\delta = t_j - d_j \tag{5.9}$$

Proposition 5.3.1. L'heure de début du j^{eme} créneau est donnée par la relation suivante ;

$$d_j = d_1 + (j-1)\alpha \qquad \forall j \in J \tag{5.10}$$

Démonstration. Un créneau dans une période est défini par son instant de début et son instant de fin. L'ensemble des créneaux forme l'horizon d'optimisation J comme l'indique la figure (5.1) suivante.

FIGURE 5.1 – Ensemble des créneaux

Selon la figure 5.1 ci-dessus,

$$J = \Big\{[d_j,\ d_j + \alpha[, [d_j + \alpha,\ d_j + \alpha + \delta[,\ [d_j + \alpha + \delta, d_j + \alpha + 2\delta[, ...\Big\}$$

où $d_{j+1} = d_j + \alpha$. C'est une suite numérique de raison α et de premier terme d_1, Par des itérations en utilisant la relation (5.8) nous en déduisons la relation $d_{k+1} = d_k + \alpha$

$$\begin{aligned}
&Pour \quad k = 1, \quad d_2 = \quad d_1 + \alpha \\
&Pour \quad k = 2, \quad d_3 = \quad d_2 + \alpha = d_1 + 2\alpha \\
&Pour \quad k = 3, \quad d_4 = \quad d_3 + \alpha = d_1 + 3\alpha \\
&\qquad\qquad \vdots \quad = \quad \vdots \qquad\quad \vdots \\
&pour \quad k = j-1 \quad = \quad d_j = d_{j-1} + \alpha = d_1 + (j-1)\alpha
\end{aligned} \tag{5.11}$$

En simplifiant l'écriture, nous obtenons la rélation : $d_j = d_j + (j-1)\alpha$ □

Proposition 5.3.2. En désignant δ comme l'amplitude d'un créneau, nous

obtenons l'heure finale du j^{eme} créneau par la relation(5.12) suivante :

$$t_j = d_1 + (j-1)\alpha + \delta \qquad \forall j \in J \tag{5.12}$$

Démonstration. Comme les amplitudes δ des créneaux sont égaux pour toute l'horizon d'optimisation, d'après l'équation (5.9, nous avons dans ce cas : $\delta = t_j - d_j$; entraine que $t_j = d_j + \delta$. Nous remplaçons l'expression de d_j et nous obtenons $t_j = d_1 + (j-1)\alpha + \delta$ □

– $\Delta_j^{v_p}$: écart entre l'heure prévue du vol $v_p \in V$ et le début de son créneau $j \in J$ attribué

$$\Delta_j^{f_j} = h^{v_p} - d_j \qquad \forall v_p \in V \qquad \forall j \in J \tag{5.13}$$

5.3.2.2. Variables de décisions :

Pour imposér les créneaux aux compagnies aériennes, nous designons par $z_j^{v_p}$ la variable de decision telle que :

$$z_j^{v_p} = \begin{cases} 1 & \text{Si le créneau } j \in J \text{ est attribué au vol } v_p \in V \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Il est plus interessant d'atterir au début du créneau pour profiter severement de la fénêtre de temps qui lui est attribué.

5.3.2.3. Fonction objectif

La fonction objectif (5.14) minmise la somme des écarts entre les heures demandées et les débuts des créneaux attribués.

$$\min \sum_{v_p \in V} \sum_{j \in J} \Delta_j^{v_p} z_j^{v_p} \tag{5.14}$$

sous les contraintes :

$$\sum_{v_p \in V} z_j^{v_p} = 1 \qquad \forall j \in J \tag{5.15}$$

$$\sum_{j \in J} z_j^{v_p} \leq K \quad \forall v_p \in V \tag{5.16}$$

$$d_j z_j^{v_p} \leq h^{v_p} z_j^{v_p} \quad \forall v_p \in V \tag{5.17}$$

$$si\ h^{v_p} \prec h^{v'_p} \qquad \Rightarrow z_j^{v_p} > z_j^{v'_p} \qquad v_p, v'_p \in V \tag{5.18}$$

$$d_j = (d_1^{v_1} + (j-1)\alpha) z_j^{v_p} \quad \forall v_p \in V \tag{5.19}$$

$$t_j = (d_1^{v_1} + (j-1)\alpha + \delta) z_j^{v_p} \quad \forall v_p \in V, \tag{5.20}$$

$$z_j^{v_p} \in \{0; 1\} \quad \forall v_p \in V \tag{5.21}$$

Dans ce modèle la fonction objectif (5.14) minimise les écarts entre l'heure prévue et le début du créneau attribué. La contrainte 5.15) montre qu'un créneau ne peut être affecté qu'à un seul vol. Les contraintes (5.16) sont des contraintes de limitation. Elles montrent que le nombre de créneaux ne doivent pas depasser le la capacite maximale de vol qui peuvent être servis par la piste dans l'horizon d'optimisation. Les contraintes (5.17), (5.18) sont de contraintes de précedences. Les contraintes (5.17) montrent que l'heure de début du créneau $j \in J$ attribué au vol $v_p \in V$ précède toujour l'heure prévus du vol $v_p \in V$, par contre les contraintes (5.18) montrent que si l'heure prévue de vol $v_p \in V$ precède l'heure prévue du vol $v'_p \in V$ alors l'heure de début du créneau $j \in J$ attribuée au vol v_p précède l'heure de début du vol $v'_p \in V$ attribuée au créneau $k \in J$. Les contraintes (5.19) et (5.20) sont des contraintes d'affectations. Elles déterminent l'heure de début et l'heure finale du créneau $j \in V$ attribuée au vol $v_p \in V$. Les contraintes (5.21) garantissent l'intégrité des variables de décision $z_j^{v_p}$.

5.4 Algorithmes de résolutions

Pour la résolution de nos modèles développés ci-dessus, nous avons élaboré l'algorithme (3) pour le problème d'affectation et l'algorithme (4) pour le problème d'ordonnancement.

5.4.1 Algorithme pour le problème d'affectation

Pour la résolution du problème d'affectation, nous avons élaboré l'algorithme (3) suivant.

Algorithm 3 Résolution du Problème d'affectation

ENTRÉES:

I : Ensemble des intervalles de demandes.

A_i : Nombre de demandes des mouvements de la période $i \in I$.

X_i : Nombre de demandes non confirmées à la période $i \in I$.

Variable de décision :

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la demande de l'avion } k \in A_i \text{ dans la période } i \in I \text{ est confirmée.} \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

DEBUT: $X_1 = 0$,

POUR $i \in I$ **FAIT**

POUR $k \in A_i$ **FAIT**

SI $X_{i-1} + \sum_{k \in A_i} x_{ik} \leq K$ **ALORS**

$V = \max_{i \in I} \{\sum_{k \in A_i} x_{ik}\}$

$X_i = |A_i| - \sum_{k \in A_i} x_{ik}$

FIN SI

$x_{ik} + x_{i+1\,k} = 1$

FIN POUR

FIN POUR

5.4.2 Algorithme pour le problème d'ordonnancement

Pour la résolution de ce modèle, nous avons élaboré l'algorithme (4) suivant. L'instant initial et l'instant final d'un créneau sont fixés. Nous désignons par $J = \{1, 2, .., j, ..n\}$: Ensemble des créneaux de l'horizon d'optimisation. $V = \{v_1, v_2, .., v_p, ..v_P\}$ désigne l'ensemble des vols accepté. On désigne aussi par K comme le nombre de mouvements

Algorithm 4 Résolution du problème d'ordonnancement

ENTRÉES:

h^{v_p} : instant prévue du vol $v_p \in V$.
d_j : Heure de début du créneau $j \in J$.
t_j : Heure finale du créneau $j \in J$.
δ : Amplitude d'un créneau
α : un paramètre qui sépare deux débuts des créneaux successifs ;
Déterminer l'instant initial du créneau : $d_j = d_1 + (j-1)\alpha \qquad \forall j \in J$
Déterminer l'instant finale du créneau : $\quad t_j = d_1 + (j-1)\alpha + \delta \quad \forall j \in J$
Variables de décision :

$$z_j^{v_p} = \begin{cases} 1 & \text{Si le créneau } j \in J \text{ de la période i est attribué au vol } f_j \in V \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

$\Delta_j^{v_p}$: écart entre l'heure prévue du vol v_p et le début de son créneau $j \in J$ attribué. $\Delta_j^{v_p} = h^{v_p} - d_j \qquad \forall v_p \in V \qquad \forall j \in J$

DEBUT:
POUR $j \in J$ **FAIT**
POUR $v_p \in V$ **FAIT**
$\sum_{v_p \in V} z_j^{v_p} = 1$
$\sum_{j \in J} z_j^{v_p} \leq K$
SI $h^{v_p} \prec h^{v'_p}$ **ALORS**
$z_j^{v_p} > z_j^{v'_p}$
SINON
$d_j z_j^{v_p} \leq h^{v_p} z_j^{v_p}$
FIN SI
Déterminer l'écart : $\sum_{v_p \in V} \sum_{j \in J} \Delta_j^{v_p} z_j^{v_p}$
FIN POUR
$d_j = \left[d_1^{v_1} + (j-1)\alpha\right] z_j^{v_p}$
$t_j = \left[d_1^{v_1} + (j-1)\alpha + \delta\right] z_j^{v_p}$
FIN POUR

5.5 Application du modèle avec des données réelles de l'AIBD

Toutes les expériences ont été exécutées sur un ordinateur de marque Dell avec Intel(R) core(TM)i5-6200U CPU @2.30GHz 2,40GHz de microprocesseur, de 8.00Go de mémoire RAM, de 1TB de disque dur et fonctionnant

sur une plate forme Windows 10, Edition Famille à 64 bits.

5.5.1 Données utilisées

Dans cette section, afin d'évaluer la performance de nos modèles, nous avons utilisé les données de l'aéroport International Blaise Diagne ; Le nouveau aéroport du Sénégal inauguré le 7 décembre 2017.

Les données utilisées lors de nos expérimentations sont extraites du diagramme de créneaux horaires de l'aéroport international Blaise Diagne du mois de janvier 2018, plus particulièrement le jeudi 6 janvier 2018 entre 20h et 21h. Le tableau ci-dessous résume ces données. Ce diagramme est élaboré par l'Agence Nationale de l'Aviation Civil et de la Météorologie du Sénégal (ANACIM).

TABLE 5.2 – Demandes du Jeudi 6 janvier 2018 de 20h00 à 21h00

Période i	N° du vol	Heure.prévue [20h, 21h]
$[20h00, 21h00]$	KP97	20h10
	AEA13	20h15
	IST/NK	20h20
	SS990	20h28
	AF718	20h30
	TP14	20h36
	KP28	20h40
	SAA	20h47
	AF718	20h48
	IB69	20h58

Les colonnes (1), (2) et (3) du tableau répresentent respectivement la période le numéro de vol déclaré par la compagnie et l'heure prévue [2] d'atterrissage ou de décollage de l'aéroport dans la période.

2. Heures misent en accord par les compagnies aériennes et les coordonnateurs lors de la demande

5.5.2 Résultats de l'expérimentation

Pour cette expérimentation, le temps de séparation entre deux débuts de créneaux est $\alpha = 4min$. Les propositions (5.3.1), et (5.3.2), nous permettent d'obtenir les créneaux horaires sur la période $[20h00, 21h00[$ résumé dans la colonne (3) du tableau ci-dessous. Nous allouons à chaque vol acceptée une heure de début et une heure de fin comme le montre le résutat du tableau (5.3) ci-dessous.

TABLE 5.3 – Planning horaire élaboré

N° du vol	H.prévue	Créneaux [20h00, 21h00[	Marge en min
–	–	$[20h00, 20h15]$	–
–	–	$[20h04, 20h19]$	–
KP97	20h10	$[20h08, 20h23]$	2
AEA13	20H15	$[20h12, 20h27]$	3
ISTK/NK	20h20	$[20h16, 20h31]$	4
–	–	$[20h20, 20h35]$	–
SS990	20h28	$[20h24, 20h39]$	4
AF718	20h30	$[20h28, 20h43]$	2
–	-	$[20h32, 20h47]$	–
TP14	20H36	$[20h36, 20h51]$	0
KP28	20H40	$[20h40, 20h55]$	0
SAA	20H47	$[20h44, 20h59]$	3
AF718	20h48	$[20h48, 21h03[$	0
–	–	$[20h52, 21h07[$	–
IB69	20h58	$[20h56, 21h11[$	2
Total			20

L'écart total entre les heures prévues par les compagnies et les créneaux imposés est égale à 20min. Plusieurs créneaux sont libres dans la période, on peut toujour affecter d'autre vol dans la période.

5.5.3 Intérpretation

Le système d'élaboration des créneaux dans un aéroport doit être appliqué dans un aéroport où il y a une très forte demandes d'arrivées et de

départs dans une période. Plusieurs créneaux ne sont pas utilisés ou attribués. Le système nous permet de passer de 9mouvements prévus par heures à 15 mouvements par heures.

Ce système impose encor un autre système parallèle comme le marché secondaire ou l'échange combinatoire des créaneaux pour pouvoir assurer le bon équilibre du système aéroportuaire. Une manière de trouver une concession entre les compagnies concurrentes pour échanger les créneaux entre eux.

5.6 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre deux modèles complémentaires de programmation linéaire en nombre entier pour la résolution du problème d'attribution des créneaux horaires aéroportuaires. La capacité aéroportuaire est un facteur déterminant pour l'attribution des créneaux. Dans ce chapitre, nous l'avons assimilé à la cadence horaire afin de gérer efficacement le trafic des avions. Du point de vue pratique, le premier modèle permet de maximiser les demandes formulées par les compagnies aériennes six mois en avance, en tenant compte de la capacité des pistes des aéroports. Il s'agit de la résolution d'un problème d'affectation avec contraintes de capacité. Ce modèle garantit l'affectation d'un créneau horaire à chaque demande confirmée dans la période de l'horizon de temps. Pour mieux gérer le trafic aérien, les contrôleurs doivent imposer en temps réel des attentes à certains vols en cas de déséquilibre du trafic. Du point de vue exécution, le deuxième modèle permet de minimiser le retard mis par un vol et les attentes imposées par les contrôleurs . Ce modèle permet également d'assurer une répartition optimale des vols en attribuant un créneau pour chaque demande confirmée. Il s'agit d'un problème d'ordonnancement des vols dans les périodes.

Nous avons évalué les performances de nos modèles en utilisant les données réelles de l'AIBD (Aéroport International Blaise Diagne) du Sénégal. Les résultats obtenus montrent la performance de nos modèles en termes d'optimisation de créneaux horaires aéroportuaires. Ces résultats montrent également une utilisation efficace des ressources temporelles lors de la gestion

du trafic aérien dans un aéroport à contrainte de capacité. Néanmoins tout créneau dont son propriétaire vient en retard est perdu, il est donc question de proposer un mécanisme qui doit prendre en compte ces créneaux perdue dans la période.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Sommaire

6.1 Conclusion 83
6.2 Résumé des résultats 85
6.3 Limites 86
6.4 Perspectives 86

6.1 Conclusion

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux problèmes d'attribution des créneaux horaires d'aéroport. Les créneaux aéroportuaires et la capacité d'un aéroport sont deux indicateurs indissociables qui génèrent des problèmes majeurs dans les opérations du trafic aérien. Les deux problèmes sont des problèmes pratiques que rencontrent les exploitants d'aéroports. Nos contributions, pour accompagner les exploitants d'aéroports pour une gestion optimale de la capacité de l'aéroport et pour une affectation optimale des créneaux, ont porté sur différentes thèmes de la Recherche Opérationnelle tels que la programmation linéaire en nombres entiers, la programmation dynamique.

Tout d'abord, nous avons commencé à définir les différentes configurations des Aéroports du Sénégal, plus particulièrement l'aéroport de Da-

kar et l'Aéroport International Blaise Diagne. Ensuite, nous avons apporté nos contributions pour résoudre les problèmes d'attributions des capacités d'aéroport. Dans la première partie de la thèse, nous avons montré que la capacité est un facteur déterminant de l'attribution des créneaux horaires d'aéroport. Nous avons eu à élaborer deux modèles dans cette partie. Le premier modèle est basé sur la programmation linéaire en nombres entiers. Dans ce modèle, toute demande non accepté est perdue. Nous avons ensuite réalisé une extension de ce modèle par la programmation dynamique en prenant en compte les demandes non acceptées d'une période à celle suivante. Les deux modèles ont permis de maximiser les vols dans les périodes en tenant compte de la capacité de l'aire de mouvement et de la capacité du terminal passager. Ces deux modèles ont fait l'objet de notre premier article intitulé : **Modélisation et résolution du problème d'allocation des capacités par la programmation Dynamique : Application à l'aéroport de Dakar**[24]. Cet article a été publié en 2017 dans *Journal of Mathematics Research*, Journal indexé et abstracté dans Zentralblatt Math.

La capacité d'un aéroport est un élément d'aide à la décision dans le cadre de la planification et de la coordination des aéroports. De manière générale, c'est une quantité qui limite le nombre de mouvement dans un aéroport. Dans la deuxième partie de la thèse, nous avons assimilé cette capacité à celle de l'aire de mouvement, puisque c'est à ce niveau que se présente les mouvements des aéronefs. Nous avons eu à élaborer trois modèles.

Un premier modèle issu de la programmation dynamique qui maximise les vols sous la contrainte de la capacité de l'aire de mouvement. Un deuxième modèle qui ordonnance tous les vols acceptés par le premier modèle en lui attribuant une heure début d'arrivée et une heure finale. Il s'agit d'un modèle d'attribution de créneaux qui associe les créneaux aux vols confirmés par le modèle ci-dessus.

Les deux modèles ont fait l'objet de notre deuxième article intitulé : **Optimisation des créneaux horaires aéroportuaires pour la gestion du trafic aérien**[23]. Cet article a été publié en 2018 dans *Journal of Mathematics Research*. Nous avons élaboré un algorithme pour chaque modèle qui nous a permis de faire les simulations avec le logiciel Cplex.

Une fois qu'un créneau est acquis par une compagnie aérienne, il devient le propriétaire à condition de bien l'exploiter sous les normes de l'association international de transporteur aérien. Cependant, il peut aussi l'échanger avec un concurrent si ce dernier bien sûr n'est pas en concordance avec ses planning. D'autres compagnies préfèrent négociées en temps réel avec leurs concurrents si un retard se présente : c'est l'échange combinatoire de créneaux. Nous avons enfin élaborer un dernier modèle qui minimise les coûts de pénalité si une compagnie accepte cette échange combinatoire. Ce modèle fait aussi l'objet d'un article à publier.

6.2 Résumé des résultats

Pour les deux premiers modèles, c'est-à-dire les premiers modèles d'attribution des capacités, nous avons élaboré un algorithme qui nous a permis de réaliser la simulation avec le logiciel Cplex. L'objectif de ces deux premiers modèles est de maximiser les vols dans l'horizon d'optimisation en tenant compte des caractéristiques de l'aéroport à savoir la capacité de l'aire de mouvement et la capacité du terminal passager. Des données réelles de l'aéroport de Dakar ont été utilisées pour expérimenter la programmation linéaire en nombres entiers et la programmation dynamique avec contraintes des capacités. Pour le troisième et quatrième modèle, c'est-à-dire le modèle de programmation dynamique avec contraintes, la capacité de l'aire de mouvement et le problème d'attribution des créneaux, nous avons élaboré un algorithme pour chacun. D'ailleurs, cela nous a permis de réaliser la simulation avec le logiciel Cplex. Nous avons émis deux propositions dans ce dernier modèle pour calculer et fixer les créneaux dans chaque période. Dans ce modèle d'attribution des créneaux, la fonction objectif minimise les retards des vols et le délais d'attente imposés par les contrôleurs jusqu'à l'obtention d'un créneau libre. Des données réelles de l'aéroport international Blaise Diagne ont été utilisées pour expérimenter nos deux modèles.

Après simulation, nous avons remarqué que plus les vols ayant les créneaux acquis, font des retards le long de la période, plus le système d'attribution devient de plus en plus inutile. Il faut dans ce cas imposer le respect du système par la mise en place des créneaux secondaires ou tolérer

l'échange combinatoire des créneaux.

6.3 Limites

La saturation des aéroports est un problème qui préoccupe les transporteurs aériens en général et en particulier le Sénégal. L'attribution des créneaux pour tout transporteur aérien est un système efficace et capable d'apporter beaucoup de solutions au bon fonctionnement des aéroports. Beaucoup de solution proposées jusqu'ici ne font pas l'unanimité dans la communauté scientifique. En conséquence, nos contributions, dans le cadre de cette thèse, ont apportée des éléments de solutions à certaines des problématiques abordées. Toutefois, notre travail comporte des limitations dues aux plate-formes de simulation utilisées et à la nature du sujet abordé.
Une première limitation, puisque ici, nous ne pouvons pas parler des créneaux sans capacités. De plus, il est difficile de mener une étude globale sur les créneaux et sur la capacité d'aéroport.

La capacité est une quantité qui limite l'écoulement des flux. A chaque fois qu'elle est dépassée, elle affecte la fluidité des opérations. Du point de vue pratique, elle est composée de sous-systèmes ayant chacun une sous-capacité avec les normes exigés par le transporteur aérien international. En conséquence, la limitation de la capacité pose un problème du fait de la variabilité des flux aux zones d'arrivées et de départs.

6.4 Perspectives

Comme tout travail scientifique, nous ne pouvons pas conclure cette thèse sans envisager les perspectives. Ces perspectives sont nombreuses vu l'importance de la capacité et des créneaux dans un aéroport. D'abord, en terme de capacité d'accueil, nous avons considéré un aéroport avec une seul piste. Nous souhaitons alors étendre nos modèles pour assurer la gestion des créneaux horaires et de capacité dans le cas d'un aéroport à deux ou plusieurs pistes. Nous comptons également introduire des critères d'affectations dans les pays qui disposent de deux ou plusieurs aéroports internationaux. Nous souhaitons également séparer les atterrissages et les décollages d'une

autre des vols dans les modèles d'attributions des créneaux.

En terme d'implémentation, nous envisageons alors de prendre en compte les données complètes d'une journées afin d'élaborer un planning aéroportuaire hebdomadaire, mensuel voir saisonnière. Finalement, nous envisageons de définir une fonction économique globale multi-objective. Cette fonction permettra d'optimiser simultanément plusieurs caractères liés aux problèmes de gestion de trafic avec contraintes de capacité, de temps et des coûts.

ANNEXE

Ci-dessous vous avez les resultats complet obtenue lors de l'implementation du modèle d'attribution des postes de stationnements. Les données utilisée sont celle de l'ancien aéroport international de Dakar observé pour une journée de trafic. Le programme a été développé en langage JAVA. Le code se présente sous la forme de plusieurs fichiers correspondant chacun à un des modules de programme.
L'algorithme utilisé pour trouver le coût retards est de Branch and Bound avec quelques modifications

TABLE 1 – Résultats de la simulation du modèle d'attribution des postes de stationements

I	H arrive	H depart	Xai	Ydi	Xaei	Ydei	Rai	Rdi	Cvi	Coci
0	0:00	0:30	6	6	6	6	0	0	10	19
1	0:30	1:00	10	7	10	7	0	0	10	19
2	1:00	1:30	2	4	2	4	0	0	7	22
3	1:30	2:00	0	8	0	8	0	0	9	20
4	2:00	2:30	1	2	1	2	0	0	17	12
5	2:30	3:00	1	0	1	0	0	0	18	11
6	3:00	3:30	0	0	0	0	0	0	17	12
7	3:30	4:00	0	1	0	1	0	0	17	12
8	4:00	4:30	0	0	0	0	0	0	18	11
9	4:30	5:00	0	0	0	0	0	0	18	11
10	5:00	5:30	2	0	2	0	0	0	18	11
11	5:30	6:00	5	0	5	0	0	0	16	13
12	6:00	6:30	2	2	2	2	0	0	11	18
13	6:30	7:00	2	4	2	4	0	0	11	18
14	7:00	7:30	4	4	4	4	0	0	13	16
15	7:30	8:00	0	9	0	9	0	0	13	16
16	8:00	8:30	2	7	2	7	0	0	22	7
17	8:30	9:00	0	2	0	2	0	0	27	2
18	9:00	9:30	0	0	0	0	0	0	29	0
19	9:30	10:00	8	0	8	0	0	0	29	0
20	10:00	10:30	0	4	0	4	0	0	21	8
21	10:30	11:00	0	6	0	4	0	2	25	4
22	11:00	11:30	0	0	0	0	0	0	29	0
23	11:30	12:00	2	2	2	0	0	2	29	0
24	12:00	12:30	2	0	2	0	0	0	27	2
25	12:30	13:00	0	2	0	2	0	0	25	4
26	13:00	13:30	0	0	0	0	0	0	27	2
27	13:30	14:00	6	0	6	0	0	0	27	2
28	14:00	14:30	4	6	4	6	0	0	21	8
29	14:30	15:00	2	2	2	2	0	0	23	6
30	15:00	15:30	0	2	0	2	0	0	23	6
31	15:30	16:00	6	2	6	2	0	0	25	4
32	16:00	16:30	2	0	2	0	0	0	21	8
33	16:30	17:00	0	6	0	6	0	0	19	10
34	17:00	17:30	0	2	0	2	0	0	25	4
35	17:30	18:00	4	0	4	0	0	0	27	2
36	18:00	18:30	4	0	4	0	0	0	23	6
37	18:30	19:00	0	2	0	2	0	0	19	10
38	19:00	19:30	2	4	2	4	0	0	21	8
39	19:30	20:00	4	4	4	4	0	0	23	6
40	20:00	20:30	0	6	0	6	0	0	23	6
41	20:30	21:00	6	2	6	0	0	2	29	0
42	21:00	21:30	0	0	0	0	0	0	23	6
43	21:30	22:00	0	2	0	2	0	0	23	6
44	22:00	22:30	0	2	0	2	0	0	25	4
45	22:30	23:00	2	2	2	2	0	0	27	2
46	23:00	23:30	6	2	6	2	0	0	27	2
47	23:30	00:00	0	0	0	0	0	0	23	6
TOTAUX			97	116	97	110	0	6	1010	382

BIBLIOGRAPHIE

[1]

[2] *Alidou. Méthodologie d'évaluation de la capacité de l'aire de mouvement et gestion automatique de l'aire de trafic. Application à l'aéroport de Dakar, 2007. EAMAC.* PhD thesis.

[3] *Allignol, Cyril. Planification de trajectoires pour l'optimisation du trafic aérien. INPT, 2011.* PhD thesis.

[4] *Coumba Diallo. Problèmes d'optimisation de structures : Applications en élasticité et au transport aérien, UCAD, 2013.* PhD thesis.

[5] *Gianazza, David. Optimisation des flux de trafic aérien. INPT, 2004.* PhD thesis.

[6] *Gotteland, Jean-Baptiste. Optimisation du trafic au sol sur les grands aéroports. Ecole Nationale de l'Aviation Civile. 2004.* PhD thesis.

[7] *http ://www.prism.uvsq.fr/mogue/cours/Gestion des opérations. Chapitre 19.pdf. Les files d'attente, Objectifs d'apprentissage.*

[8] *Jackou, Rakiatou Christelle. Contribution à la Gestion des Opérations de la Sûreté Aéroportuaire : Modélisation et Optimisation. Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.* PhD thesis.

[9] Manuel de capacité du système aéroportuaire ; service technique des bases aériennes : Juillet. 1975.

[10] *Manuel de la réglementation de transport aérien international, Deuxième édition-2004.*

[11] *N. Nelio. Localisation Optimale de Hubs et Taille Optimale d'une Flotte en Vue d'une Mise en Place d'une Compagnie Aérienne en Zone UEMOA., UCAD. 2016.* PhD thesis.

[12] Olivier cately, jerome rodriguez. détermination de la capacité d'un aéroport. rapport du service de base aérienne europeen. 2005.

[13] *PAPADIMITRIOU. Christos H. and KENNETH Steiglitz Combinatorial optimization. Dover, 1998.*

[14] *Politique et éléments indicatifs sur la réglementation économique du transport aérien International. Troisième édition-2008. OACI.*

[15] *Programmmation mathématique. Tome 1 : théories et algorithmes, Collection technique et scientifique des télécommunications.MINOUX.1983.*

[16] *Programmmation mathématique Tome 2 : théories et algorithmes, Collection technique et scientifique des télécommunications. MINOUX. 1989.*

[17] Theory of linear and integer programming. a. schrijver, wiley, sons, john wiley & sons. 354-357. (12). 1986.

[18] Youssouf. problème d'attribution de poste de stationnement : Application à l'aéroport de dakar. master, 2014. ucad.

[19] *Zagaye. Développement stratégique : cas de l'aéroport d'Oran, 2012, Université d'Oran.* PhD thesis.

[20] *Finte Queuing Table.* New York, John Wiley & sons, 1958.

[21] *TEGHEM JACQUES. Programmation Linéaire.* 1996.

[22] Aguir, M. S., Karaesmen, F., Aksin, O., and Chauvet, F. Analyse du probleme des rappels et dimensionnement dans un centre d'appels. In *Proceedings of MOSIM* (2003), vol. 3.

[23] Ahamada, Diagne, S. G., Kone, B., Gningue, Y., et al. Optimization of time slots for the air-traffic management. *Journal of Mathematics Research 10*, 4 (2018), 39.

[24] Ahamada, Y., Diagne, S. G., Coulibaly, A., Gningue, Y., et al. Modeling and resolution of the allocation problem of the time

slots in dakar airport. *Journal of Mathematics Research 9*, 3 (2017), 30.

[25] BANEGE, L. Banege, files d'attente, lionel 2004.

[26] Barnier, N., and Brisset, P. Allocation de créneaux pour la régulation du trafic aérien. In *JFPLC 2000, Journées Francophones de Programmation Logique et Programmation par Contraintes* (2000), pp. pp–xxxx.

[27] Biswas, A. K. Integrated water resources management : a reassessment : a water forum contribution. *Water international 29*, 2 (2004), 248–256.

[28] Caprara, A., Toth, P., and Fischetti, M. Algorithms for the set covering problem. *Annals of Operations Research 98*, 1-4 (2000), 353–371.

[29] Castelli, L., Pesenti, R., Ranieri, A., et al. Allocating air traffic flow management slots. *Department of Applied Mathematics, University of Venice, Woking Paper*, 191 (2009).

[30] Chabert, M., Champin, P.-A., Cordier, A., and Solnon, C. Comparaison de différents modèles de programmation par contraintes pour le clustering conceptuel. In *Treizièmes journées Francophones de Programmation par Contraintes* (2017).

[31] Charon, I., Germa, A., and Hudry, O. *Méthodes d'optimisation combinatoire*. Masson Paris, 1996.

[32] Crozet, Y., and Lawson, F. La commercialisation des créneaux aéroportuaires : une fausse bonne idée ? *Transports*, 399 (2000), pp–26.

[33] Davis, P., and Ray, T. A branch-bound algorithm for the capacitated facilities location problem. *Naval Research Logistics (NRL) 16*, 3 (1969), 331–344.

[34] Desrosiers, J., Pelletier, P., and Soumis, F. Plus court chemin avec contraintes d'horaires. *RAIRO-Operations Research 17*, 4 (1983), 357–377.

[35] Droesbeke, F., Hallin, M., Lefevre, C., and Lefèvre, C. *Programmation linéaire par l'exemple*. Edition Marketing, 1986.

[36] Dubois, D., and Prade, H. Algorithmes de plus courts chemins pour traiter des données floues. *RAIRO-Operations Research 12*, 2 (1978), 213–227.

[37] Fukui, H. An empirical analysis of airport slot trading in the united states. *Transportation Research Part B : Methodological 44*, 3 (2010), 330–357.

[38] Gilbo, E. Arrival/departure capacity tradeoff optimization : a case study at the st. louis lambert international airport (stl). In *Proc. of the Air Traffic Management R&D Seminar* (2003).

[39] Gilbo, E., and Howard, K. Collaborative optimization of airport arrival and departure traffic flow management strategies for cdm. In *3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar* (2000), pp. 13–16.

[40] Gilbo, E. P. Airport capacity : Representation, estimation, optimization. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on 1*, 3 (1993), 144–154.

[41] Gondran, M. Un algorithme de coupes en programmation en nombres entiers. *Mémoires de la Société Mathématique de France 49*, 50 (1977), 93–100.

[42] Idrissi, A., and Li, C. M. Cspac : un modèle de résolution du problème d'allocation de capacités. In *MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC* (2005), pp. 172–179.

[43] Jozefowiez, N. *Modélisation et résolution approchée de problèmes de tournées multi-objectif*. PhD thesis, Lille 1, 2004.

[44] Kleit, A. N., and Kobayashi, B. H. Market failure or market efficiency : Evidence on airport slot usage. *Research in Transportation Economics 4* (1996), 1–32.

[45] Land, A. H., and Doig, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica : Journal of the Econometric Society* (1960), 497–520.

[46] Le Ny, L.-M. *Probabilité stationnaire d'une file d'attente à 2 seuils*. PhD thesis, INRIA, 1987.

[47] Lenoir, N. Congestion et créneaux aéroportuaires. In *CEDECE 2004, Colloque de la Commission pour l'Étude des Communautés Européennes* (2004), pp. pp–377.

[48] Maldoom, D. Auctioning capacity at airports. *Utilities policy 11*, 1 (2003), 47–51.

[49] Mancel, C. *modélisation et résolution de problèmes d'optimisation combinatoire issus d'applications spatiales*. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2004.

[50] Nelio, N., Diagne, S. G., and Gningue, Y. Optimal two hubs location and network construction for a regional company of waemu zone. *Journal of Mathematics Research 8*, 2 (2016), 49.

[51] Pellegrini, P., Castelli, L., and Pesenti, R. Secondary trading of airport slots as a combinatorial exchange. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review 48*, 5 (2012), 1009–1022.

[52] Pesic, B. Optimisation de la circulation des aéronefs au sol. *rapport de* (2000).

[53] Pujolle, G., and Fdida, S. *Modèles de Systèmes et de Réseaux : Tome 2, Files dáttente*. Eyrolles Paris, 1989.

[54] Quadrat, J. P. Théoremes asymptotiques en programmation dynamique. *Note CRAS 311* (1990), 745–748.

[55] R. Marceline Faye, F. M.-C. Une approche globale d'évaluation de la capacité aéroportuaires. *Conferance Paper, April 2006*.

[56] RELATIFS, A. D. L. L. Conférence mondiale de transport aérien : Défis et promesses de la libéralisation montréal, 24–29 mars 2003.

[57] Robert, P. *Réseaux et files d'attente : méthodes probabilistes*. 2000.

[58] RODF. *ROADF : La Recherche Opérationnelle en France. 2011*. Masson Paris, 2011.

[59] Roussignol, M., and Flipo, D. Files d'attente et fiabilité. *DESS Ingénierie statistique et numérique, Université de Lille* (2004).

[60] Sandholm, T. Algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions. *Artificial intelligence 135*, 1-2 (2002), 1–54.

[61] Sandholm, T., and Suri, S. Side constraints and non-price attributes in markets. *Games and Economic Behavior 55*, 2 (2006), 321–330.

[62] Sandholm, T., Suri, S., Gilpin, A., and Levine, D. Cabob : A fast optimal algorithm for combinatorial auctions. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence* (2001), vol. 17, LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES LTD, pp. 1102–1108.

[63] service technique de l'aviation civil. *Capacités aérogares*. www.stac.aviation-civile.gouv.fr.

[64] service technique de l'aviation civil. *Comment quantifier et modéliser le dimensionnement d'un composent d'un aéroport ?* www.stac.aviation-civile.gouv.fr, 2007.

[65] Simsek, T., Jain, R., and Varaiya, P. Scalar estimation and control with noisy binary observations. *IEEE Transactions on Automatic Control 49*, 9 (2004), 1598–1603.

[66] Stoica, D. C. Analyse, représentation et optimisation de la circulation des avions sur une plate-forme aéroportuaire.

[67] Yan, S., and Huo, C.-M. Optimization of multiple objective gate assignments. *Transportation Research Part A : Policy and Practice 35*, 5 (2001), 413–432.

[68] Yan, S., Shieh, C.-Y., and Chen, M. A simulation framework for evaluating airport gate assignments. *Transportation Research Part A : Policy and Practice 36*, 10 (2002), 885–898.