



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE
Faculté des Sciences et Techniques
Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques

Formation Doctorale : Mathématiques et Physiques Appliquées

THÈSE

Présentée par

DABACHINE YASSINE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Discipline : INFORMATIQUE

Spécialité : INFORMATIQUE

***Conception et mise en place d'un système de prédiction dans les aéroports
basé sur la théorie des graphes***

Soutenue le Samedi 13 Novembre 2021 à 12h devant la commission d'examen:

Pr. Said SAFI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.P Béni-Mellal, Maroc	Président
Pr. Karim EL MOUTAOUAKIL	Professeur, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, F.P Taza, Maroc	Rapporteur
Pr. Mohamed BASLAM	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr. Lekbir AFRAITES	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni-Mellal, Maroc	Rapporteur
Pr. Rachid EL AYACHI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.S.T Béni-Mellal, Maroc	Examineur
Pr. Nouredine FALIH	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.P Béni-Mellal, Maroc	Examineur
Pr. Abdessamad BALOUKI	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, E.S.T Béni-Mellal, Maroc	Directeur de Thèse
Pr. Belaid BOUIKHALENE	Professeur, Université Sultan Moulay Slimane, F.P Béni-Mellal, Maroc	Co-Directeur de Thèse

*A mes parents et à ma famille qui
se sont sacrifiés pour mes études.*

*A mes deux petits choux d'amour qui m'ont aidé à aller de l'avant.
Sans oublier tous mes amis qui m'ont encouragé et soutenu
jusqu'au bout.*

*Un grand merci à mon épouse, pour son soutien moral
Et pour sa patience pendant toute cette période.*

Cette thèse a été réalisée à l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal au sein du Laboratoire d'Innovation en Mathématiques et Applications et Technologies de l'Information (LIMATI) de la Faculté Polydisciplinaire (FP) sous la direction du professeur Belaïd BOUIKHALENE et du Laboratoire de Génie Industriel de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) sous la direction du professeur Abdessamad BALOUKI.

Remerciements

Cette thèse a été réalisée à l'Université Sultan Moulay Slimane de Béni Mellal au sein du Laboratoire d'Innovation en Mathématiques et Applications et Technologies de l'Information (LIMATI) de la Faculté Polydisciplinaire (FP) sous la direction du professeur Belaïd BOUIKHALENE et du Laboratoire de Génie Industriel de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) sous la direction du professeur Abdessamad BALOUKI. Je tiens à leur témoigner ici toute ma reconnaissance pour leur disponibilité et leurs précieux conseils.

Je tiens également à faire part de toute ma gratitude au professeur Mohammed BINIZ qui a dirigé une partie de mon travail et m'a longuement encouragé.

Je remercie tous les membre du Laboratoire d'Innovation en Mathématiques et Applications et Technologies de l'Information (LIMATI) et du Laboratoire de Génie Industriel.

Je remercie également tous mes amis et mes proches qui, de près ou de loin, m'ont aidé et encouragé lorsque cela s'est avéré nécessaire. Je les remercie pour tout ce temps précieux que nous avons passé ensemble.

ملخص

المطار هو المكان الوحيد الذي يمكن للطائرات أن تسافر منه .لذلك لديها هيكلها الخاص بها .هناك مناطق مختلفة ، لكل منها وظيفتها الخاصة .نظرًا لهيكله ، يخضع المطار لقيود تشغيلية مختلفة مثل سرعة السير ، واحترام المسافة بين طائرتين على الأرض ، وما إلى ذلك .هناك قيد آخر يجب أخذه بعين الاعتبار وهو حقيقة أنه لا يمكن استخدام المسار إلا بواسطة جهاز واحد في كل مرة ، لذلك يصبح تسلسل المسار ضروريًا

كل هذا ، بالطبع ، مع الاهتمام المستمر بتحسين المسار والوقت من أجل الحفاظ دائمًا على التدفق أو حتى زيادته

الهدف العام من هذا العمل هو تصميم وتطوير نظام تنبؤ بالبيانات أكثر كفاءة في مجال الطيران .لتحقيق هذا الهدف ، يقترح هذا العمل نظامًا يستخدم الذكاء الاصطناعي .استخدم هذا العمل كأساس للبحث واختبار البيانات الحقيقية من مطار الدار البيضاء محمد الخامس الدولي في المغرب

قادنا ذلك إلى دراسة هيكل المطار وأنواع الأجسام المتحركة التي تدور في مناطق المرور أو المسار الذي يسلكه الركاب .وقد أتاح ذلك تحديد العراقيل والتحديات التي يتعين حلها من أجل تنفيذ النظام المقترح

الهدف هنا هو تسليط الضوء على الطرق التي تجعل من الممكن حل التعارضات من خلال تقديم أفضل مسار لكل جهاز بين دخول أو خروج المدرج وموقف الطائرات الخاص به .بشكل عام ، من أجل حل النزاعات على الأرض ولراحة الركاب وإدارة التأخيرات ، قد يكون من الأفضل زيادة المسار الذي يسلكه جهازان بدلاً من جعل أحد هذين الجهازين ينتظر فترة طويلة

.التنبؤ بحركة الطائرات ليس بالأمر السهل ، ولكن من الضروري إدراك تطوير أداة واقعية

Résumé

L'aéroport est le seul endroit où les avions ont la possibilité de circuler. Il a donc sa propre structure adaptée. On y trouve différentes zones avec pour chacune sa fonction propre. De par sa structure, l'aéroport est régi par diverses contraintes opérationnelles telles que la vitesse de roulement, le respect de la distance entre deux avions au sol ...

Une autre contrainte à prendre en compte est le fait qu'une piste ne peut être utilisée que par un seul appareil à la fois, un séquençement de piste devient alors nécessaire. Tout cela bien entendu dans un souci constant d'optimisation de chemin et de temps afin de toujours maintenir voire augmenter le flux.

L'objectif général de ce travail est de concevoir et de développer un système de prédiction des données plus efficace dans le domaine aéronautique. Pour atteindre cet objectif, ce travail propose un système qui utilise l'intelligence artificielle. Ce travail a utilisé comme base de recherche et de test des données réelles de l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V au MAROC.

Ce qui nous a amené à étudier la structure aéroportuaire, les types de mouvement qui circulent dans les zones de trafic ou encore le chemin empruntés par les usagers. Cela a permis d'identifier les contraintes et défis à résoudre afin d'implémenter le système proposé.

L'objectif est ici de mettre en avant des méthodes qui permettent de résoudre les conflits en présentant le meilleur chemin optimal pour chaque appareil entre l'entrée ou la sortie de piste et son parking. D'une manière générale, tant pour la résolution de conflit au sol que pour le confort des passagers et la gestion des retards, il peut être plus intéressant d'augmenter le trajet suivi par deux appareils plutôt que de faire patienter un seul de ces deux avions sur une longue durée.

Nous avons également abordé la notion de gestion des passagers notamment en temps de crise, comme nous avons pu le constater récemment avec la pandémie de Covid-19. La prédiction des mouvements dans une plateforme aéroportuaire n'est pas facile, mais pour réaliser le développement d'un outil réaliste c'est une nécessité.

Mots clés : Aéroport International de Casablanca Mohamed V, Théorie des graphes, Système d'information, Air trafic Management (ATM), Premier Arrivé Premier Servi (FCFS), Mouvement au sol, Organisation aéroportuaire, Flux des passagers, Covid-19

Abstract

The airport is the only place where planes can travel. It therefore has its own adapted structure. There are different areas, each with its own function.

Due to its structure, the airport is governed by various operational constraints such as taxiing speed, respect for the distance between two planes on the ground, etc.

Another constraint to be taken into account is the fact that a track can only be used by one device at a time, so track sequencing becomes necessary.

All of this, of course, with a constant concern for optimizing the path and time in order to always maintain or even increase the flow.

The general objective of this work is to design and develop a more efficient data prediction system in the aeronautical field. To achieve this goal, this work proposes a system that uses artificial intelligence. This work used as a basis for research and testing real data from Casablanca Mohamed V International Airport in MOROCCO.

This led us to study the airport structure, the types of moving objects that circulate in traffic areas or the path taken by passengers. This made it possible to identify the constraints and challenges to be resolved in order to implement the proposed system.

The objective here is to highlight methods that make it possible to resolve conflicts by presenting the best optimal path for each device between the entry or exit of the runway and its parking lot. In general, both for the resolution of conflicts on the ground and for the comfort of passengers and the management of delays, it may be more advantageous to increase the route taken by two devices rather than to make one of these two wait. planes over a long period.

The concept of passenger management has also been discussed, especially in times of crisis, such as the recent COVID-19 pandemic.

Predicting movements is not easy, but to realize the development of a realistic tool it is a necessity.

Key words : Casablanca Mohamed V International Airport, Graphs theory, Information system, Air traffic Management (ATM), First come First served (FCFS), Ground movement, Airport organization, Passenger flow, Covid-19

Table des matières

Remerciements.....	vii
ملخص.....	viii
Résumé.....	ix
Abstract.....	x
Table des matières.....	xi
Table des figures.....	xvii
Liste des tableaux.....	20
Glossaire.....	21
Introduction Générale.....	22
1. Contexte et motivation.....	23
2. Difficultés et défis.....	24
3. Contributions.....	25
3.1 Publications.....	25
3.2 Communications.....	26
4. Organisation du manuscrit.....	26
Chapitre I :	28
Contexte Général et Problématique.....	28
1. Introduction.....	29
2. Contexte général.....	29
2.1 Les principaux acteurs du trafic aérien et leurs besoins.....	29
2.1.1 Les autorités aériennes et les contrôleurs.....	29
2.1.2 Les compagnies aériennes et les équipages.....	30
2.1.3 Les besoins des principaux acteurs.....	31
2.2 Les systèmes mis en place.....	32
2.2.1 La fonction surveillance.....	33
2.2.2 La fonction planning opérationnel.....	33
2.2.3 La fonction routage.....	34

2.3 Normalisation.....	34
3. Configuration d'un aéroport international : le modèle de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V.....	35
3.1 Organisation générale d'une plateforme aéroportuaire.....	35
3.2 Aires de trafic et de stationnement.....	40
3.2.1 Aires de trafic.....	40
3.2.2 Aires de stationnement.....	41
3.3 Les voies de circulation.....	42
3.4 Les pistes et sorties de piste.....	44
3.4.1 Les pistes.....	44
3.4.2 Les sorties de piste.....	45
3.4.3 Les voies d'attente.....	46
3.5 Les problèmes opérationnels liés à la circulation des avions au sol.....	47
3.5.1 Les conditions météorologiques.....	47
3.5.2 Les performances de l'avion.....	47
3.6 Les fonctions associées au contrôle du trafic au sol.....	49
4. Conclusion.....	51
Chapitre II :	52
Prévisions et Optimisations Relatives à la Répartition des Mouvements de l'Avion au Sol...52	
1. Introduction.....	53
2. Énonciation du modèle.....	56
2.1 Notations.....	60
2.2 Modèle d'optimisation.....	62
2.2.1 Description du modèle.....	62
2.2.2 Explication du modèle.....	63
3 Approche heuristique utilisant la prédiction de la distribution des conflits.....	66
3.1 Cadre général de l'approche heuristique.....	66
3.2 Analyse des décisions de mouvement de l'aéronef.....	68

3.2.1 Décisions de mouvement de l'aéronef basés sur des informations obtenues.....	68
3.2.2 Mécanisme de formation et de résolution d'une impasse d'aéronef...71	
3.2.2.1 Situation de blocage de l'aéronef.....	71
3.2.2.2 Mécanisme de formation de l'impasse de l'aéronef.....	73
3.2.3 Mécanisme d'optimisation des déplacements des aéronefs basé sur la prédiction de la distribution des conflits.....	74
3.2.3.1 Procédure d'optimisation de la stratégie de mouvement au sol de l'aéronef.....	77
3.3 Sens de la liaison des taxiways de l'aéroport.....	78
3.4 Mécanisme de coordination de la séparation des avions en cas de turbulence de sillage.....	80
3.5. Comportement de l'exploitation d'un aéronef basé sur un mécanisme de coordination de la vitesse.....	82
3.6. Analyse des événements et mise à jour dynamique du système.....	82
3.7. Attribution des itinéraires.....	84
4 Expériences numériques sur un modèle simple extrait de l'aéroport.....	84
4.1. Analyse des décisions prises et les contraintes de capacité des taxiways.....	85
4.2 Analyse des décisions de mouvement des aéronefs du FCFS et du CDPG.....	87
5 Conclusion.....	89
CHAPITRE III :	91
Algorithme de Recherche Bidirectionnelle pour les Mouvements au Sol.....	91
1 Introduction.....	92
2 Description du problème et modélisation.....	93
2.1 Définition de la structure de l'aéroport.....	93
2.2 Définition du problème.....	94
3 Modélisation du problème.....	95
3.1 L'aéroport.....	95
3.2 Acheminement des avions.....	96

3.3 Modèle proposé.....	98
3.3.1 Algorithme Dijkstra.....	99
3.3.2 Algorithme Dijkstra Bidirectionnel.....	101
3.3.3 Algorithme A*.....	103
4 Le nouvel algorithme hybride A* : implémentation et résultats.....	105
4.1 Présentation de l'algorithme hybride A*.....	105
4.2 Implémentation de l'algorithme hybride A*.....	106
4.3 Test de performance de l'algorithme hybride A*.....	106
4.3.1 Comparaison avec l'algorithme Dijkstra Bidirectionnel.....	106
4.3.2 Comparaison avec l'algorithme A*.....	109
4.3.3 Comparaison avec l'algorithme Hybride A*.....	109
5 Conclusion.....	113
CHAPITRE IV:.....	114
Conception stratégique des mesures de précaution pour les passagers des aéroports en période de crise sanitaire mondiale Covid 19 :.....	114
Modélisation paramétrique et algorithmes de traitement.....	114
1 Introduction.....	115
2 Conception et simulation.....	116
2.1 Contexte du processus de simulation.....	116
2.2 Mesures de précautions requises à l'aéroport.....	119
2.3 Conception des flux des passagers.....	119
2.4 Entrée des données.....	120
2.5 Normes IATA pour les terminaux.....	122
2.6 Modélisation mathématiques des paramètres variables.....	124
3. Distribution pour la précocité de l'arrivée.....	130
3.1. Distribution de précocité à l'arrivée par jour.....	130
3.2 Corrélation entre l'heure d'arrivée du passager et l'heure d'embarquement.....	131
4. Modélisation et analyse des simulations.....	132

4.1 Développement du scénario.....	132
4.2. Interface du programme de simulation.....	133
4.3. Analyse et discussion des résultats.....	135
4.3.1 Variation de la longueur de la file d'attente.....	135
4.3.1.1 Cas de 26 comptoirs d'enregistrement.....	135
4.3.1.2 Cas de 52 comptoirs d'enregistrement.....	136
4.3.2. Variation du temps d'attente.....	137
4.3.2.1 Cas de l'ouverture de 26 guichets.....	138
4.3.2.2 Cas de l'ouverture de 52 guichets.....	139
4.4. Limites d'utilisation.....	140
5. Conclusion.....	141
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	142
1. Limitations.....	143
REFERENCES.....	144
Chapitre II.....	144
Chapitre III.....	145
Chapitre IV.....	145

Table des figures

Figure I.1 : Carte de stationnement et d'accostage des aéronefs à l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V	37
Figure I.2 : Carte des mouvements de surface des aéronefs à l'aéroport international de Casablanca Mohamed V [4]	38
Figure I.3 : Représentation macroscopique de l'airside de l'aéroport	39
Figure I.4 : Les zones du système aéroportuaire	40
Figure I.5 : Les zones d'apron ou aires de trafic	41
Figure I.6 : Exemples de configurations de postes de stationnement avions	43
Figure I.7 : Réseau de voies de circulation	45
Figure I.8 : Exemple de distances de sécurité aux abords de la piste	47
Figure I.9 : Zone de protection des postes de stationnement	49
Figure I.10 : Manoeuvrabilité de l'avion à très basse vitesse	50
Figure II.1 : Exemple de voie de circulation à voie unique (taxiways)	57
Figure II.2 : Scénarios de décollage pour l'aéroport International de Casablanca Mohamed V	59
Figure II.3 : Scénarios d'atterrissage pour l'aéroport International de Casablanca Mohamed V	60
Figure II.4 : Plusieurs scénarios d'intervalle pour les aéronefs sur un nœud (ou intersection).	66
Figure II.5 : Cadre général de l'approche heuristique.	68
Figure II.6 : Mouvements de l'aéronef basés sur des informations obtenues	71
Figure II.7 : Plusieurs scénarios de situations de blocage d'avions.	72
Figure II.8 : Scénarios de fausse impasse.	74
Figure II.9 : Les plans consécutifs de deux algorithmes d'ordonnancement différents pour les avions ^A et ^{A_b} (a) FCFS, (b) non-FCFS	75

Figure II.10 : Disponibilité des routes en fonction de la direction.	79
Figure II.11 : La disponibilité des emplacements en fonction de la direction : (a) positif (+) (b) négatif (-).	80
Figure II.12 : Turbulences de sillage	82
Figure II.13 : Les éventuels événements et les intervalles de temps correspondants (a) et (b)	83
Figure II.14. Modèle simple de liaison nodale à la surface d'un aéroport. (a) Route de départ. (b) Route d'arrivée.	86
Figure II.15 Nombre d'avions et contraintes de capacité sur les voies de circulation L12 et L14.	87
Figure. II.16. :Les plans d'ordonnancement obtenus par deux approches (a) le FCFS (b) le CDPG	88
Figure III.1 : Temps de parcours sur un arc donné	98
Figure III.2 : Cas de collision sur un même arc	99
Figure III.3 Organigramme de l'algorithme Hybride A*	105
Figure III.4 Temps d'exécution des différents algorithmes	107
Figure III.5 : Plan de route obtenu pour l'algorithme de Dijkstra bidirectionnel	108
Figure III.6 : Plan de route obtenu pour l'algorithme A*	110
Figure III.7 : Plan de route obtenu pour l'algorithme Hybride A*	111
Figure III.8 : Plan de route optimal basé sur les algorithmes Dijkstra, A* et Hybride A*	112
Figure IV.1 : Représentation des terminaux 1 et 2 de l'aéroport international de Casablanca Mohamed V (a) N0, (b) N1, (c)N2	118
Figure IV.2 : Présentation des passagers dans l'aire d'enregistrement	120
Figure IV.3 Processus détaillé de la simulation des données	121
Figure IV.4 Number of passenger embarking and disembarking	122
Figure IV.5 : Répartition de l'heure d'arrivée des passagers au départ pour cinq stratégies	126
Figure IV.6 : Distribution IATA de la précocité des arrivées au niveau national	131
Figure IV.7 : Distribution IATA de la précocité des arrivées au niveau international	131
Figure IV.8 :Relation entre l'heure d'arrivée et la répartition des passagers.	132
Figure IV.9 : Organisation des comptoirs d'enregistrement (source : Service Technique de l'Aviation Civile / DGAC)	133
Figure IV.10 : Gestion des flux de passagers aux comptoirs d'enregistrement	134
Figure IV.11 : Gestion des paramètres de mesures sanitaires	134

Figure IV.12 : Variation de la file d'attente en fonction du temps selon la distance sociale appliquée avec 26 guichets.	135
Figure IV.13 : Variation de la file d'attente en fonction du temps selon la distance sociale appliquée avec 52 guichets.	137
Figure IV.14 : Evolution du temps d'attente dans le cas de 26 guichets	138
Figure IV.15 : Evolution du temps d'attente dans le cas de 52 guichets	140

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Liste des accidents parmi les plus célèbres	32
Tableau II.1 : Indices utilisés dans les expressions	61
Tableau II.2 : Paramètres	61
Tableau II.3 : Variables :	62
Tableau II.4 : Séparations minimales	81
Tableau II.5 Planifications des résultats sans contraintes de croisement ni contraintes de turbulence de sillage (a) Départs. (b) Arrivés.	86
Tableau III.1 : Variables	97
Tableau III.2 : Extrait de la matrice adjacente pour le décollage	98
Table IV.1 : Levels of Service (LOS) selon la IATA sous forme de qualité de service	123
Table IV.2 Ratio d'allocation d'espace en m ² par passager	123
Table IV.3 Temps d'attente maximum par passagers	124
Tableau IV.4 : Aperçu des paramètres de distribution des arrivées sélectionnés pour toutes les stratégies de simulation	127

Glossaire

ACI	Airport Council International
ASCP	Airport Scheduling Programmation
CAT	Catégorie
CDPG	Conflict Distribution Prediction Ground
DGAC	Direction Générale de l'Aviation Civile
EUROCAE	European Organisation of Civil Aviation
FCFS	First Come First Served
IATA	International Air Transport Association
LOS	Level Of Services
MILP	Mixed Integer Linear Programmation
NP	Nondeterministic Polynomial
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
RSI	Règlement Sanitaire International
SO	Système Optimal
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency
VOR	VHF Omnidirectional Range

Introduction Générale

1. Contexte et motivation

Dans le contexte de l'économie mondial actuel, le domaine aéroportuaire occupe une place majeure dans le développement économique.

L'importance des plateformes aéroportuaires devient une évidence. Ce sont des portes d'entrées et de sorties du territoire. Elles jouent un rôle d'ouverture sur le monde et sont un acteur majeur de l'économie d'un pays.

Aujourd'hui les plateformes aéroportuaires sont en constante recherche de nouvelles technologies afin de pouvoir améliorer leur capacité. Cela permet d'être attractif et de générer une activité de plus en plus importante et de couvrir toutes les zones de marché. Plus le potentiel d'accueil est élevé, plus la plateforme a une importance économique élevée.

Le transport aérien est un enjeu économique très important. C'est un secteur qui va faire l'objet d'un projet de développement économique et urbain à partir du potentiel aéroportuaire.

Ces dernières années, de nombreux progrès en termes de technologie ont émergé dans le domaine aéroportuaire. Cela grâce à des avancées concernant la gestion des dangers et la sécurité aérienne. En parallèle, il a aussi fallu adapter les pratiques de gestion afin d'absorber le flux croissant.

Au vu des nombreux facteurs existants pouvant engendrer des dommages, la sécurité et la prévention des incidents, tant au vol qu'au sol, sont une préoccupation majeure et occupent une place prépondérante dans le domaine de l'aviation.

En effet, la probabilité d'un incident au vol est faible. A contrario, celle d'un incident au sol est plus élevée et va causer de nombreux dommages en termes d'économie. Un incident au sol va entraîner bien souvent des retards, qui ne feront que s'accumuler tant que le problème ne sera pas résolu. Ces retards occasionnant des coûts économiques importants.

L'aéroport devient donc un outil privilégié d'aménagement territorial qui permet, grâce à la proximité du pôle économique, de développer ses ressources (dans toutes ses composantes). La convergence du développement local et l'aménagement du territoire réside dans le fait qu'ils cherchent tous les deux à influencer la localisation des entreprises afin d'agrandir leurs ressources. L'aéroport de Casablanca Mohammed V, est un bon exemple de plateforme aéroportuaire en pleine expansion. En effet, depuis sa création et jusqu'aujourd'hui le trafic y a été multiplié par 13 et la croissance y est actuellement estimée à plus de 5% par an.

Un aéroport tel que l'aéroport international de Casablanca Mohammed V représente un outil formidable d'aménagement pour l'espace régional. Les possibilités de développement du pôle de cet aéroport représentent un atout majeur pour la capitale économique du Maroc et ses enjeux urbanistiques et économiques.

Cette plateforme est l'un des principaux moteurs du développement économique de la région. Elle permet à cette dernière de renforcer sa position en tant que plaque tournante de l'Afrique.

C'est le premier hub Europe-Afrique de l'ouest. En effet aujourd'hui il concentre à lui seul 35% du marché de cette région et assure pour 75% une activité de hub international. Une telle croissance est naturellement accompagnée d'une augmentation de la flotte de véhicules et engins d'assistance au sol ainsi que d'une activité croissante sur les aires de trafic de l'aéroport. Le développement économique globalisé que joue l'aéroport Mohammed V engendrera un grand flux de trafic au sol, notamment pendant les périodes de pointe, ce qui peut dériver des contraintes futures en termes de capacité pouvant causer des retards inacceptables et même menacer la sécurité.

L'aéroport International de Casablanca Mohammed V est confronté à des enjeux importants en termes de demandes futures portant sur la capacité aéroportuaire et à une forte pression exercée sur l'utilisation efficace des ressources. La plateforme aéroportuaire doit donc disposer d'outils qui lui permettent d'assurer la sécurité au sol tout en étant efficace en termes de ponctualité.

2. Difficultés et défis

Dans cette thèse sera explorée l'importance d'améliorer les systèmes de prédiction des mouvements au sol grâce notamment à la localisation des appareils au sol dans la zone aéroportuaire. C'est une opération de grande importance pour un aéroport car cela a un impact direct sur sa capacité à gérer le flux des mouvements au sol. C'est lié à un potentiel goulot d'étranglement qu'il faut éviter dans le système par l'amélioration de la gestion des opérations de surface, le tout dans le maintien de conditions de sécurité optimales.

De nombreux facteurs influencent la qualité de l'environnement dans une zone aéroportuaire (les obstacles de toute sorte humains ou matériel, le bruit, la météo, ...).

C'est pourquoi, avant de décrire avec plus de précision le fonctionnement de la technologie de prédiction de mouvement qui a été ici développée afin de répondre aux contraintes

aéroportuaires, il est important dans un premier temps de se pencher sur les contraintes sécuritaires liées au fonctionnement d'une plateforme aéroportuaire.

Pour s'assurer une bonne représentativité des données et aussi comprendre l'environnement dans lequel la technologie proposée serait implémentée, les contraintes liées à la gestion de la zone aéroportuaire, l'étude de sécurité et l'analyse des données ont été fournies à partir des données de l'aéroport de Casablanca Mohammed V.

Le système proposé ici représente une valeur efficace et à faible coût pour l'optimisation et la gestion des mouvements au sol dans une zone aéroportuaire. Cette technologie se base sur l'addition de plusieurs algorithmes qui sont complémentaires.

Après avoir compris les exigences de sécurité au sol de la zone aéroportuaire et les contraintes liées à son bon fonctionnement, il sera possible de :

- Souligner les défis et les limites des systèmes de gestion des mouvements au sol actuels de l'aéroport
- Offrir une solution de gestion à faible coût qui peut aider à résoudre le problème de gestion des mouvements au sol tout en respectant les contraintes sécuritaires en vigueur.

3. Contributions

3.1 Publications

01/10/2020	Journal of Air Transport Management	Strategic design of precautionary measures for airport passengers in times of global health crisis Covid 19: Parametric modelling and processing algorithms <i>Dabachine, Yassine, Hamza Taheri, Mohamed Biniz, Belaid Bouikhalene, et Abdessamad Balouki</i>
Actuellement, les conséquences négatives d'une pandémie se profilent de manière menaçante à l'échelle internationale. Des installations telles que les aéroports ont largement contribué à la propagation mondiale du virus COVID-19. Par conséquent, afin de relever ce défi, des études sur la gestion des risques sanitaires et la bonne application des contre-mesures doivent être menées. Pour mesurer les conséquences sur le flux de passagers, un modèle de simulation a été mis en place à l'aéroport international Mohammed V de Casablanca. Plusieurs scénarios utilisant les données quotidiennes du trafic ont été exécutés dans différentes circonstances. Cela a permis d'élaborer certaines hypothèses concernant la capacité globale de l'aéroport. Les simulations proposées permettent de calculer le nombre de passagers à traiter en fonction des comptoirs d'enregistrement disponibles sur la base des mesures sanitaires proposées.		
29/02/2020	Journal of Theoretical and Applied Information Technology	Conflict Distribution Prediction And Optimization Of Aircraft In Ground Movements <i>Dabachine, Yassine, Mohamed Biniz, Belaid Bouikhalene, et Abdessamad Balouki</i>
Lors de la participation à la Conférence internationale de recherche sur le transport aérien 2018, " ICRAT		

", la communauté scientifique du transport aérien a souligné l'importance du contrôle du trafic au sein des taxiways des aéroports. L'ordonnancement des aéronefs (ASCP) est abordé dans ce document pour les voies de circulation (route à voie unique). Pour différentes catégories d'avions, un examen détaillé de la réponse variable au retard des avions est fourni. Une méthode heuristique basée sur la prédiction de la distribution globale des conflits (CDPG) est la première approche présentée. Dans la CDPG, deux problèmes qui limitaient la mise en œuvre du système sont résolus : la situation d'impasse et une stratégie de voyage optimale. La deuxième partie détaille un planificateur "premier arrivé, premier servi" (FCFS) pour développer un système de gestion intégré des départs et des arrivées à l'aéroport Mohamed V. Une gestion améliorée des flux de trafic a été mise en place pour prendre en compte les contraintes directionnelles sur les liaisons entre les voies de circulation ainsi que les contraintes de croisement aux intersections des voies de circulation. Plutôt que d'utiliser des itinéraires prédéfinis, un mécanisme d'affectation d'itinéraire est ajouté. L'ordonnancement est appliqué à chaque itinéraire. Des expériences numériques montrent qu'il est possible d'obtenir une solution optimale pour le CDPG en un temps de calcul très court.

3.2 Communications

15/07/2020	The International Conference on Research in Applied Algorithm for conflict detection and
18/07/2020	Mathematics and computer Science (ICRAMCS 2020) resolution in ground movement
	<i>Faculté des Sciences Ben M'Sik Casablanca, Maroc.</i>
Cette étude présente le développement d'un simulateur de surface d'aéroport. Le simulateur utilise les données de sortie d'un planificateur premier arrivé, premier servi (FCFS) pour simuler le mouvement de ces aéronefs sur la surface. Les situations présentant un risque de collision plus élevé dans le trafic de surface aéroportuaire sont analysées et classées selon plusieurs cas. Un algorithme de détection et de résolution de conflit est mis en œuvre pour maintenir la distance d'espacement recommandée. Le simulateur a été mis à l'essai avec un scénario de l'aéroport international Mohammed V qui met en mouvement 20 aéronefs. Sans détection ni résolution de conflit, diverses situations de conflit sont identifiées. Lorsque l'algorithme de détection et de résolution de conflit gère le trafic, trois stratégies de priorisation sont mises en œuvre et le nombre d'aéronefs retardés et les retards en général sont comparés. Il est plus intéressant, à partir des résultats de l'établissement des priorités en fonction du temps ou de la distance restante, de choisir l'algorithme de détection plutôt que de minimiser le retard pour chaque situation donnée.	
18/05/2020	2020 6th International Conference on Optimization and Optimization of Aircraft Operations
20/04/2020	Applications (ICOA) – IEEE on Airport Surface
21/04/2020	<i>Faculté des Sciences et Technique Beni-Mellal, Maroc.</i>
Cette étude présente l'élaboration d'un simulateur de surface d'aéroport utilisant les données de sortie d'un planificateur "premier arrivé, premier servi" (FCFS) pour simuler le mouvement de ces avions sur la surface. Différents scénarios de situations conflictuelles dans le trafic de surface des aéroports sont analysés et classés. Un algorithme de détection et de résolution des conflits est mis en œuvre pour préserver la distance de séparation recommandée. Le simulateur a été testé avec un cas de déploiement à l'aéroport international Mohammed V impliquant l'utilisation de 70 aéronefs. En l'absence de détection et de résolution des conflits, diverses situations conflictuelles sont identifiées. Une fois que l'algorithme de détection et de résolution des conflits est utilisé pour gérer le trafic, trois stratégies de priorisation sont mises en œuvre et le nombre d'avions retardés et les retards globaux sont comparés. A partir des résultats de cette priorisation basée sur le temps ou la distance restante, ce qui est plus intéressant est le choix de l'algorithme de détection plutôt que la minimisation du retard pour chaque situation donnée	
17/04/2019	The International Conference on Business Intelligence (CBI'19) Ground Movement for airport based
19/04/2019	<i>Faculté des Sciences et Technique Beni Mellal, Maroc.</i> on Multi-Agent System
La gestion du trafic aérien (ATM) a été étudiée dans plusieurs domaines afin d'optimiser un système de gestion du trafic aérien. Aujourd'hui, il est facile d'observer le phénomène de congestion du trafic aérien dû à une augmentation de la demande dans le domaine du transport aérien. Cet article présente une solution pour optimiser la gestion du trafic aérien selon différents aspects. L'objectif ici est de contrôler	

et de déterminer la séquence d'un avion en approche et d'étudier le comportement dans la zone de contrôle du terminal. Cet article se concentre sur les algorithmes d'ordonnancement utilisant une variable. Le problème pour une gestion efficace du trafic aérien est celui des contraintes opérationnelles telles que l'espace, la séparation, le dépassement sur la même route, le point de fusion. Pour effectuer le calcul en temps réel, les algorithmes présentés ici sont basés sur la répartition heuristique. Cela permet d'intégrer des règles capables d'assigner des tâches dans un court laps de temps avec un résultat efficace. Ceci est possible avec un algorithme d'ordonnancement approprié et réaliste. Cet article propose une simulation réelle pour montrer que l'algorithme proposé est valide et applicable. Chaque règle de planification est analysée selon le même scénario statique et dynamique des flux de trafic aérien avec une simulation de Monte-Carlo. En offrant aux contrôleurs aériens des possibilités de formation avant de tels accidents et incidents, ils seront en mesure de réagir rapidement et avec précision dans les situations d'urgence. Par conséquent, l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) recommande que la formation des contrôleurs aériens sur simulateur soit étendue afin de prévenir les accidents du trafic aérien par la préformation, la prévention des accidents et l'adaptabilité en cas d'accident. Dans les pays avancés dans le secteur aéroportuaire, un simulateur de contrôle du trafic d'aérodrome (ATC) est mis en place et une formation périodique est organisée pour améliorer la capacité du contrôleur à faire face rapidement aux situations normales et anormales.

25/03/2019 28/11/2018 30/11/2018	2018 International Arab Conference on Information Technology (ACIT) – IEEE <i>Université Islamique Du Liban -Werdanye, Liban .</i>	Bidirectional Search Algorithm for Airport Ground Movement
--	--	---

La gestion des mouvements au sol du trafic aérien est un problème majeur pour les aéroports. La meilleure optimisation des mouvements au sol permettrait de réduire les retards des vols et les coûts globaux des voyages. Cet article propose un nouvel algorithme de routage pour fournir la route la plus courte basée sur trois algorithmes qui permettent une bonne planification des mouvements au sol. Ces trois algorithmes sont itératifs : ils permettent de planifier la trajectoire d'un avion l'un après l'autre. Les trois algorithmes sont garantis comme un outil d'aide à la décision en temps réel pour les contrôleurs aériens, mais ils ont chacun des forces et des faiblesses. Une première version est décrite en utilisant l'algorithme classique de Dijkstra, puis la version classique de Dijkstra a été étendue par une version bidirectionnelle. Les deux algorithmes fournissent une solution optimale, mais le coût du temps de calcul reste relativement long malgré une amélioration avec l'utilisation de Dijkstra bidirectionnel. Un troisième algorithme A* est utilisé. La limite de celui-ci étant qu'il ne garantit pas une solution optimale malgré un coût en temps de calcul plus rapide. Pour éliminer les faiblesses de chaque algorithme étudié, un nouvel algorithme A* hybride est donc présenté ici. Il intègre les avantages de chaque algorithme afin de réduire le temps de calcul et d'optimiser la recherche du plus court chemin tout en maintenant un temps d'exécution minimum pour assurer la faisabilité des trajectoires prévues en un temps réduit. Ce modèle a été étendu pour traiter la faisabilité des trajectoires planifiées tout en évitant les conflits entre avions et évalué sur le modèle de l'aéroport de Casablanca Med V.

4. Organisation du manuscrit

La thèse est structurée comme suit :

Le **premier chapitre** présente la problématique abordée dans cette thèse et précise son environnement technique. Ainsi, les acteurs du trafic aéroportuaire avec leurs objectifs respectifs sont décrits. Les principales fonctions à mettre en œuvre sont analysées et les éléments constitutifs des systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol sont présentés. L'état d'avancement des études et des programmes de recherche dans ce domaine est aussi rapporté. Il vise également à présenter une description des principaux environnements physiques dans lequel évolue le trafic au sol au sein d'une plateforme aéroportuaire. Il décrit les principales composantes du système de trafic et leurs interconnexions. De nombreux exemples de configuration avec des niveaux de complexité variés sont exposés.

Le **deuxième chapitre** traite de l'ordonnancement des avions (ASCP). Pour différentes catégories d'avions, un examen détaillé de la réponse variable au retard des avions est fourni. Une méthode heuristique basée sur la prédiction de la distribution globale des conflits (CDPG) est la première approche présentée. La CDPG permet de résoudre deux problèmes qui ont limité la mise en œuvre du système : la situation de blocage et une stratégie de voyage optimale. La deuxième partie détaille un planificateur premier arrivé, premier servi (FCFS) pour développer un système de gestion intégrée des départs et des arrivées à l'aéroport international de Casablanca Mohamed V. Une gestion améliorée des flux de trafic a été mise en place pour prendre en compte les contraintes directionnelles sur les connexions des voies de circulation ainsi que les contraintes de croisement aux intersections des voies de circulation. Au lieu d'utiliser des routes prédéfinies, un mécanisme d'affectation des routes est ajouté. L'ordonnancement est appliqué à chaque route. Des expériences numériques montrent qu'il est possible d'obtenir une solution optimale pour le CDPG en un temps de calcul très court.

Le **troisième chapitre** propose un nouvel algorithme de routage pour fournir la route la plus courte basée sur trois algorithmes qui permettent une bonne planification des mouvements au sol. Ces trois algorithmes sont itératifs : ils permettent de planifier la trajectoire d'un avion l'un après l'autre. Les trois algorithmes sont garantis comme un outil d'aide à la décision en temps réel pour les contrôleurs aériens, mais ils ont chacun des forces et des faiblesses. Une première version est décrite en utilisant l'algorithme classique de Dijkstra, puis la version classique de Dijkstra a été

étendue par une version bidirectionnelle. Les deux algorithmes fournissent une solution optimale, mais le coût du temps de calcul reste relativement long malgré une amélioration avec l'utilisation de Dijkstra bidirectionnel. Un troisième algorithme A* est utilisé. La limite de celui-ci étant qu'il ne garantit pas une solution optimale malgré un coût en temps de calcul plus rapide. Pour éliminer les faiblesses de chaque algorithme étudié, un nouvel algorithme A* hybride est donc présenté ici. Il intègre les avantages de chaque algorithme afin de réduire le temps de calcul et d'optimiser la recherche du plus court chemin tout en maintenant un temps d'exécution minimum pour assurer la faisabilité des trajectoires prévues en un temps réduit. Ce modèle a été étendu pour traiter la faisabilité des trajectoires planifiées tout en évitant les conflits entre avions et évalué sur le modèle de l'aéroport international de Casablanca Mohamed V.

Le **quatrième chapitre** aborde les conséquences négatives d'une pandémie qui se profilent de manière menaçante à l'échelle internationale. Des installations telles que les aéroports ont largement contribué à la propagation mondiale du virus COVID-19. Par conséquent, afin de relever ce défi, des études sur la gestion des risques sanitaires et la bonne application des contre-mesures doivent être menées. Pour mesurer les conséquences sur le flux de passagers, un modèle de simulation a été mis en place à l'aéroport international Mohammed V de Casablanca. Plusieurs scénarios utilisant les données quotidiennes du trafic ont été exécutés dans différentes circonstances. Cela a permis d'élaborer certaines hypothèses concernant la capacité globale de l'aéroport. Les simulations proposées permettent de calculer le nombre de passagers à traiter en fonction des comptoirs d'enregistrement disponibles sur la base des mesures sanitaires proposées.

La conclusion clôt cette thèse et s'ouvre sur de futurs travaux à venir.

Chapitre I:
Contexte Général et Problématique

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est principalement de présenter la problématique abordée dans cette thèse et de préciser son environnement technique.

Ainsi, les acteurs du trafic aéroportuaire avec leurs objectifs respectifs sont décrits. Les principales fonctions à mettre en œuvre sont analysées et les éléments constitutifs des systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol sont présentés. L'état d'avancement des études et des programmes de recherche dans ce domaine est aussi rapporté.

Il vise également à présenter une description des principaux environnements physiques dans lequel évolue le trafic au sol au sein d'une plateforme aéroportuaire. Il décrit les principales composantes du système de trafic et leurs interconnexions. De nombreux exemples de configuration avec des niveaux de complexité variés sont exposés.

2. Contexte général

2.1 Les principaux acteurs du trafic aérien et leurs besoins

Dans cette partie, ne seront évoqués que les deux principaux acteurs du trafic du trafic. En effet, il est supposé que les moyens techniques pour la localisation et la mise en œuvre de règles de sécurité strictes sont observées concernant le trafic au sol. Cela nous permet de ne pas avoir à tenir compte des autres intervenants pouvant être sur place à un moment donné au sol.

Nous allons donc considérer comme principaux acteurs du trafic aérien d'une part les autorités de l'aéroport et les contrôleurs aériens, et d'autre part les compagnies aériennes et les équipages.

2.1.1 Les autorités aériennes et les contrôleurs

Les autorités aériennes ont pour mission de mettre en place l'offre de service. Leur rôle consiste principalement à veiller au bon fonctionnement de l'ensemble des infrastructures au sol de l'aéroport. Ils ont un rôle de planification des divers services qui entrent en jeu. Ils ont également la charge de l'entretien des infrastructures au sol, ils doivent prévoir les travaux, rénovations, extension et sont chargés d'en définir la capacité.

Les contrôleurs quant à eux ont pour mission d'optimiser au maximum la capacité en terme de circulation des véhicules dans les infrastructures au sol de l'aéroport. Leur rôle consiste principalement à gérer les différents flux qui interviennent au sein de l'espace aérien et des infrastructures. Ils sont chargés d'assurer la sécurité et de maintenir au maximum les possibilités de ponctualité. Ils doivent être capables grâce aux divers outils mis à leur disposition de localiser tous les véhicules et personnes en mouvement au sein de l'infrastructure au sol. Ils sont également chargés de guider les pilotes lors de leurs déplacements et de gérer tous les mouvements au sol dans le strict respect des règles de sécurité. Ils doivent être capables de prévoir et d'anticiper tout problème majeur ou mineur pouvant intervenir sur l'espace au sol et concernant le contrôle du trafic au sol et d'y répondre le plus rapidement et efficacement possible.

2.1.2 Les compagnies aériennes et les équipages

Les compagnies aériennes sont en quelque sorte les garantes de l'activité commerciale d'un aéroport. Elles assurent principalement les activités de transport de fret commercial et de transport des personnes. Les compagnies participent majoritairement au développement du réseau et à l'élargissement du panel de destination à offrir. Ils sont aussi les principaux acteurs utilisant la flotte des véhicules et les infrastructures mises à disposition pour assurer leur activité commerciale. Fort du succès du mode de transport aérien, les compagnies aériennes ont connues une forte expansion de leurs activités et se sont multipliées. On peut également noter que de par leur poids économique conséquent, ce sont les compagnies aériennes qui fixent les paramètres de la demande de service et de circulation au sol des avions.

Les équipages quant à eux sont chargés du déplacement et du mouvement des véhicules sur la surface au sol. Ils exécutent et suivent les instructions et informations reçues du système de contrôle. Ils sont en constante communication avec les contrôleurs et les autorités. Le pilote est capable de se localiser précisément, quel que soit son emplacement au sol sur l'ensemble de l'infrastructure de l'aéroport. Ils doivent veiller à éviter toute collision avec un autre véhicule en mouvement sur la plateforme. Ils doivent également éviter toute excursion ou sorties quelque soit les conditions au sol de la plateforme.

2.1.3 Les besoins des principaux acteurs

Nous avons donc pu voir que les principaux utilisateurs des infrastructures de l'aéroport sont les compagnies aériennes. Celles-ci, afin de maintenir leurs activités commerciales cherchent donc à satisfaire au mieux les besoins de leurs usagers et donc à leur offrir un service de qualité équivalent. A ce titre, les compagnies aériennes sont donc les garantes :

- De la sécurité ; on peut rappeler ici quelques accidents qui comptent parmi les plus célèbres de l'histoire de l'aéronautique tels que

-

Tableau I.1 : Liste des accidents parmi les plus célèbres

Date	Lieu	Appareil	Cause	Vol	Victimes
27 mars 1977	Espagne, Tenerife	Boeing 747-121/Boeing 747-206B	Collision		583
12 août 1985	Japon, Mont Osaka	Boeing 747SR-46	Dépressurisation	Vol Japan Airlines 123	520
12 novembre 1996	Inde, Haryana	Boeing 747 / Iliouchine II-76	Collision		349
3 mars 1974	France, Forêt d'Ermenonville	McDonnell Douglas DC 10	Dépressurisation	Vol Turkish Airlines 981	346
19 août 1980	Arabie Saoudite, Riyad	Lockheed L 1011 TriStar	Incendie	Vol Saudia 163	301

- Du respect de la ponctualité prévu initialement, et de l'absence de retard (ou de le minimiser au maximum) ; à savoir que les retards ont souvent pour origine un incident au niveau de la circulation au sol de la plateforme, les compagnies sont donc tributaires des bonnes gestions des conditions de circulation des véhicules au sol afin de maintenir la programmation de leur primo planning.

- Du confort d'utilisation des infrastructures pour les usagers ; l'organisation physique de l'aéroport conditionne les mesures d'utilisation des infrastructures, les compagnies aériennes en sont donc tributaires.

Lors d'un trajet, un aéronef est confronté au trafic au sol à deux reprises : lors de son départ jusqu'au décollage, et lors de son arrivée jusqu'à son stationnement. Les conditions de circulation au

sol des véhicules et surtout des aéronefs sont donc fortement dépendantes des conditions de trafic au sol et des diverses perturbations pouvant intervenir. Par exemple, la saturation du trafic, les incidents sur les voies de circulation, des mauvaises conditions météorologiques, une mauvaise visibilité, sont tout autant de facteurs pouvant influencer la fluidité du trafic au sol et donc les conditions de circulation entraînant des retards. Cela se répercute sur les passagers et leur satisfaction et influe sur le plan commercial des compagnies aériennes.

On voit donc que les compagnies aériennes et les passagers ont des intérêts en commun car la satisfaction du besoin des uns (les passagers) influencera positivement les coûts opérationnels des autres (les compagnies aériennes).

Dans ce but précis les compagnies attendent que la gestion du trafic au sol de l'aéroport soit assurée par un système qui permette à la fois :

- De minimiser les retards dans la programmation et d'assurer une bonne ponctualité
- D'assurer la sécurité des opérations au sol de la surface
- D'assurer la fluidité des flux de trafic au sol en résolvant les conflits d'une manière optimale
- De faciliter au maximum les manœuvres
- D'optimiser les temps d'attente au différents point stratégiques de la surface au sol (parking, taxi, piste, voies, ...).

2.2 Les systèmes mis en place

Depuis la création de l'OACI en 1944, on s'est vite rendu compte lors des diverses réunions qu'une bonne gestion des mouvements au sol de la surface aéroportuaire nécessitait la mise en place et l'utilisation d'un système de contrôle du trafic au sol efficace. Celui-ci doit permettre une bonne communication entre tous les usagers intervenant sur la surface de la plateforme aéroportuaire.

Le système qui a été proposé est l'A-SGMS. De nombreuses études se sont intéressées à ce système, notamment depuis l'expansion du mode de transport aérien et les aménagements que cela a entraîné au sein des infrastructures aéroportuaires.

Aujourd'hui le système A-SGMS n'est pas encore généralisé partout et est encore considéré à ce titre en phase "expérimentale" au sein de certains aéroports.

Les principales fonctions du système A-SGMS sont la surveillance, le planning opérationnel et le routage.

2.2.1 La fonction surveillance

Cette fonction permet de suivre l'évolution du trafic au sol et d'avoir une vue d'ensemble de la situation du trafic pour en faire une évaluation.

La fonction surveillance a pour tâche principale l'identification et la localisation de tout objet qui se trouve sur la plateforme aéroportuaire, qu'il soit en mouvement ou bien statique. Elle doit également permettre d'évaluer, grâce à la détection de conflits, la situation du trafic en temps réel.

Lorsqu'une situation conflictuelle est détectée, la fonction permet de transmettre cette information à la fonction planning opérationnel qui sera chargée de gérer et résoudre le problème rencontré.

2.2.2 La fonction planning opérationnel

Cette fonction permet de générer un plan des actions à partir des données recueillies par la fonction surveillance, de la demande actualisée et de l'offre de circulation disponible.

La fonction planning opérationnel a pour tâche principale de mettre en place un planning des opérations afin de d'optimiser la fluidité de la circulation au sol au sein de la plateforme aéroportuaire.

La fonction veille à minimiser les situations conflictuelles et à éviter les retards dans le planning initial donné aux compagnies aériennes.

Pour parvenir à atteindre cet objectif plusieurs étapes sont nécessaires.

L'étape principale, et celle qui nous intéresse plus particulièrement dans cette thèse, est l'édition d'un chemin optimal. Ce chemin doit éviter les conflits.

Pour cela, la circulation des avions au sol est prise en compte dans sa globalité au sein de la plateforme aéroportuaire. La fonction veille également, dans l'édition du chemin optimal, à intégrer les opérations de départ et d'arrivées en prenant en compte le strict respect des règles de sécurité lors de ces manœuvres.

2.2.3 La fonction routage

Cette fonction permet de mettre en place des informations de guidage à exécuter par les équipages des différents véhicules en fonction des données transmises par la fonction planning opérationnel.

A l'heure actuelle, chaque véhicule qui utilise la surface au sol de la plateforme aéroportuaire est identifiable personnellement. La route que chaque véhicule emprunte lui est communiqué et lui est propre. De par sa réactivité, la fonction routage permet de résoudre les problèmes de circulation au sol. La fonction routage génère alors pas à pas et émet alors des consignes de guidage.

Le système A-SGMS coordonne les trois fonctions de manière simultanée. Cela permet de pouvoir faire face aux multiples aléas qui pourraient entraver le trafic au sol avec toutes les conséquences que cela engendrerait.

2.3 Normalisation

Le concept d'un système tel que A-SGMS est venu afin de pouvoir répondre au besoin de maintenir la sécurité de la circulation tout en optimisant la capacité. Ceci dans le but de pouvoir faire face à la hausse constante et croissante de la demande. Le système A-SGMS est apparu comme une amélioration pour tous les domaines qui touchent à la circulation des appareils au sol de la surface aéroportuaire.

Ici l'idée est d'avoir un système capable de gérer et surveiller l'ensemble des opérations sans avoir à faire intervenir le facteur humain dans la prise de décision. Le côté automatique d'un tel système est apparu dans un premier temps sur un temps technique trop complexe. Aujourd'hui il existe donc un système qui permette d'améliorer les performances en termes de capacité et de sécurité quelles que soient les conditions au sol de la surface aéroportuaire.

L'EUROCAE (The European Organisation of Civil Aviation Equipment) a identifié les systèmes modulaires à mettre en place en précisant les performances attendues pour chacun d'eux.

EUROCONTROL a réfléchi sur les problèmes liés à la mise en œuvre de tels systèmes, la Communauté Européenne ayant lancé plusieurs études sur le sujet. Parallèlement à tout cela, les aéroports importants pressés par leurs besoins opérationnels ont continué à s'équiper de moyens de plus en plus sophistiqués.

3. Configuration d'un aéroport international : le modèle de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V

3.1 Organisation générale d'une plateforme aéroportuaire

Le rendement optimal pour un aéroport ne peut être obtenu que si un équilibre est maintenu entre, d'une part, les terminaux de passagers et de fret et, d'autre part, le système de pistes, les aires de stationnement et les aires d'entretien des avions. Tous ces éléments structurels fonctionnent conjointement via le réseau de voies de circulation. Par conséquent, le réseau routier devient en quelque sorte la base de tous les flux physiques entre les divers éléments de la plate-forme. Ainsi, son exploitation optimale est indispensable au bon fonctionnement de la plate-forme aéroportuaire. Un exemple est l'aéroport marocain de Casablanca Mohammed V (voir Figure I.1 et Figure I.2) : deux terminaux passagers, plus de 500 000 mouvements d'avions par an, avec quatre pistes et deux tours de contrôle.

Le " airside " de l'aéroport peut être schématisé par une large boucle dans laquelle le nœud se compose des pistes et passe par les aires de stationnement des avions (Figure I.3). Il est évident que ce type de représentation manque de profondeur pour permettre de résoudre les problèmes opérationnels relatifs au déplacement des avions au sol, cependant il souligne le caractère cyclique du processus opéré par la plate-forme aéroportuaire sur le flux d'avions qui l'utilisent.

CASABLANCA Mohammed V

TWR 116.300 MHz / 121.300 MHz
GND 130.000 MHz

ELEV
AIRE DE TRAFIC
198m

APP
33° 13' 13" N
007° 34' 34" W

CARTE DES MOUVEMENTS
A LA SURFACE
DE L'AÉRODROME - OACI -

ALTITUDES ET DIMENSIONS EN METRES

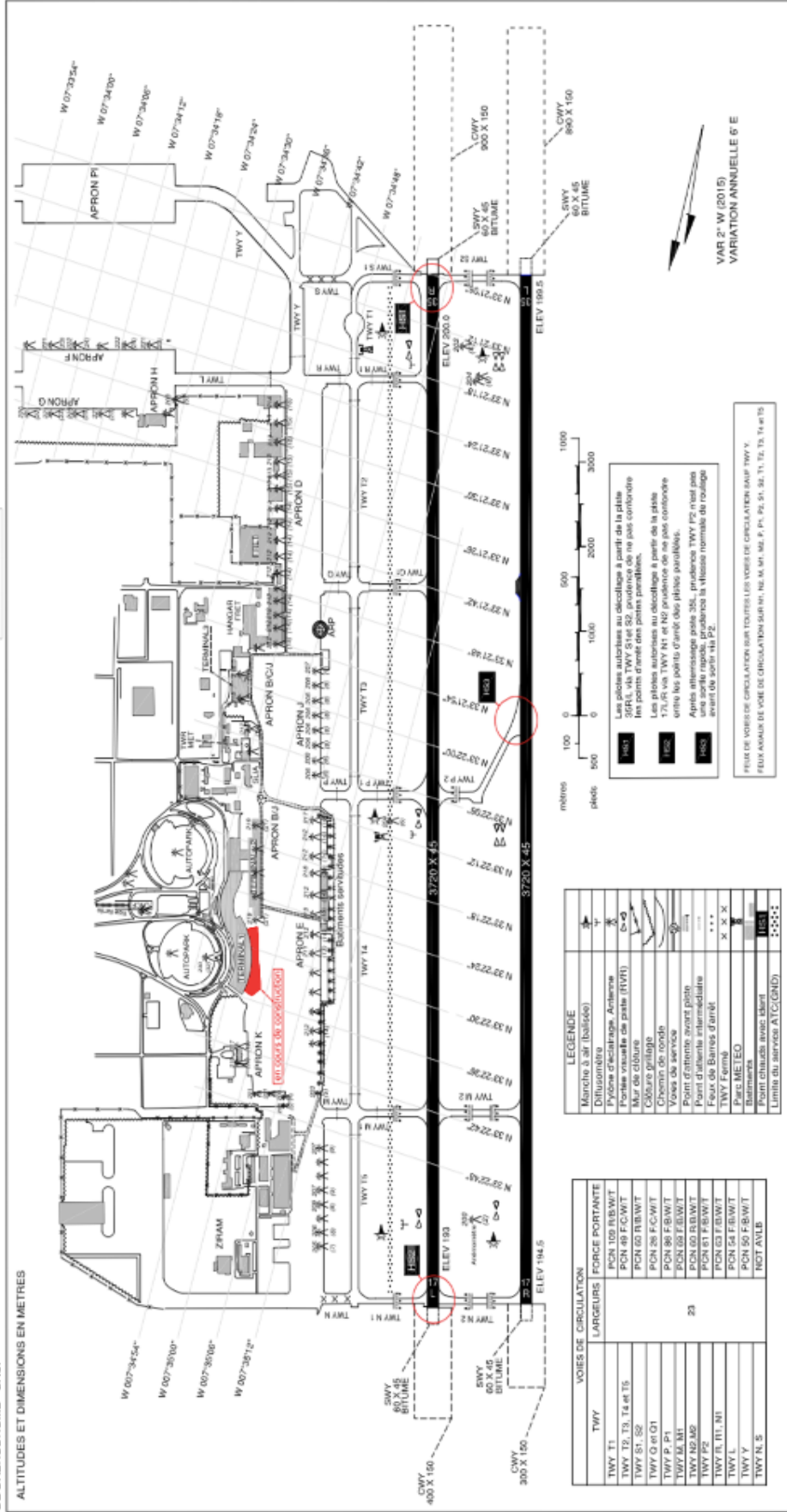
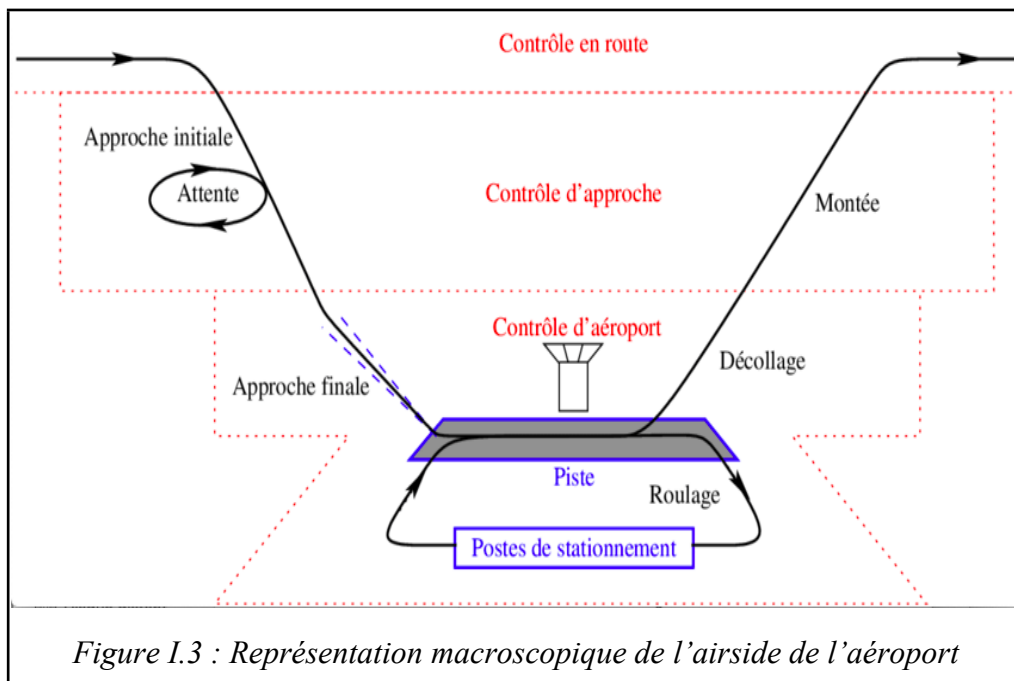


Figure II.2 : Carte des mouvements de surface des aéronefs à l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V

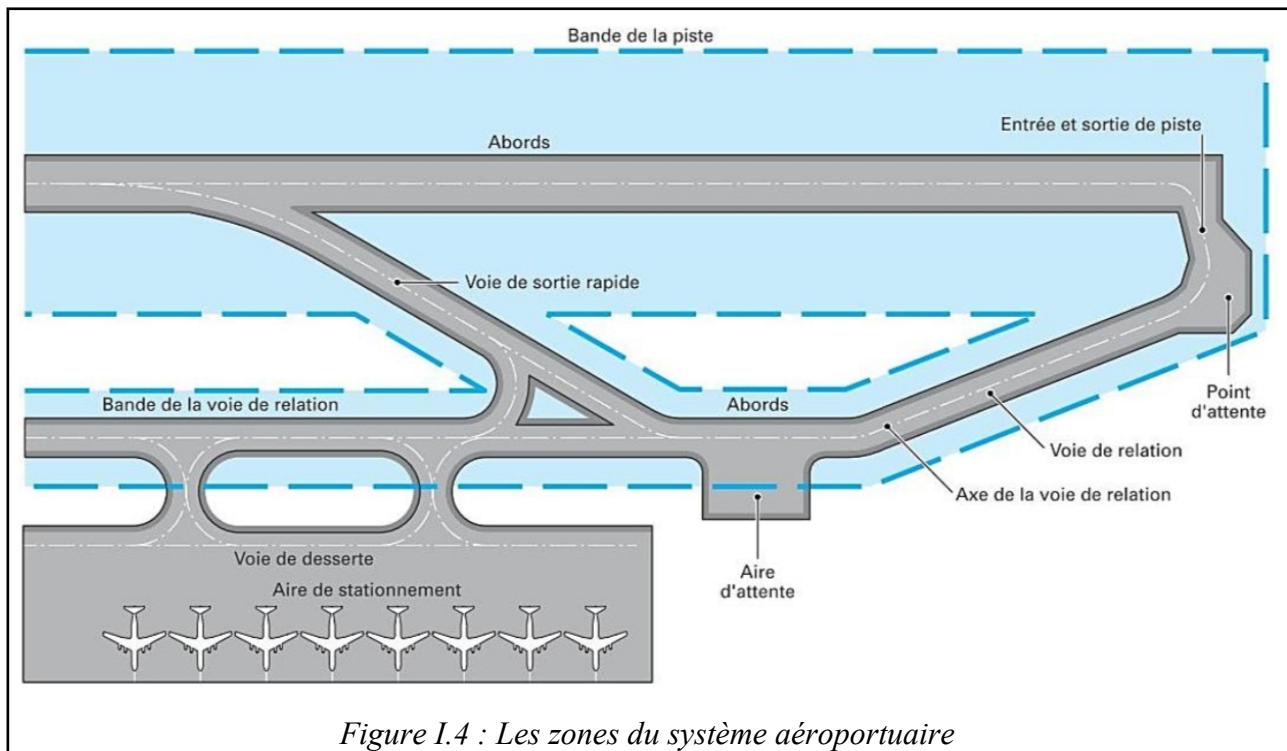


Les mouvements au sol sont classés en trois grandes catégories : les arrivées, les départs et les transferts d'un parking à l'autre.

Alors qu'à moyen terme (la journée), les deux premiers types de mouvements tendent à s'équilibrer en volume, le dernier type demeure accessoire dans de nombreux aéroports.

Du point de vue tant de l'organisation que de l'exploitation, il est possible de dégager des aires de trafic bien distinctes (Figure I.4) : les aires de piste ("runways"), les aires de circulation ("taxiways"), les aires de trafic liées à l'aire de trafic et les aires de stationnement ("apron" et "parking"). Chacune de ces surfaces a des caractéristiques d'exploitation qui lui sont propres et peut être soumise à un contrôle direct assuré par des contrôleurs différents.

Il convient de noter que dans un grand aéroport, plusieurs zones de piste et d'aire de trafic peuvent coexister avec des voies de circulation qui assurent généralement les connexions et l'accessibilité.



Les voies, du fait de leur taille, constituent généralement le principal élément déterminant dans la définition ou la redéfinition d'une plate-forme aéroportuaire. Leur agencement déterminera tant la position et les dimensions des terminaux individuels que la disposition et l'extension des voies de circulation. L'horizon de planification des plates-formes, la croissance du trafic de l'aéroport s'étend sur plusieurs décennies et à mesure que le trafic augmente. Les possibilités de restructuration deviennent alors globalement de plus en plus réduites. Ceci en raison des contraintes d'espace et d'accessibilité limitées et des normes environnementales, toujours plus rigides compte tenu de la tendance générale à la densification de l'occupation de l'espace à proximité des aéroports.

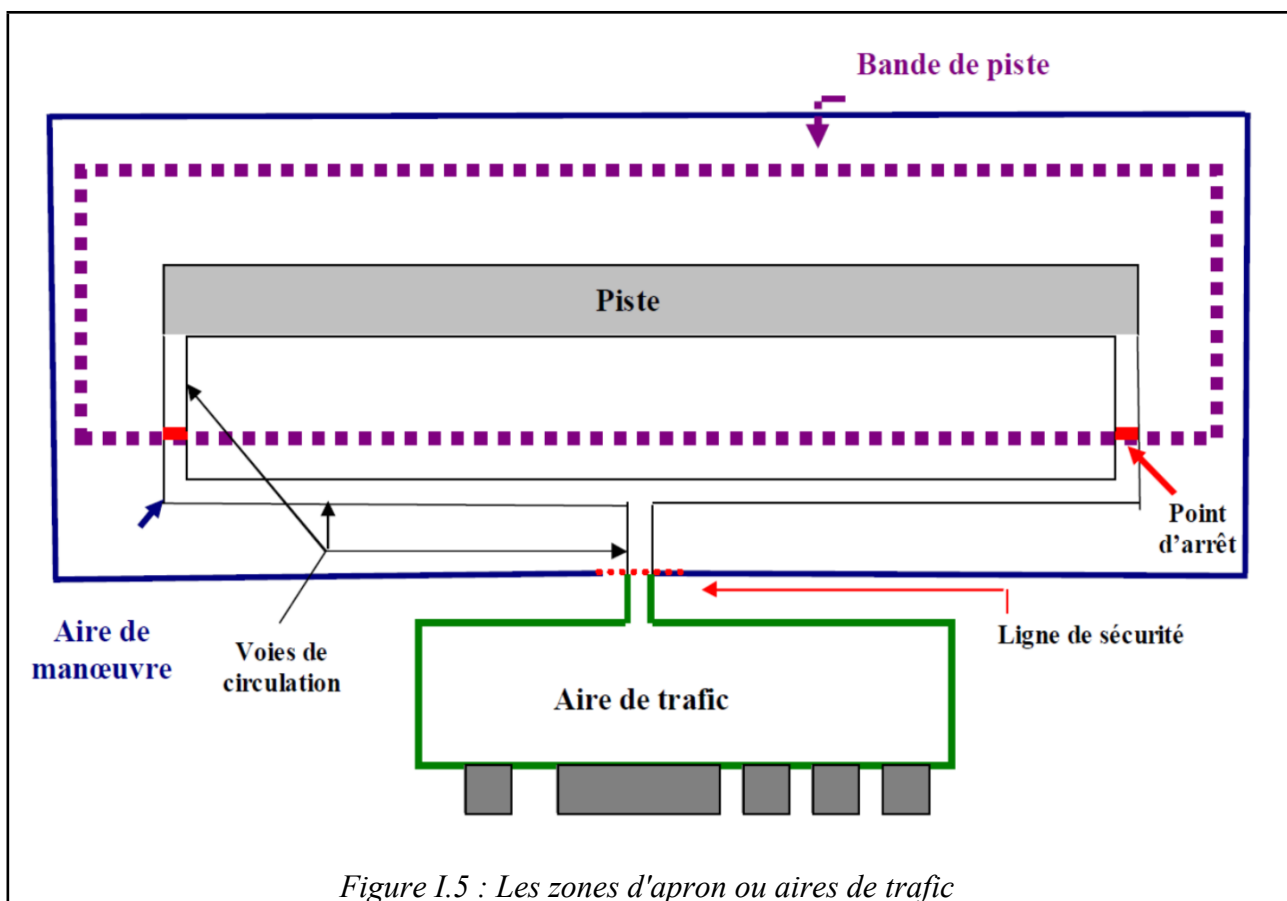
Les principales composantes " airside " de la plate-forme aéroportuaire sont :

- Les aires de stationnement
- Les voies de circulation
- Les pistes.

3.2 Aires de trafic et de stationnement

3.2.1 Aires de trafic

Les aires de stationnement ou aprons sont des zones qui assurent une connexion entre les aires de stationnement et les zones de circulation, qui y sont quelquefois intégrées (voir Figure I.5). Selon l'infrastructure en place dans les aéroports, il est possible que cette zone ne soit pas représentée. Le cas classique est celui des zones de stationnement à système de jetée. Cette zone interdit les déplacements de deux appareils dans des directions opposées en imposant une limitation de la circulation. Dans la plupart des cas, dans le but de prévenir les situations conflictuelles, l'avion qui n'est pas considéré comme prioritaire doit patienter sur la voie de circulation et laisser l'avion prioritaire franchir l'aire de trafic. L'aire de trafic est une zone tampon entre les voies de circulation et les aires de stationnement. Lorsque les aéronefs sont repoussés, l'existence d'une aire de trafic empêche le blocage de la circulation sur les voies de circulation avoisinantes.



3.2.2 Aires de stationnement

Les aires de stationnement sont les zones de la plateforme aérienne conçues pour accueillir les avions lors :

- De l'embarquement ou du débarquement des passagers, de la poste ou du fret
- Du ravitaillement en carburant
- Du stationnement
- De l'entretien.

On peut faire la distinction entre plusieurs types d'aires de stationnement :

- Les aires de stationnement pour le terminal passagers et le fret,
- La maintenance
- Le garage
- L'aviation générale
- Le stationnement temporaire des avions de passage

Le mouvement des aéronefs sur l'aire de manœuvre pour le stationnement peut parfois être un facteur limitant de la capacité des voies de circulation. Le mouvement des avions en "nose-in" peut empêcher les autres avions d'entrer ou de sortir de leur position. Aux heures de pointes ce genre de conflits présente des effets instantanés. La simulation des mouvements de chacun des aéronefs qui seraient susceptibles d'emprunter cette zone pendant les heures de pointe peut permettre de valider à la fois la configuration et les procédures de stationnement.

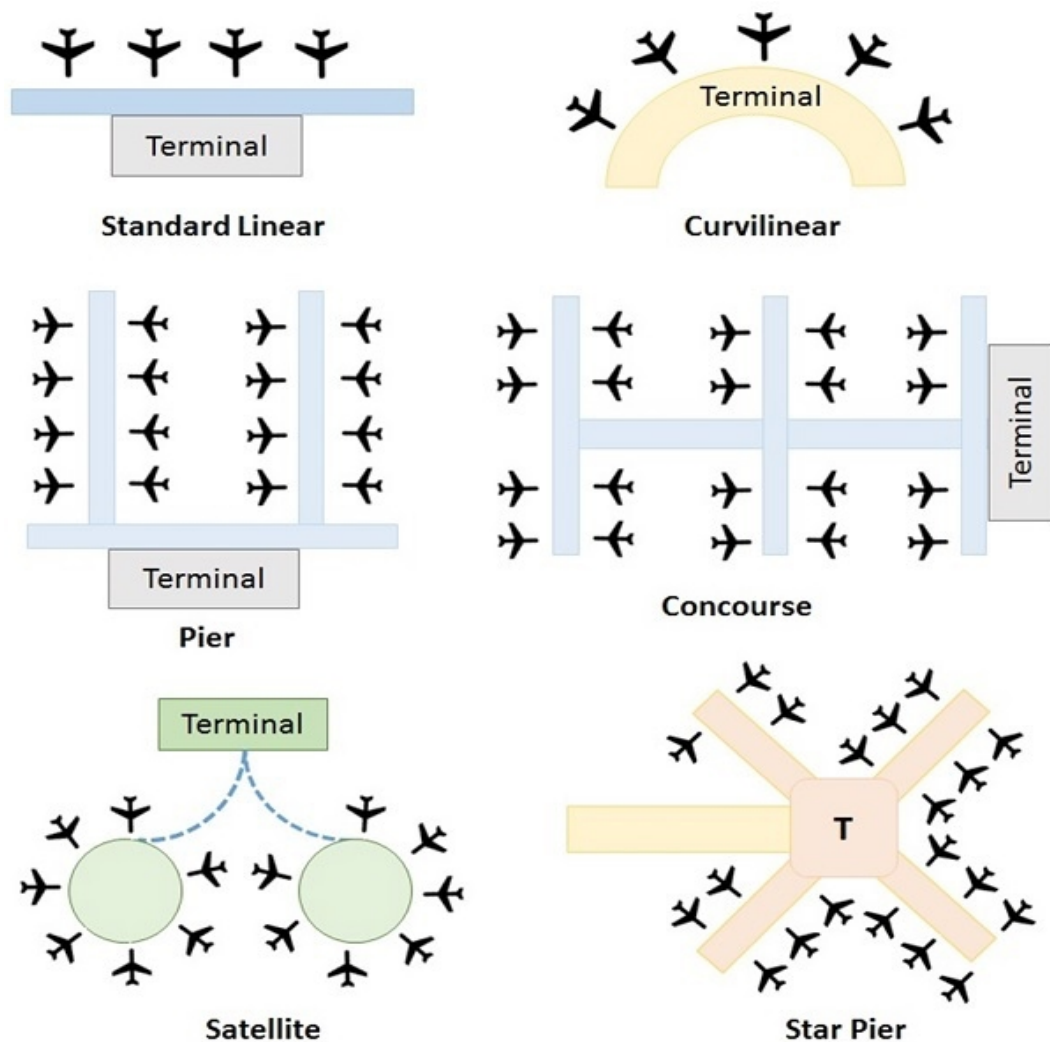


Figure I.6 : Exemples de configurations de postes de stationnement avions

3.3 Les voies de circulation

Dans la majorité des cas, les études sur le terrain ont démontré que les voies de circulation sont une des principaux éléments critiques dans la détermination de la capacité d'une plateforme aéroportuaire. En cas de forte affluence, le manque de voies de circulation ou leur complexité en termes de disposition et d'utilisation peut mener à ce genre de scénario :

Cela concerne les aéroports n'ayant qu'une piste unique sans zone de circulation parallèle. Il n'y a alors qu'un seul point d'entrée et de sortie. Cela peut entraîner des nœuds bloquants,

notamment dans le cas d'un décollage qui suit un atterrissage. Le retard s'accumule et devient égal au temps nécessaire pour traverser la voie afin de la dégager.

Cela concerne donc aussi les aéroports complexes avec de nombreuses voies de circulation qui présentent des croisements et des traversées de voies ou de pistes multiples. Les conflits seront présents au niveau des croisements et des traversées.

Voici quelques principes généraux pour une bonne conception du réseau :

- Le système doit être le plus court possible afin de limiter le temps de mouvement au sol et ainsi de diminuer les coûts d'utilisation
- Le réseau doit être simplifié au maximum afin de faciliter les instructions données par les contrôleurs et éviter les erreurs de compréhension avec les pilotes
- Limiter le besoin d'effectuer des manœuvres compliquées qui peuvent être parfois dangereuses par l'utilisation de tracés le plus rectilignes possible
- N'utiliser les intersections et traversées de piste que si l'on y est obligé
- Favoriser le mouvement en sens unique afin de garder le côté « airside » et ainsi de minimiser les conflits

Une bonne conception du réseau de voies permet à la fois des économies de temps et d'argent lié à l'utilisation de celles-ci. Cela permet aussi de pouvoir s'adapter à la demande qui va croissante en y ajoutant de manière progressive des éléments en plus. Et de pouvoir intégrer sans conflits aux heures de pointe les départs et les arrivées.

Un exemple d'un système de voies de circulation au sol est présenté en figure I.7.

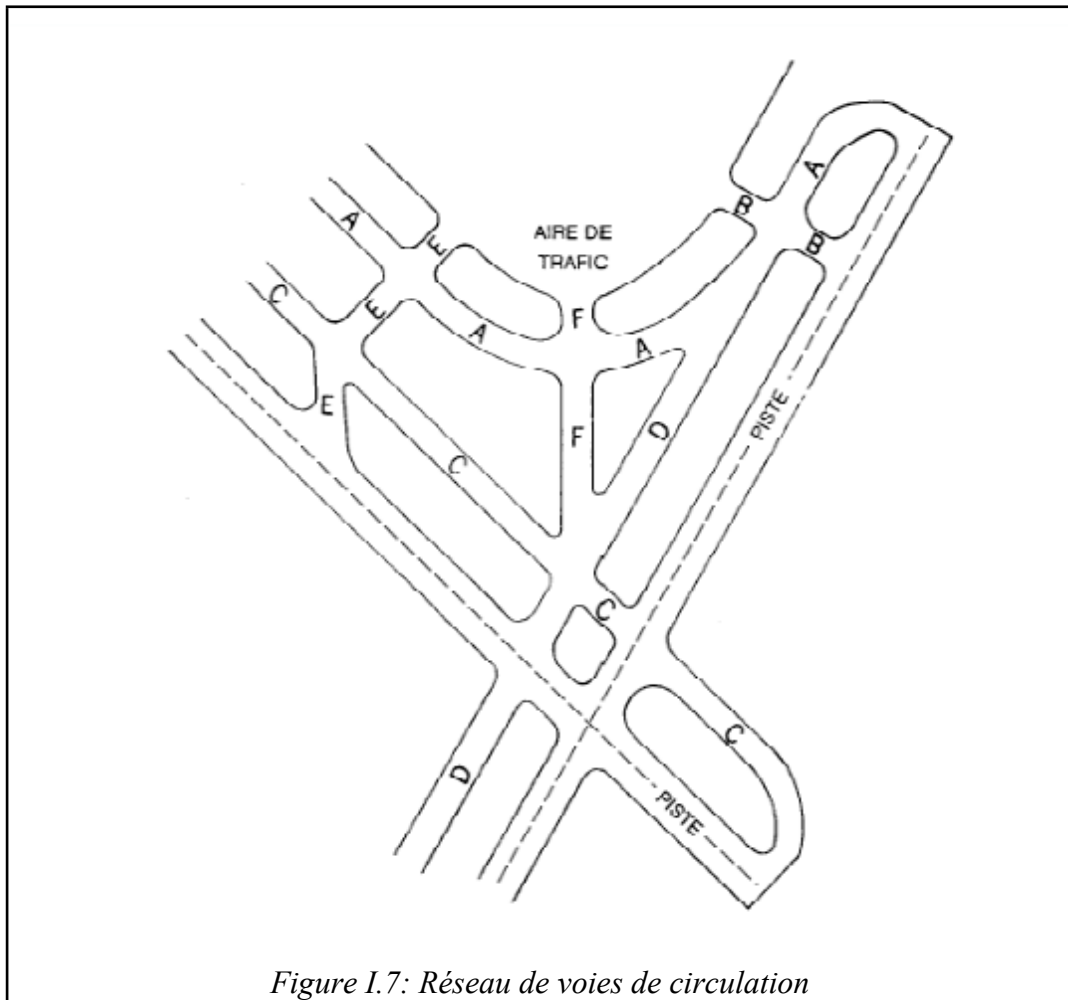


Figure I.7: Réseau de voies de circulation

3.4 Les pistes et sorties de piste

3.4.1 Les pistes

Les pistes sont des aires de circulation d'une plateforme aéroportuaire qui sont réservées au décollage et/ou à l'atterrissage des appareils. Elles représentent le point principal dans un aéroport.

Elles représentent une ressource majeure et leur planification doit faire l'objet d'une attention particulière. Il faut notamment tenir compte des conditions météorologiques et géologiques, de la demande de trafic, de leurs implantations, des habitants alentours, ...

L'intégration des pistes doit permettre de :

- Utiliser de manière optimale le système
- Permettre une gestion fluide des mouvements au sol
- Permettre de dégager le plus vite possible la piste lors des opérations

- Limiter le plus possible les situations de croisement

Il existe différents types de pistes. Dans le cas de l'aéroport de Casablanca Mohammed V, sur lequel s'appuie cette thèse, il est question de l'utilisation de pistes parallèles.

Les pistes parallèles sont caractérisées, d'une part par leurs modes d'exploitation, et d'autre part par l'écartement de leurs axes (Les pistes parallèles rapprochées ou éloignées). Les pistes parallèles peuvent être alignées ou décalées.

3.4.2 Les sorties de piste

La sortie de piste est un espace prévu spécialement pour les arrivées afin de permettre un dégagement de la piste le plus rapidement possible et ce en toute sécurité.

Une voie de sortie rapide est une voie de circulation raccordée à une piste suivant un angle aigu et conçue de façon à permettre à un avion qui atterrit de dégager la piste à une vitesse plus élevée que celle permise par les autres voies de sortie, ce qui réduit au minimum la durée d'occupation de la piste, et par conséquent permet d'augmenter la capacité de l'aérodrome.

Déterminer l'emplacement optimal et le nombre nécessaire de voies de sortie rapide pour un groupe d'avions donné est une tâche relativement complexe vu la multitude des critères à prendre en considération.

Une méthode dite « des trois segments » a donc été mise au point qui permet de déterminer la distance type nécessaire du seuil de la piste au point de dégagement. Cette méthode est fondée sur des considérations analytiques complétées par des suppositions empiriques. En utilisant la méthode des trois segments, on peut déterminer la distance totale requise du seuil de piste au point de dégagement.

La sélection finale du ou des emplacements les plus pratiques pour les voies de sortie rapide doit être adaptée aux exigences globales de la planification et tenir compte d'autres facteurs, tels que :

- L'emplacement de l'aérogare et des aires de trafic.
- L'emplacement des autres pistes et de leurs voies de sortie.
- L'optimisation de la circulation sur les voies de circulation compte tenu des procédures de contrôle de la circulation aérienne.
- L'élimination des détours inutiles sur les voies de circulation, etc.

L'OACI a rassemblé, en 1982, des données sur l'emploi effectif des voies de sortie rapide. Ces données, qui ont été recueillies auprès de 72 aéroports, au cours d'atterrissages sur 229 pistes, ont fourni des renseignements sur le type de voie de sortie, les distances entre le seuil et la sortie, l'angle de sortie et l'emploi de la voie de sortie pour chaque orientation de piste.

Notons toutefois que pour optimiser la sécurité et éviter les incursions de piste lors de dégagements trop rapides, il est préférable de faire aboutir les bretelles de sortie rapide sur un taxiway et non pas directement sur une autre piste.

3.4.3 Les voies d'attente

Les voies d'attente sont un moyen de donner aux contrôleurs aériens une plus grande ouverture afin de planifier les séquences de décollage et d'atterrissage afin d'éviter les retards et optimiser la capacité de l'aéroport.

Elles permettent de :

- Retarder le départ d'un appareil sans pour autant retarder l'ensemble du trafic
- Etablir un VOR de la plateforme aéroportuaire
- Faire des dépassements contrôlés entre les appareils
- Effectuer des opérations lorsque celles-ci ne sont pas possibles sur l'aire de trafic par les membres de l'équipage

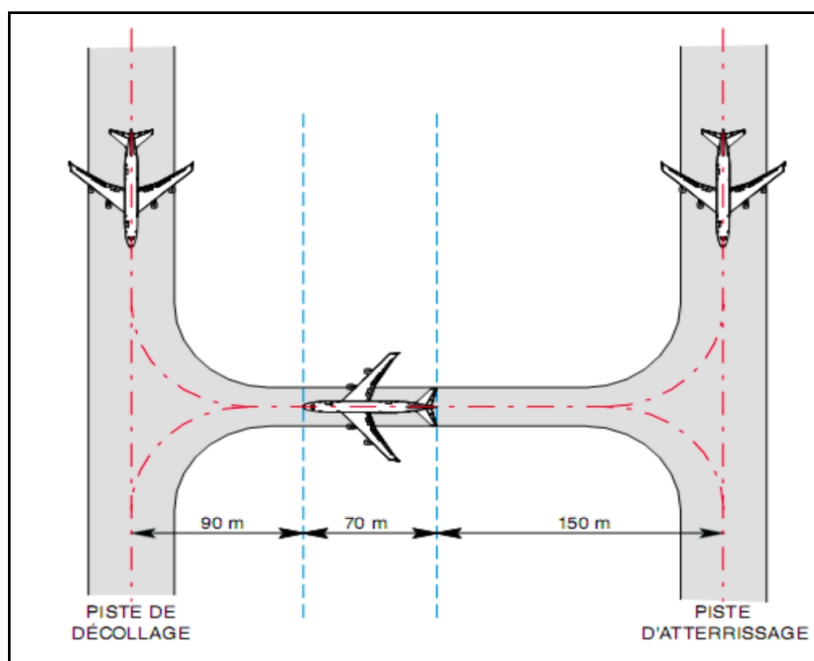


Figure 1.8 : Exemple de distances de sécurité aux abords de la piste

3.5 Les problèmes opérationnels liés à la circulation des avions au sol

3.5.1 Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques jouent un rôle important pour le bon déroulement des opérations sur la plate-forme aéroportuaire. Trois facteurs majeurs posent des problèmes pour le trafic sol : les vents traversiers, les précipitations et la visibilité.

Les vents traversiers influent sur les atterrissages et les décollages. Le service météo de l'aéroport se doit d'informer les usagers de la direction et de l'intensité des vents traversiers.

Les précipitations modifient l'adhérence des pneus, avec un impact direct sur la sécurité et la manœuvrabilité de l'avion. Les opérations sur la plate-forme aéroportuaire se déroulent jusqu'à un niveau limite des précipitations. Au-delà de cette limite, tout mouvement sera interdit. Les précipitations peuvent être sous forme de pluie, de neige, de glace etc. La formation de la glace pose des problèmes particuliers au moment du décollage. Pour combattre la formation et le dépôt de glace sur les ailes des avions, des zones de dégivrage sont prévues sur les aires de trafic de certains aéroports. Les conditions de visibilité influent sur l'écoulement du trafic. La règle « vu et être vu » continue à être appliquée pour le contrôle de la circulation sur la plate-forme aéroportuaire. Les conditions de visibilité sont classées en quatre niveaux.

En ce qui concerne les manœuvres d'atterrissage et plus particulièrement d'atterrissage automatique, les conditions de visibilité peuvent être classés :

- CAT I : visibilité supérieure à 800m,
- CAT II : visibilité inférieure à 800m et supérieure à 400m, à partir de ce niveau des procédures spéciales sont appliquées pour la gestion de mouvement des avions au sol,
- CAT IIIA : visibilité inférieure à 400m et supérieure à 200m,
- CAT IIIB : visibilité inférieure à 200m et supérieure à 50m,
- CAT IIIC : visibilité inférieure à 50m.

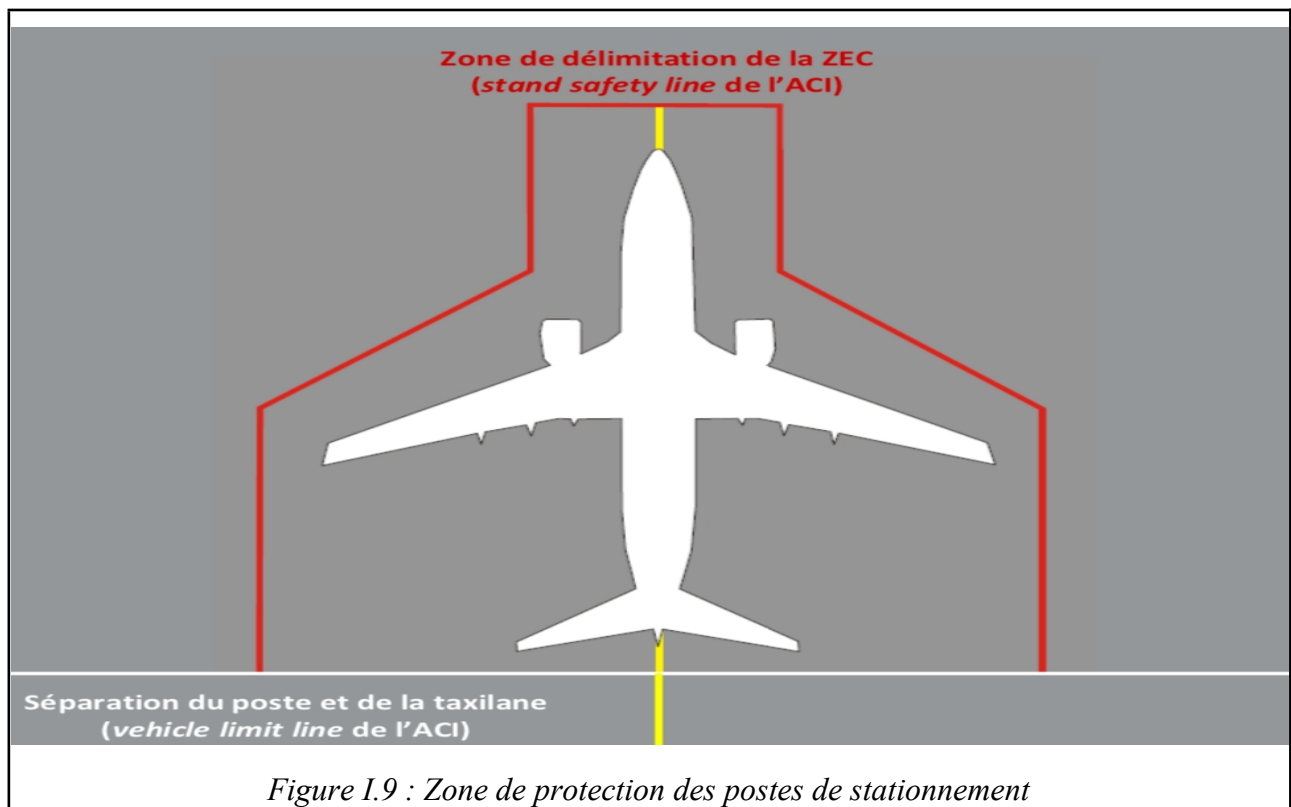
3.5.2 Les performances de l'avion

Les performances des avions au sol sont caractérisées principalement par :

- Les vitesses de décollage et d'atterrissage et les durées d'occupation des pistes (en fait fonction de la masse de l'avion et des conditions météorologiques) ;

- La vitesse de déplacement de l'avion sur les voies de circulation (20 nœuds en général)
- Les temps et distances standards de freinage et d'accélération ;
- Les rayons de virage minimaux ;
- Les vitesses maximales en virage ;
- L'encombrement de l'avion (envergure et longueur) au roulage et au poste de stationnement ;
- Les capacités de manœuvre autonome au poste de stationnement ;
- La compatibilité avec les moyens d'embarquement/débarquement des passagers et du fret.

La séparation longitudinale au roulage des aéronefs est de 75m et de 90m par mauvaise visibilité. La séparation minimale entre deux d'avions (queue, extrémité de l'aile) au poste de stationnement est de 7,5 mètres.

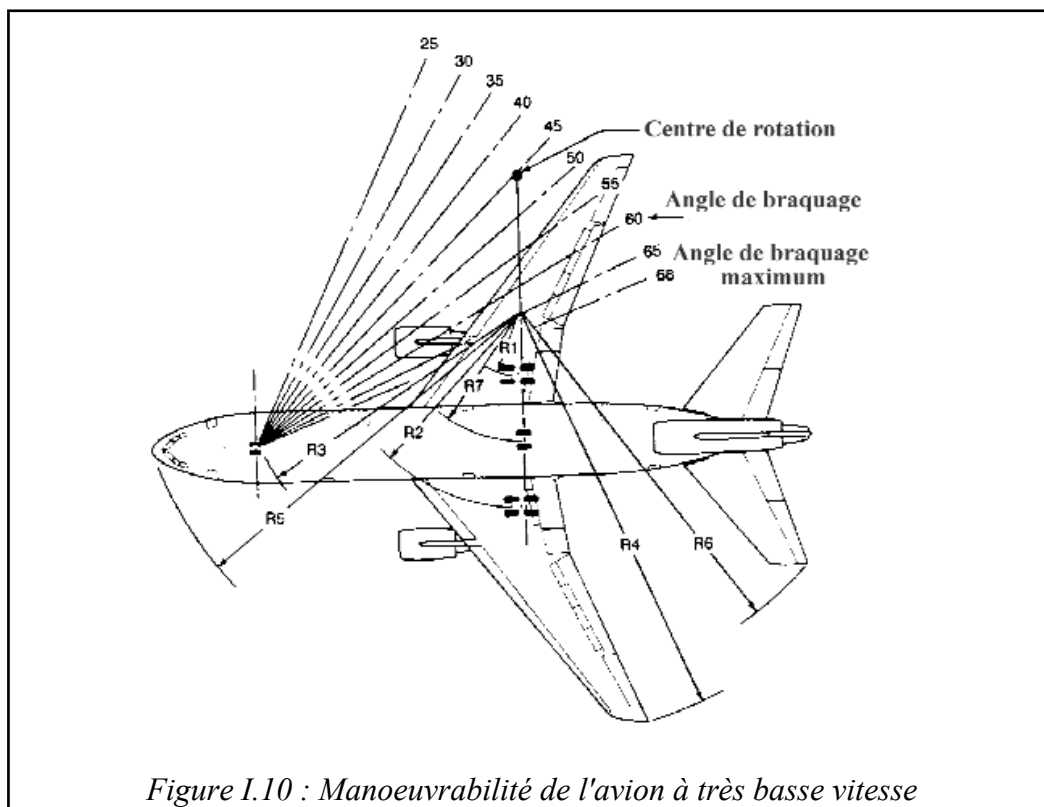


En ce qui concerne la capacité opérationnelle des pistes on est amené à distinguer cinq classes d'aéronefs qui déterminent les séparations minimales à l'atterrissage et au décollage entre deux avions. Ce critère de séparation considère en fait le danger constitué par les turbulences de sillage qui ont déjà été la cause de plusieurs accidents :

- Classe 1 : appareils de masse maximale au décollage (MTWO) supérieure à 136 tonnes (par exemple B747, A300, DC10)
- Classe 2 : appareils de masse maximale au décollage comprise entre 40 et 136 tonnes (B727, B737, A320, DC9)
- Classe 3 : appareils de masse maximale au décollage comprise entre 5,7 et 40 tonnes (F27, F28, DH7, ATR42)
- Classe 4 : appareils bimoteurs de moins de 5,7 tonnes (Beech99, BN2A, Twin-Otter)
- Classe 5 : appareils monomoteurs de moins de 5,7 tonnes (les avions d'aéro-club, de travail aérien)

Ce critère est basé sur les masses maximales au décollage, étroitement liées à la taille des avions et donc aux turbulences. Les appareils de classe 5 volent presque toujours en VFR (Visual Flight Rules), contrairement aux appareils de classe 4, ce qui modifie considérablement les règles de séparation.

Par exemple, un Airbus A320 est un avion de classe 2 (77 tonnes), avec 150 places dans la version passagers, de longueur totale de 37,57m et d'envergure de 34,10m



3.6 Les fonctions associées au contrôle du trafic au sol

Le contrôle local est responsable des arrivées et des départs des avions sur les pistes, ainsi que des avions opérant dans l'espace aérien de l'aéroport. Plusieurs contrôleurs locaux peuvent être actifs simultanément. Le contrôle sol est responsable du guidage des avions au sol ne nécessitant pas la traversée des pistes actives (cette opération étant sous la responsabilité du contrôle local). Le contrôle sol peut émettre la clearance pour effectuer le repoussage, le roulage, il peut attribuer des chemins vers chaque piste et finalement il remet le contrôle de l'avion et la communication au contrôle local. Le contrôleur de poste est responsable de la gestion des avions au départ. Le contrôleur reçoit un appel de la part du pilote, lui indiquant que l'appareil est prêt pour le repoussage (s'il s'agit d'un jet) ou pour le roulage (pour les autres avions), et il marque le moment de l'appel sur la bande de progression du vol. Le contrôleur de poste fait alors une estimation du temps de repoussage/roulage dans le cas où une attente est nécessaire, et cette estimation est également inscrite sur la bande de progression du vol. Au final, le contrôle poste remet l'avion au contrôle sol selon de principe « premier arrivé, premier servi », sauf conditions spéciales ou une restriction concernant l'instant de décollage, qui nécessitent l'application des procédures différentes. L'émission de clearances concerne les clearances de départ. Le contrôleur de clearances vérifie que les plans de vol sont complets et corrects, et communique verbalement l'altitude initiale. L'émission de clearances peut être confirmée par le contrôle de poste. Le responsable des données de vol distribue l'information. Il vérifie l'intégrité des plans de vol avant de remettre la bande de progression du vol au contrôleur de clearances. Le coordinateur du trafic transmet toutes les restrictions du trafic au sol, ainsi que les alertes météorologiques, au superviseur de la tour. Il fait le compte rendu de toutes les restrictions de trafic influant sur l'activité de la piste et des événements spéciaux. En coordination avec le superviseur de la tour et le contrôleur de secteur aérien voisin de l'aéroport, il décide du taux d'arrivées et de départs de l'aéroport. La supervision de tour concerne la planification stratégique, les décisions tactiques et la gestion du nombre de contrôleurs assignés à différentes fonctions de contrôle du trafic des avions au sol. Le monitoring à vue est la pratique courante, dans des conditions de bonne visibilité, employée par les contrôleurs de trafic afin d'évaluer l'état de trafic. La représentation du trafic peut être réalisée sur des écrans radar. Ainsi les positions des avions (et d'autres véhicules) au sol et leurs identificateurs peuvent être affichées. Ce

type de représentation est utilisée principalement dans des conditions de mauvaise visibilité où le monitoring à vue est inefficace. La représentation radar du trafic aérien environnant est utilisée principalement par le contrôle local. La communication radio entre les pilotes et les contrôleurs est encore le moyen d'échange de l'information nécessaire au bon déroulement de mouvement des avions au sol : état de l'avion, les clearances, les demandes de repoussage, les points d'arrêts, les chemins à suivre etc.

4. Conclusion

Cette partie a introduit la gestion du trafic des avions au sol qui apparaît donc comme un problème extrêmement complexe où la difficile équation sécurité x efficacité doit être résolue aussi bien sur le long, le moyen et le court terme. Cette problématique met en jeu des multiples acteurs venant contraindre de façon complexe l'espace décisionnel des gestionnaires du trafic sol, ce qui semble se traduire par des structures complexes de gestion et de contrôle.

En résumé, si sur le plan macroscopique, la plate-forme aéroportuaire peut être appréhendée comme un serveur traitant des flux d'avions à l'arrivée pour les réinjecter dans le trafic aérien la reliant aux autres plateformes aéroportuaires, si l'on augmente le degré de l'analyse, on s'aperçoit très vite de la diversité des situations et des configurations existantes, associées à des degrés de complexité très variables dans la structure du trafic au sol. Devant tant de diversité, on mesure la difficulté à développer des concepts généraux de gestion de trafic sol, applicables dans toutes ces situations.

La sécurité et la régularité de l'écoulement du trafic ne sont pas les seuls soucis des services responsables de la circulation au sol des avions : la rapidité est plus que jamais à l'ordre du jour. Le temps que perdent les avions à circuler au sol parmi les méandres des voies de circulation et des files d'attente est considérable et il en résulte un gaspillage d'énergie et une augmentation importante de la consommation de carburant (et des coûts d'exploitation), du bruit et de la pollution environnementale. Une meilleure utilisation du réseau des voies de circulation et certaines solutions visant à réduire le temps de roulage pourraient y remédier et entraîner des économies de carburant et des coûts d'exploitation. Ceci passe sûrement par le développement de systèmes d'aide à la décision qui permettront d'améliorer, voire d'optimiser, l'écoulement du trafic sur la plate-forme aéroportuaire et dans son espace aérien immédiat.

Chapitre II:
Prévisions et Optimisations Relatives à la Répartition
des Mouvements de l'Avion au Sol

1. Introduction

L'augmentation constante du trafic aérien pose divers problèmes, dont la stagnation au sol de l'aéronef. Ce problème devient de plus en plus complexe et se pose sur différentes étapes. Les mouvements au sol en sont l'un des principaux facteurs. Particulièrement dans le cas des aéroports qui ne sont pas munis d'un radar de surface et où un nombre important d'aéronefs se partagent des ressources limitées telles que les trajets entre la porte d'embarquement et la piste. La croissance du trafic aggrave le problème de circulation au sol ce qui nous amène à chercher des solutions pour minimiser les délais de retard et améliorer la gestion du trafic au sol.

L'Aircraft Scheduling Programming (ASCP) détermine les itinéraires optimaux pour un ensemble d'aéronefs visant à minimiser les retards en fonction des capacités des voies de circulation (taxiway) et d'une série de contraintes opérationnelles. L'horaire des aéronefs joue un rôle essentiel dans la gestion et l'exploitation d'un système complexe de mouvements au sol au sein d'un aéroport.

L'horaire des aéronefs donne les heures d'arrivée et de départ de tous les aéronefs au sol à chaque nœud. Dans l'exploitation aéroportuaire réelle, les aéronefs sont planifiés de manière stricte et ordonnée en fonction d'un horaire connu.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études se sont penchées sur l'ASCP. L'ASCP est connu pour permettre de trouver la solution optimale au problème d'ordonnancement. Afin que l'aéronef puisse être placé à temps sur la piste, des techniques basées sur la programmation dynamique ont été proposées [1].

Une autre étude a présenté une solution à l'ordonnancement des départs sur les pistes à l'aide de la programmation linéaire (MILP) [2] [3] [4].

Certaines études ont augmenté la demande aéroportuaire en prédisant les heures de départ des vols [5].

L'ASCP est connu pour être NP-hard et la solution optimale peut ne pas être disponible à grande échelle. [6].

De nombreuses techniques d'optimisation sont appliquées dans les algorithmes d'ASCP pour obtenir une solution satisfaisante, dont la procédure Branch-and-Bound [7]. Malgré l'énorme vitesse de calcul des supercalculateurs, la résolution d'ASCP prend encore un temps

déraisonnablement long, et la solution obtenue n'est que partiellement optimale, voire approximative.

Aujourd'hui, avec le développement de l'industrie informatique, les systèmes informatisés permettent aux contrôleurs aériens de mettre en œuvre plus efficacement leurs méthodes manuelles.

En outre, certaines simulations opérationnelles se sont principalement centrées sur l'exploitation des aéronefs selon un horaire connu. Les caractéristiques comportementales des systèmes aéroportuaires et les exigences de sécurité peuvent être bien illustrées par des approches de simulation. Les modèles de simulation sont considérés comme un environnement d'essai plutôt que comme un outil de planification.

Cependant, en tant qu'outil d'ordonnancement, le développement de l'approche fait face à deux principaux obstacles :

- La formation d'une impasse d'aéronef.
- Un plan d'ordonnancement de mauvaise qualité.

La modélisation du mouvement au sol des aéronefs dans une plateforme aéroportuaire contient des voies à sens unique (taxiway). Il peut se produire une situation d'impasse dans laquelle un certain nombre d'aéronefs ne peuvent pas continuer leur trajet.

Une fois que l'impasse sera réglée dans la zone conflictuelle, elle s'étendra rapidement à l'ensemble de la plateforme aéroportuaire. Le mécanisme de formation de l'impasse des aéronefs est encore inexplicable dans le domaine de l'exploitation aéroportuaire notamment dans la gestion des mouvements au sol. Certains algorithmes proposés pour éviter l'impasse sont assez conservateurs, ce qui entraîne un gaspillage inutile des ressources de l'infrastructure [8].

L'évitement de l'impasse était encore un grand défi dans la simulation synchrone et le système de dispatching en temps réel. De plus, les méthodes de simulation actuelles dépendent généralement de l'expérience pratique des contrôleurs aériens. De ce fait, la solution obtenue par la méthode de simulation peut s'écarter sensiblement de la solution optimale.

Cependant, si ces obstacles sont résolus efficacement, l'horaire obtenu par la méthode de simulation peut fournir des services plus fiables et plus flexibles. En effet, la simulation aéroportuaire peut traiter des scénarios complexes et décrire avec précision le comportement opérationnel des aéronefs. De plus, dans le domaine de la reprogrammation des aéronefs, elle serait un outil puissant qui pourrait être utilisé pour aider les contrôleurs aériens à réagir rapidement, notamment en cas d'urgence.

Par rapport aux approches publiées, le modèle et la méthode proposés dans le présent document peuvent présenter les caractéristiques distinctives suivantes pour un modèle de liaison par nœud et un horaire donné :

Méthode d'ordonnancement basée sur un algorithme prenant en compte la direction, les voies de circulation générale et transversale et les séparations en fonction de la turbulence de sillage entre les aéronefs au sol.

Le modèle de programmation non linéaire à nombres entiers mixtes est conçu pour l'ASCP dans un système aéroportuaire pour la gestion des mouvements au sol (voie à sens unique). Le modèle intègre de nombreux facteurs dans le processus réel de répartition des aéronefs, tels que plusieurs espacements entre les aéronefs (turbulence de sillage) et la capacité des taxiways. Une caractéristique unique du modèle proposé est d'étudier la sensibilité variable des aéronefs au retard.

Notamment, la capacité des voies de circulation.

Une méthode heuristique basée sur la méthode globale Conflicts-Distribution-Prediction-Ground (CDPG) est présentée. Elle est issue d'un cadre de simulation basé sur un système dynamique piloté par événements. Les deux obstacles susmentionnés sont éliminés par la méthode heuristique. [9]

Le mécanisme de formation de l'impasse des aéronefs. Une méthode d'évitement des impasses est proposée. Elle garantit qu'aucune impasse ne se produira et améliore en même temps l'utilisation des ressources de l'infrastructure.

Le mécanisme d'optimisation de la décision des mouvements au sol est exploré lors de la modélisation du mouvement des aéronefs. Sur la base d'une distribution globale analysante des conflits entre les aéronefs, la décision de choix d'itinéraire presque optimal est prise de sorte que la performance du système soit proche de l'optimal.

Ce chapitre présente un algorithme adaptatif basé sur les méthodes de FCFS et de CDPG inspirés d'un article sur la planification des chemins de fer [9] et l'ordonnancement des aéronefs au sol [10]. Cet algorithme, cependant, ne permettait pas le réacheminement des trains, ce qui les empêchait d'explorer tout l'espace de la solution. Cet algorithme facilite le réacheminement des aéronefs, assurant ainsi une optimalité globale. La partie 2 décrit la formulation mathématique de l'ASCP. Dans la partie 3, une approche heuristique basée sur le CDPG est proposée pour résoudre l'ASCP. La partie présente les résultats et discussions. Les conclusions sont présentées à la fin de ce chapitre.

2. Énonciation du modèle

Ce chapitre porte sur une plateforme aéroportuaire de l'aéroport Mohammed V, plus précisément sur les mouvements au sol tels qu'illustrés à la (Figure II.1). Les aéronefs se rencontrent et se déplacent sur différents chemins de l'aéroport ou aux croisements. Il est admis que chaque aéronef a une heure de départ préétablie à son parking d'origine. Les directions de circulation des aéronefs sont classées en deux types : Piste-Parking et Parking-Piste.

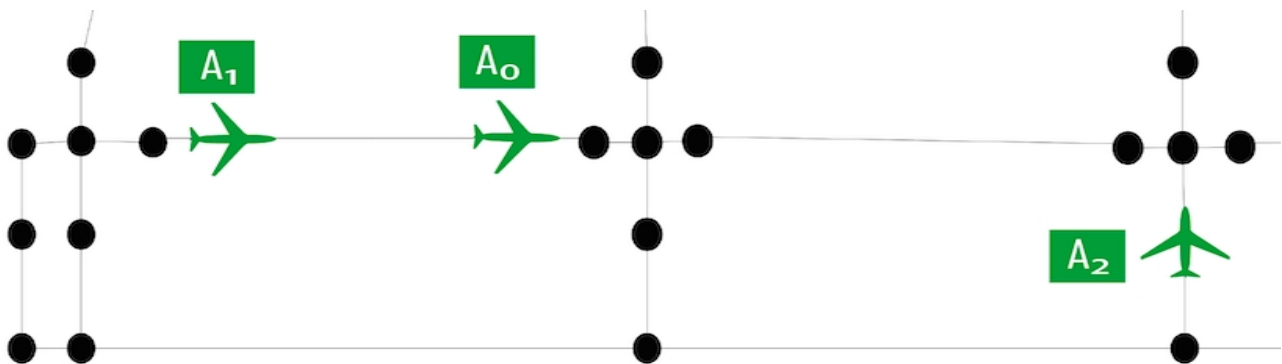


Figure II.1 : Exemple de voie de circulation à voie unique (taxiways)

L'aéroport Mohammed V (Figure I.1, Figure I.2) [11] dispose de deux pistes, 35R/17L et 35L/17R, chacune ayant son propre type de mouvement. Cette configuration s'appelle des pistes spécialisées selon l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Pour mieux modéliser et projeter cette étude sur le terrain, le scénario est le suivant :

- Graphique $G = (V, E)$ où les sommets V sont les points de l'aéroport (position, point d'attente et intersection).
- Les voies de circulation sont représentées par des arcs.
- La piste 35R/17L est opérationnelle, et destinée à l'atterrissage et au décollage en même temps.

Deux graphiques orientés ont été développés. Le premier graphique (Figure II.2) est dédié au décollage et le second (Figure II.3) à l'atterrissage. Le but de cette séparation est de mieux visualiser les différents chemins pour chaque cas [12].

Le modèle tient compte de certains facteurs qui influent sur la sensibilité des aéronefs aux retards, notamment les types des aéronefs et leur chemin parcouru au sol. De plus, les comportements complexes des aéronefs à proximité de la piste sont ciblés. Lorsque les aéronefs entrent ou quittent une piste, les contrôleurs aériens de l'aéroport doivent organiser les itinéraires

des aéronefs d'arrivée ou de départ. Le modèle tient compte de tous les conflits possibles entre les aéronefs qui occupent les ressources de l'aéroport. De plus, la capacité de l'aéroport est prise en compte dans le modèle. Elle correspond au nombre maximal d'aéronefs pouvant circuler dans les chemins empreintés (Taxiways). De nombreux travaux antérieurs veillent à ce que le nombre d'aéronefs au sol ne dépasse pas la capacité maximale de l'aéroport. Dans ce chapitre, le choix du chemin de l'aéronef est adapté dans le modèle pour éviter la discrétisation de l'horizon temporel. La perte de temps, due à la décélération, au temps d'attente sur les points d'attente ou à l'intersection est également prise en compte. Évidemment, le modèle est plus proche de l'exploitation aéroportuaire réelle que des ouvrages de la littérature.

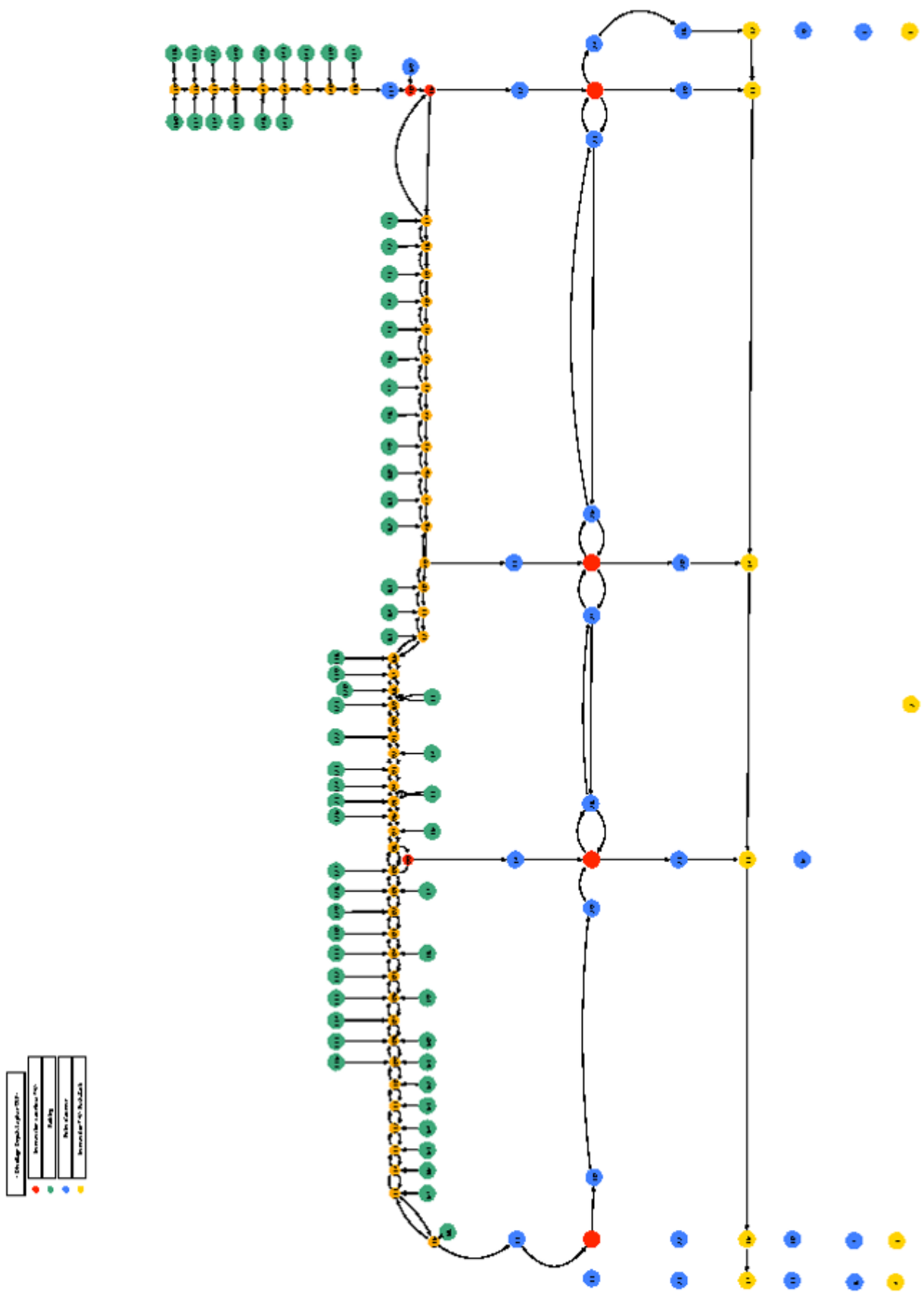


Figure II.2 : Scénarios de décollage pour l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V

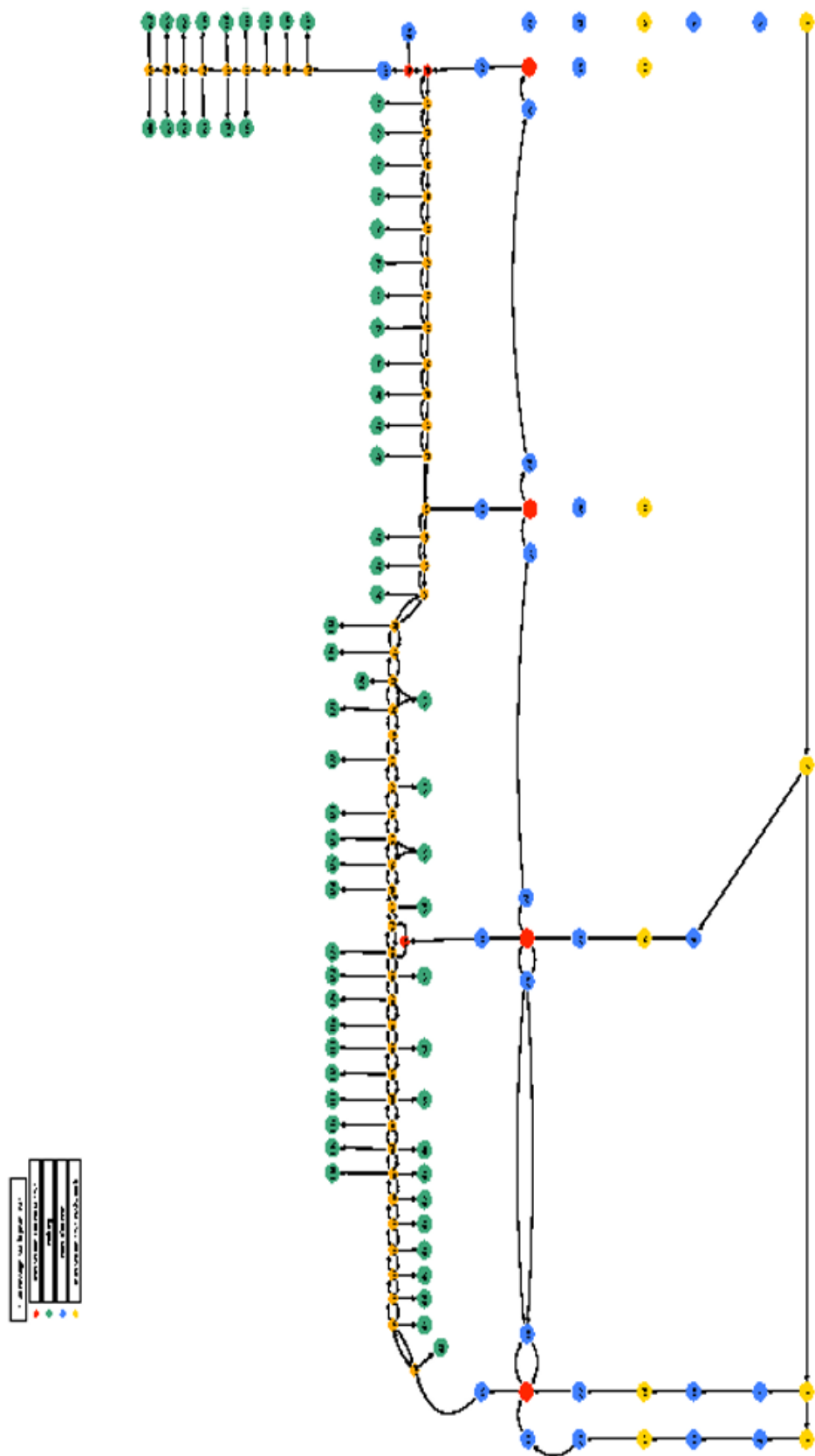


Figure II.3 : Scénarios d'atterrissage pour l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V

2.1 Notations

Cette représentation est similaire à celle de [9].

Tableau II.1 : Indices utilisés dans les expressions

Symbole	Description
a_1, a_2	Indice des aéronefs.
n, n^+	Indice des nœuds
i	Indice de taxiway ou de piste.
V	L'ensemble de tous les aéronefs.
V^p	L'ensemble des aéronefs en direction du parking.
V^r	L'ensemble des aéronefs en direction de la piste.
N_{a_1}	L'ensemble des Nœuds sur l'itinéraire de l'aéronef a_1 .
$l_{u,n}$	L'ensemble des taxiways praticables de l'aéronef a_1 sur un nœud $n(n \in N_{a_1})$

Tableau II.2 : Paramètres

Symbole	Description
L_{n,n^+}	Distance entre le nœud a_1 et le nœud n^+
$f_{a_1}^{n,n^+}$	Temps libre pour l'aéronef a_1 sur le tronçon entre le nœud n et son prochain nœud $n(n, n^+ \in N_{a_1})$
F_{a_1}	Temps libre de l'aéronef a_1 sur l'ensemble de son parcours
Λ_{a_1}	L'ensemble des niveaux de retard de l'aéronef a_1 c'est-à-dire $\Lambda_{a_1} = \{\lambda_{a_1}^1, \lambda_{a_1}^2, \dots, \lambda_{a_1}^m\}$ Ici, $\lambda_{a_1}^k$ est le k-ème niveau de retard de l'aéronef a_1 , et m est le nombre de niveaux de retard.
C_{a_1}	L'ensemble des coefficients de coût de l'aéronef a_1 , c'est-à-dire $C_{a_1} = \{C_{a_1}^1, C_{a_1}^2, \dots, C_{a_1}^m\}$ Ici, $C_{a_1}^k$ est le coefficient de coût correspondant au niveau de retard $\lambda_{a_1}^k$
$w_{a_1,n}$	Temps d'attente de l'aéronef a_1 au nœud n
h^{aa} / g^{aa}	Intervalle Arrivée-Arrivée, c'est-à-dire le temps nécessaire pour organiser des itinéraires d'arrivée des aéronefs lorsque deux aéronefs arrivent séquentiellement au même nœud. h^{aa} est l'intervalle pour les aéronefs ayant la même direction, et g^{aa} est celui des aéronefs ayant une direction opposée.
h^{dd} / g^{dd}	Ecart entre deux départs, c'est-à-dire le temps nécessaire afin d'organiser les itinéraires de départ

	des aéronefs quand deux aéronefs partent séquentiellement du même nœud. h^{dd} est l'écart entre les aéronefs ayant la même direction, g^{dd} et est celui des aéronefs ayant une direction opposée.
h^{da} / g^{da}	Ecart entre le départ et l'arrivée, c'est-à-dire le temps nécessaire pour organiser l'itinéraire des aéronefs à l'arrivée après avoir organisé l'itinéraire de l'aéronef au départ du nœud. h^{da} est l'écart pour les aéronefs ayant la même direction, g^{da} et est celui des aéronefs ayant une direction opposée.
h^{ad} / g^{ad}	Ecart entre l'arrivée et le départ, c.-à-d. le temps requis pour organiser l'itinéraire pour les aéronefs au départ après avoir organisé l'itinéraire pour l'aéronef à l'arrivée. h^{ad} est un écart pour les aéronefs ayant la même direction, et g^{ad} est celui pour les aéronefs ayant une direction opposée
$t_{a_1}^0$	L'heure de départ prévue de l'aéronef a_1 depuis son parking
τ_b	Durée de circulation de l'aéronef au nœud n
$\tau_{a_1,e}^a$	Perte de temps supplémentaire de l'aéronef a_1 pour l'accélération lors de l'arrêt de l'aéronef a_1 au départ du nœud.
$\tau_{a_1,e}^d$	Perte de temps supplémentaire de l'aéronef a_1 pour la décélération lorsque l'aéronef a_1 doit s'arrêter au nœud suivant.
M	Constante suffisamment grande.

Tableau II.3 : Variables :

Symbole	Description
$t_{a_1,n}^a$	Heure d'arrivée de l'aéronef a_1 au nœud n
$t_{a_1,n}^d$	Heure de départ de l'aéronef a_1 du nœud n
Δt_{a_1}	Temps de retard de l'aéronef a_1
$\xi_{a_1,a_2,n}^{aa}$	Variable binaire, si l'aéronef a_1 arrive plus tôt au nœud n que l'aéronef a_2 , alors $\xi_{a_1,a_2,n}^{aa} = 1$ sinon $\xi_{a_1,a_2,n}^{aa} = 0$
$\xi_{a_1,a_2,n}^{dd}$	Variable binaire, si l'aéronef a_1 part plus tôt du nœud n que l'aéronef a_2 , alors $\xi_{a_1,a_2,n}^{dd} = 1$, sinon $\xi_{a_1,a_2,n}^{dd} = 0$
$\xi_{a_1,a_2,n}^{da}$	Variable binaire, si l'aéronef a_1 part du Nœud n avant que l'aéronef arrive au nœud n , alors $\xi_{a_1,a_2,n}^{da} = 1$ sinon $\xi_{a_1,a_2,n}^{da} = 0$
$\xi_{a_1,a_2,n}^{ad}$	Variable binaire, si l'aéronef a_1 arrive au nœud n avant le départ de l'aéronef a_2 du nœud n ,

	$\xi_{a_1, a_2, n}^{ad} = 1$ Sinon $\xi_{a_1, a_2, n}^{ad} = 0$
$\zeta_{a_1, n}^i$	Variable binaire, si l'aéronef u occupe la voie (taxiway) i au nœud r , alors $\zeta_{a_1, n}^i = 1$, sinon $\zeta_{a_1, n}^i = 0$
$\zeta_{a_1, a_2}^{n, n^+}$	Variable binaire, qui est utilisée pour décrire les priorités des aéronefs de sens opposé pour occuper le même segment. Si l'aéronef a_1 est occupé avant le segment entre le nœud n et le nœud n^+ de l'aéronef a_2 , alors $\zeta_{a_1, a_2}^{n, n^+} = 1$ sinon $\zeta_{a_1, a_2}^{n, n^+} = 0$
$\delta_{a_1}^n$	Variable binaire, qui est utilisée pour indiquer si l'aéronef a_1 s'arrête au nœud n . Si l'aéronef a_1 s'arrête au nœud n , alors $\delta_{a_1}^n = 1$ Sinon $\delta_{a_1}^n = 0$

2.2 Modèle d'optimisation

2.2.1 Description du modèle.

Le modèle d'optimisation de l'ASCP pour les mouvements au sol est décrit comme suit :

- Les contraintes liées aux points d'attentes

$$t_{a_1, n}^a + w_{a_1, n} + \tau_b \leq t_{a_1, n}^d \quad \forall a_1 \in V; n \in N_{a_1} \quad (1)$$

- Contraintes d'arrêt/de non-arrêt:

$$M \cdot \delta_{a_1}^n \geq t_{a_1, n}^a + \tau_b - t_{a_1, n}^d \quad \forall a_1 \in V; n \in N_{a_1} \quad (2a)$$

$$M \cdot \delta_{a_1}^n \geq t_{a_1, n}^d - t_{a_1, n}^a - \tau_{b_1} \quad (2b)$$

$$M \cdot (1 - \delta_{a_1}^n) > t_{a_1, n}^a + \tau_b - t_{a_1, n}^d \quad (2c)$$

- Contraintes de temps de parcours libre:

$$t_{a_1, n}^d + f_{a_1}^{n, n^+} + \delta_{a_1}^n \cdot \tau_{a_1, e}^a + \delta_{a_1}^{n^+} \cdot \tau_{a_1, e}^d \leq t_{a_1, n^+}^a \quad \forall a_1 \in V; n, n^+ \in N_{a_1} \quad (3)$$

- Contraintes de flux d'arrivée-arrivée :

$$t_{a_1, n}^a + h^{aa} \leq t_{a_2, n}^a + (1 - \xi_{a_1, a_2, n}^{aa}) \cdot M \quad \forall a_1, a_2 \in V^r \quad \text{ou} \quad a_1, a_2 \in V^p, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (4a)$$

$$t_{a_1, n}^a + g^{aa} \leq t_{a_2, n}^a + (1 - \xi_{a_1, a_2, n}^{aa}) \cdot M \quad \forall a_1 \in V^r, a_2 \in V^p \quad \text{ou} \quad a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (4b)$$

$$\xi_{a_1,a_2,n}^{aa} + \xi_{a_2,a_1,n}^{aa} = 1 \quad (4c)$$

- Contraintes de flux de départ :

$$t_{a_1,n}^d + h^{dd} \leq t_{a_2,n}^d + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{dd}).M \quad \forall a_1, a_2 \in V^r \quad \text{ou} \quad a_1, a_2 \in V^p, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (5a)$$

$$t_{a_1,n}^d + g^{dd} \leq t_{a_2,n}^d + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{dd}).M \quad a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (5b)$$

ou

$$\xi_{a_1,a_2,n}^{dd} + \xi_{a_2,a_1,n}^{dd} = 1 \quad \forall a_1, a_2 \in V, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (5c)$$

- Contraintes de flux arrivée-départ :

$$t_{a_1,n}^a + h^{ad} \leq t_{a_2,n}^d + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{ad}).M \quad \forall a_1, a_2 \in V^r \quad \text{ou} \quad (6a)$$

$$a_1, a_2 \in V^p, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2}$$

$$t_{a_1,n}^d + g^{ad} \leq t_{a_2,n}^d + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{ad}).M \quad \forall a_1 \in V^r, a_2 \in V^p \quad \text{ou} \quad a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (6b)$$

- Contraintes de flux départ-arrivée :

$$t_{a_1,n}^d + h^{da} \leq t_{a_2,n}^a + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{da}).M \quad \forall a_1, a_2 \in V^r \quad \text{ou} \quad a_1, a_2 \in V^p, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (7a)$$

$$t_{a_1,n}^d + g^{da} \leq t_{a_2,n}^a + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{da}).M \quad a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (7b)$$

ou

- Contraintes de corrélation entre $\xi_{a_1,a_2,n}^{ad}$ et $\xi_{a_1,a_2,n}^{da}$

$$\xi_{a_1,a_2,n}^{ad} + \xi_{a_1,a_2,n}^{da} = 1 \quad \forall a_1, a_2 \in V, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (8)$$

- Contraintes de marquage

$$\xi_{a_1,a_2,n}^{dd} = \xi_{a_1,a_2,n^+}^{aa} \quad \forall a_1, a_2 \in V^r \quad \text{ou} \quad a_1, a_2 \in V^p, a_1 \neq a_2; n, n^+ \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (9)$$

- Les contraintes du carrefour des rencontres :

$$t_{a_1,n^+}^a + g^{ad} \leq t_{a_2,n^+}^d + (1 - \xi_{a_1,a_2}^{n,n^+}).M \quad \forall a_1 \in V^r, a_2 \in V^p \quad \text{ou} \quad (10a)$$

$$a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n, n^+ \in N_{a_1}, N_{a_2}$$

$$\xi_{a_1,a_2}^{n,n^+} + \xi_{a_2,a_1}^{n,n^+} = 1 \quad \forall a_1 \in V^r, a_2 \in V^p \quad \text{ou} \quad a_1 \in V^p, a_2 \in V^r; n, n^+ \in N_{a_1}, N_{a_2} \quad (10b)$$

- les contraintes de capacité des nœuds d'intersection :

$$\sum_{i|j \in a_{1,n}} \zeta_{a_{1,n}}^i = 1 \quad \forall a_1 \in V; n \in N_n \quad (11a)$$

$$t_{a_1,n}^d + h^{da} \leq t_{a_2,n}^a + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{aa}).M + (1 - \zeta_{a_1,n}^i).M + (1 - \zeta_{a_2,n}^i).M \quad \forall a_1, a_2 \in V^p \quad (11b)$$

$$a_1, a_2 \in V^r, a_1 \neq a_2; n \in N_{a_1}, N_{a_2}; i \in I_{a_1,n}, I_{a_2,n}$$

$$t_{a_1,n}^d + g^{da} \leq t_{a_2,n}^a + (1 - \xi_{a_1,a_2,n}^{aa}).M + (1 - \zeta_{a_1,n}^i).M + (1 - \zeta_{a_2,n}^i).M \quad \forall a_1, a_2 \in V^p \quad (11c)$$

$$a_1, a_2 \in V^r; n \in N_{a_1}, N_{a_2}; i \in I_{a_1,n}, I_{a_2,n}$$

- Contraintes d'heure de départ :

$$t_{a_1,0}^d \geq t_{a_1}^0 \quad \forall a_1 \in V \quad (12)$$

2.2.2 Explication du modèle

Les contraintes (2 a) - (2 c) expriment la relation entre l'heure d'arrivée et l'heure de départ

d'un aéronef d'un nœud dans deux situations, à savoir l'arrêt et le non-arrêt. La variable binaire $\delta_{a_1}^n$ est introduite pour décrire si l'aéronef a_1 s'arrête au nœud n . Les contraintes (2 a) et (2 b) assurent la relation entre l'heure d'arrivée et l'heure de départ d'un aéronef en cas de non-arrêt c'est-à-dire.

$$t_{a_1,n}^a + \tau_b = t_{a_1,n}^d \quad \text{if } \delta_{a_1}^n = 0$$

Alors que les contraintes (2 c) portent sur le cas des aéronefs s'arrêtant au nœud, c'est-à-dire

$$t_{a_1,n}^a + \tau_b < t_{a_1,n}^d \quad \text{if } \delta_{a_1}^n = 1$$

La contrainte (6) relie les heures d'entrée et de sortie d'un aéronef sur un segment (taxiway).

En cas d'arrêt, deux pertes de temps supplémentaires $\tau_{a_1,e}^a$ et $\tau_{a_1,e}^d$ sont prises en compte en raison de l'accélération de l'aéronef au départ du nœud et de la décélération de l'aéronef arrivant au nœud.

Dans la voie à sens unique (taxiway), lorsque les aéronefs arrivent au nœud ou en partent, les contrôleurs aériens doivent organiser le parcours des aéronefs. Lorsque deux aéronefs consécutifs arrivent ou partent, un intervalle de temps doit être respecté et les itinéraires pour les différents aéronefs doivent être organisés. Certains paramètres de flux des différents scénarios sont décrits à la figure II.4, et ces flux peuvent se référer aux [9].

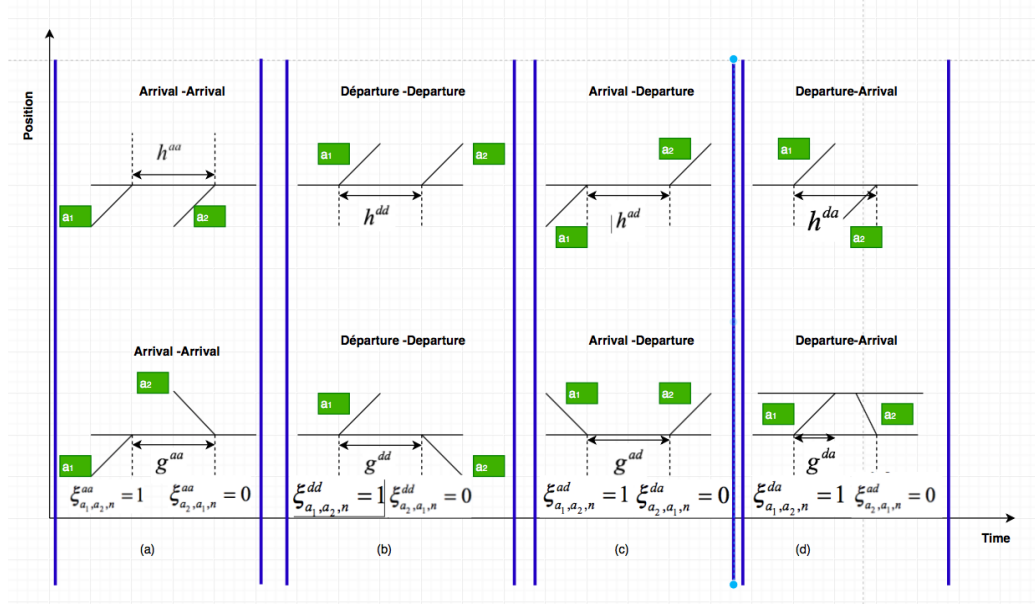


Figure II.4 : Plusieurs scénarios d'intervalle pour les avions sur un nœud (ou intersection).

Les contraintes (4) - (7) présentent la relation entre l'heure d'arrivée ou de départ de deux avions consécutifs pour assurer ces flux. Par exemple, les contraintes (4) assurent que l'intervalle de temps entre les heures d'arrivée de deux avions consécutifs soit supérieur ou égal au paramètre h^{aa} ou g^{aa} . Le paramètre h^{aa} est l'intervalle Arrivée-Arrivée entre deux avions consécutifs dans une même direction. g^{aa} est l'intervalle Arrivée-Arrivée pour deux avions consécutifs en sens inverse. La variable de décision $\xi^{aa}_{a_1,a_2,n}$ reflète la priorité d'arrivée de deux avions au nœud.

La contrainte (4 c) permet de s'assurer qu'il n'y a qu'une seule valeur non nulle entre $\xi^{aa}_{a_1,a_2,n}$ et $\xi^{aa}_{a_2,a_1,n}$. De même, les équations (5) - (7) présentent respectivement les contraintes d'espacement entre deux départs consécutifs, et les contraintes d'espacement entre le départ et l'arrivée.

Les contraintes (8) soulignent la corrélation entre $\xi^{ad}_{a_1,a_2,n}$ et $\xi^{da}_{a_2,a_1,n}$.

Les contraintes (9) portent sur le comportement de traçage de deux avions dans la même direction dans un segment (taxiway). En d'autres termes, cela signifie que le comportement de dépassement ne peut pas se produire dans le segment.

Les contraintes (10) précisent le comportement de croisement entre deux aéronefs en sens inverse. Si deux aéronefs de sens opposés doivent occuper le même segment à la fois, un aéronef doit attendre au nœud pour que l'autre aéronef puisse traverser. La variable binaire ξ_{a_1, a_2}^{n, n^*} est introduite pour décrire la priorité de l'aéronef a_1 et a_2 pour le segment entre les deux nœuds n et n^* .

Les contraintes (11) se concentrent sur la capacité des nœuds d'intersection. En général, la capacité du nœud est liée au nombre de voies (taxiway). Dans le présent chapitre, on suppose qu'une voie (taxiway) d'un nœud d'intersection n'est utilisée que par un seul aéronef à la fois. Ainsi, à tout moment, le nombre d'aéronefs circulant dans le taxiway ne peut excéder la capacité du nœud. Ici, le choix de la voie (taxiway) de l'aéronef est également adopté, mais pour refléter la capacité du nœud.

La variable binaire $\varsigma_{a_1, n}^i$ indique si l'aéronef a_1 sélectionne la voie i dans le nœud $(n \in N_{a_1})$. Si c'est vrai, alors $\varsigma_{a_1, n}^i = 1$, sinon $\varsigma_{a_1, n}^i = 0$. Les contraintes (11a) indiquent qu'un aéronef ne peut contenir qu'une voie pour un certain nœud. Si deux aéronefs choisissent le même nœud, un aéronef doit arriver au nœud après le départ de l'autre aéronef du nœud. De plus l'espacement Départ-Arrivée entre eux est garanti (voir contraintes (11 b) et (11 c)). De toute évidence, les contraintes (11 b) et (11 c) garantissent qu'une certaine voie (taxiway) ne peut desservir qu'un seul aéronef à la fois, et garantissent en outre que le nombre d'aéronefs ne dépasse à aucun moment la capacité maximale.

Dans le modèle, on suppose que chaque aéronef a une heure de départ préétablie de son parking d'origine. La contrainte (12) garantit que l'heure réelle de départ de l'aéronef de son parking d'origine ne doit pas être antérieure à l'heure de départ prévue.

3 Approche heuristique utilisant la prédiction de la distribution des conflits

3.1 Cadre général de l'approche heuristique

Cette partie présente une programmation non linéaire complexe en nombres entiers de mixage pour l'ASCP. Un grand nombre de variables binaires, comme, $\xi_{a_1, a_2, n}^{aa}$, $\xi_{a_1, a_2, n}^{dd}$, $\xi_{a_1, a_2, n}^{ad}$, $\xi_{a_2, a_1, n}^{da}$

rendent la résolution du modèle difficile. Il est donc nécessaire de concevoir une méthode efficace adaptée pour les avions [9].

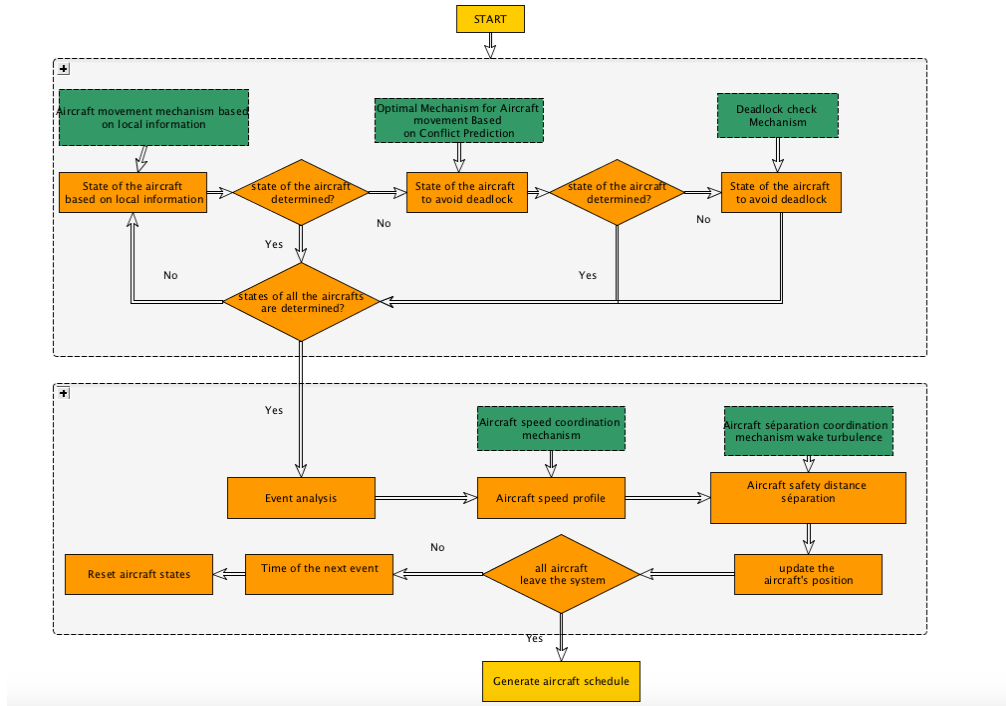


Figure II.5 : Cadre général de l'approche heuristique.

Pour l'obtention rapide et de haute qualité du plan de planning, la figure II.5 montre le cadre général de l'approche heuristique proposée dans ce chapitre. Sur la base d'une modélisation du mouvement des avions au sol, l'heure d'arrivée et de départ des avions peut être obtenue à chaque Nœud. Deux caractéristiques importantes de la méthode heuristique sont d'expliquer précisément le mécanisme de formation des blocages et de présenter un mécanisme d'optimisation de la stratégie de déplacement des avions basés sur la prédiction de la distribution globale des conflits au sol. C'est pourquoi la méthode heuristique est appelée « CDPG » dans la description qui suit.

Comme le montre la Figure II.5, le CDPG se compose de deux parties : la détermination des macro-états des avions et la mise à jour dynamique du système par des événements.

La première partie est cruciale, elle décide si un plan de planning réalisable et de haute qualité est obtenu. Premièrement, deux statuts d'avions, c'est-à-dire « en mouvement » et « à l'arrêt », sont définis pour refléter deux stratégies de déplacement différentes des avions.

Dans la section 3.2 de ce chapitre, trois mécanismes de prise de décision sont présentés pour déterminer l'état des avions. On voit donc le mécanisme de déplacement basé sur l'information

obtenu, le mécanisme de vérification de l'impasse et le mécanisme d'optimisation basé sur la prévision de la répartition des conflits.

La détermination des états des aéronefs reflète en fait les valeurs d'un grand nombre de variables binaires du modèle, comme $\xi_{a_1, a_2, n}^{aa}$, $\xi_{a_1, a_2, n}^{dd}$, $\xi_{a_1, a_2, n}^{ad}$, $\xi_{a_2, a_1, n}^{da}$.

La section 3.2.1 de ce chapitre précise que, dans certains scénarios, l'état des aéronefs ne peut être déterminé qu'à partir d'informations locales.

Le mécanisme de contrôle de blocage à la section 3.2.2 et l'optimisation de l'itinéraire de l'aéronef à la section 3.2.3 sont représentés par des rectangles verts sur la figure II.5. Ce sont deux modules centraux du CDPG. Basée sur l'analyse du mécanisme de formation de l'impasse, la procédure de vérification de l'impasse est conçue pour juger si l'état de mouvement au sol d'un aéronef entraîne une situation d'impasse potentielle. La procédure de contrôle des impasses proposée permet d'éviter efficacement l'impasse dans laquelle se trouvent les aéronefs et d'améliorer l'utilisation des infrastructures.

Dans le module d'optimisation des déplacements, une stratégie locale de gestion des conflits est appliquée pour prédire la distribution globale des conflits entre les aéronefs. En fonction du résultat de la répartition des conflits, les états des aéronefs sont conçus de manière à réduire autant que possible les coûts de retard des aéronefs.

La section 3.5 de ce chapitre décrit plus en détail le comportement d'exploitation des aéronefs en fonction des états de circulation des aéronefs. Un mécanisme de coordination de la vitesse des aéronefs est appliqué pour déterminer la vitesse des aéronefs en état de mouvement. Le mécanisme de coordination assure également que les comportements d'exploitation des aéronefs soient soumis à toutes les contraintes du modèle proposé précédemment à la section 2.2 de ce chapitre.

Le CDPG est issu du système événementiel dynamique discret. Dans le modèle d'événement discret proposé [10], l'arrivée ou le départ des aéronefs est considéré comme un « événement », qui conduit à une mise à jour progressive du système. Dans la section 3.6, le concept d'événement est encore élargi pour analyser tous les comportements possibles des aéronefs. Par exemple, un événement Départ-Départ - Intervalle de départ est défini pour décrire le comportement de l'aéronef sous contraintes (8) dans le modèle. Sur la base de l'analyse de tous les événements possibles dans la section 3.6, il est possible d'obtenir un intervalle de temps flexible, qui détermine la mise à jour du système.

3.2 Analyse des décisions de mouvement de l'aéronef

3.2.1 Décisions de mouvement de l'aéronef basés sur des informations obtenues

Les états des aéronefs sont classés en trois catégories :

- « en mouvement »,
- « à l'arrêt » et
- « indéterminé ».

L'état de « mouvement » signifie que l'aéronef peut se diriger vers son nœud frontal.

L'état d'« Arrêt » indique que le l'aéronef doit s'arrêter au nœud ou sur le taxiway.

L'objectif de l'analyse des décisions de mouvement est de déterminer l'état de l'aéronef de « indéterminé » à « en mouvement » ou « à l'arrêt »

Dans certains scénarios spécifiques, les stratégies de déplacement des aéronefs ne peuvent être explicitement jugées que sur la base des informations locales. La Figure II.6 présente ces scénarios dans lesquels l'aéronef A_0 (l'aéronef prioritaire) a une seule et unique stratégie de déplacement.

L'aéronef A_0 se trouve au nœud (point d'arrêt) (voir la Figure II.6 (a)). Évidemment, l'aéronef doit s'arrêter au nœud jusqu'à ce que son délai d'attente soit terminé. Dans la Figure II.6 (a), t_{A_0} est le temps que l'aéronef A_0 a déjà consacré au temps d'attente.

Si l'aéronef A_1 opposé qui circule dans le segment suivant l'aéronef A_0 , celui-ci doit s'arrêter au nœud (point d'arrêt) (voir Figure II.6 (b1)). S'il y a l'aéronef A_1 opposé en état de mouvement depuis le nœud suivant l'aéronef A_0 , celui-ci doit s'arrêter au nœud actuel (voir Figure II.6 (b2)). Il est à noter que, si l'état de l'aéronef A_1 est indéterminé dans la Figure II.6 (b2), l'état de l'aéronef A_0 ne peut être déterminé. Il reflète un mécanisme de verrouillage entre les aéronefs, c'est-à-dire que les états A_0 et A_1 sont dépendants l'un de l'autre.

L'état de l'aéronef A_0 est influencé par l'écart entre le départ — départ. Tel que présenté par la contrainte (5) à la section 3.2.2.

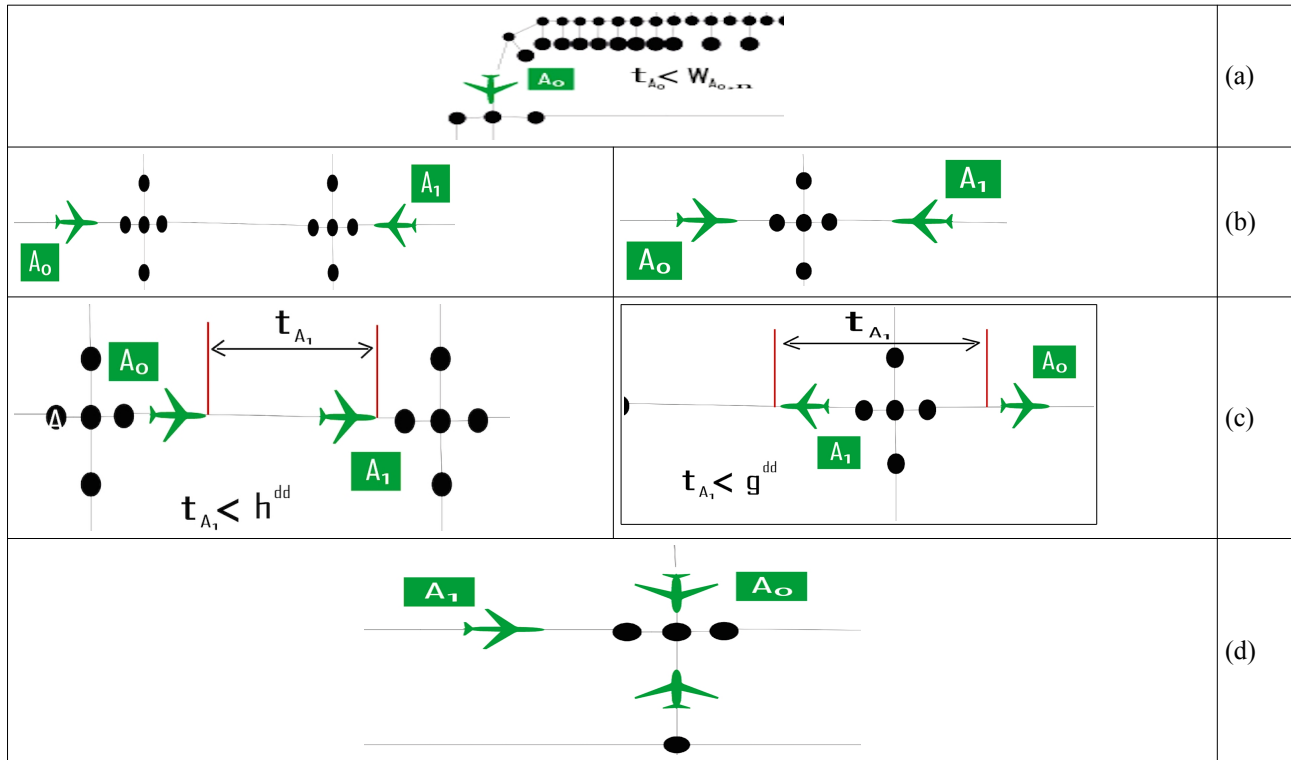


Figure II.6 : Mouvements de l'aéronef basés sur des informations obtenues

Lorsque deux aéronefs passent par le même nœud, l'espacement départ - départ entre ces deux aéronefs doit être respecté. Dans la Figure II.6 (c), l'aéronef A_0 doit s'arrêter. Dans les Figures II.6 (c1) et (c2), t_{A_1} est le temps que l'aéronef A_1 a passé après son départ du nœud.

L'état de l'aéronef A_0 est influencé par la capacité limitée du nœud. Dans la Figure II.6 (d), l'aéronef A_1 circule dans le segment vers le point chaud (nœud d'intersection) de l'aéronef A_0 , et il occupera une voie (taxiway) frontale. Cependant, il n'y a pas de voie libre pour l'aéronef A_1 . Évidemment, l'aéronef A_0 doit partir de la voie liée à son nœud afin de libérer la voie avant que l'aéronef A_1 n'arrive à la voie. Ici, il est à noter que, si l'aéronef A_0 doit s'arrêter à la voie liée au nœud de croisement pour une raison quelconque, l'aéronef A_1 arrivera au nœud après le départ de

l'aéronef A_0 de la voie. La coordination entre l'heure de départ de A_0 et l'heure d'arrivée de A_1 est résolue par le mécanisme de coordination de vitesse entre les aéronefs présenté à la section 3.5.

D'après ce qui précède, on peut constater que l'état des aéronefs situés ne peut passer d'un état « indéterminé » à un état « d'arrêt » qu'en fonction des informations locales.

Dans le cadre du CDPG, la décision des aéronefs doit être prudente, allant de « indéterminé » à « en mouvement », et passer avec succès le mécanisme de contrôle de l'impasse et le mécanisme d'optimisation. Le mécanisme de vérification de l'impasse consiste à différencier si la décision de « en mouvement » d'un aéronef mène à une situation d'impasse ; tandis que le mécanisme d'optimisation consiste à analyser si la décision de « en mouvement » d'un aéronef peut améliorer la répartition globale des conflits entre les aéronefs au sol.

3.2.2 Mécanisme de formation et de résolution d'une impasse d'aéronef

3.2.2.1 Situation de blocage de l'aéronef

Dans la pratique, un aéronef ne devrait pas être autorisé à entrer dans un segment (taxiway) si son mouvement le conduit dans une situation d'impasse réelle. Une situation d'impasse se produit lorsque tous les aéronefs sont bloqués par d'autres et qu'aucun d'entre eux ne peut continuer à circuler. Certains scénarios d'impasse sont présentés à la Figure II.7.

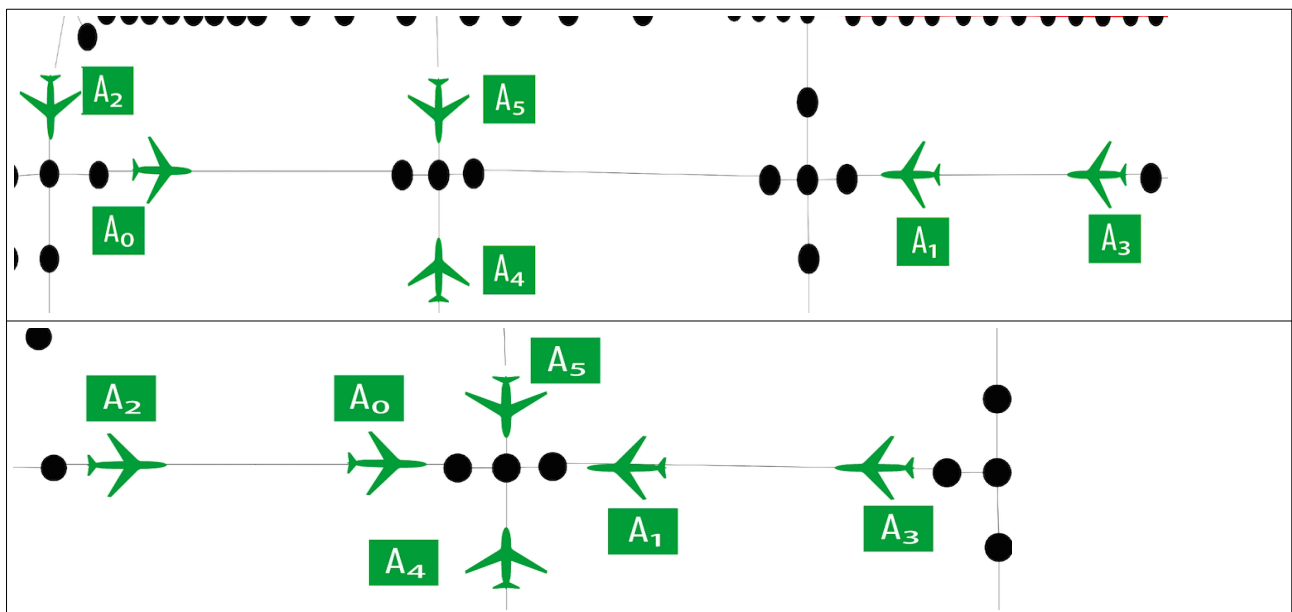


Figure II.7 : Plusieurs scénarios de situations de blocage d'avions.

Dans le premier scénario Figure II.7 (a) d'impasse, les avions A_2 et A_3 sont bloqués (dans les segments taxiway T4, taxiway T3) parce que les voies (taxiway) ont été occupées par les avions A_0 et A_1 .

Dans le deuxième scénario Figure II.7 (b), tous les avions sont bloqués dans le nœud (point d'intersection) par deux « bouchons » sur les côtés gauche, droit et en face. Le « bouchon » indique que le nombre d'avions avec la même direction est égal au nombre de voies au nœud (intersection). Une fois qu'une impasse est formée dans n'importe quelle zone, il n'y aura aucun moyen de sortir de l'impasse qui approche et l'ensemble du système de circulation au sol sera rapidement plongé dans un état de paralysie. Par conséquent, il faut éviter l'impasse lorsque l'on modélise le mouvement d'avion. Déterminer s'il y a une impasse imminente est un problème de type NP-HARD [15]. Trouver une solution pratique pour résoudre les problèmes d'impasse est toujours un grand défi pour les contrôleurs aériens.

Il est intéressant de trouver un algorithme qui garantit qu'il n'y aura pas d'impasse tout en maximisant l'utilisation des ressources ou en minimisant le temps de déplacement total de tous les avions. Les méthodes d'évitement des impasses antérieures sont axées sur la façon de mettre fin à l'attente circulaire. Cependant il peut être utile d'étudier le mécanisme de formation de l'impasse d'un avion d'un point de vue nouveau, c'est-à-dire la formation d'un bouchon de l'avion.

3.2.2.2 Mécanisme de formation de l'impasse de l'avion

Tout d'abord, il est question d'un scénario particulier, dans lequel il peut y avoir une impasse potentielle, mais où il est possible d'éviter une véritable impasse.

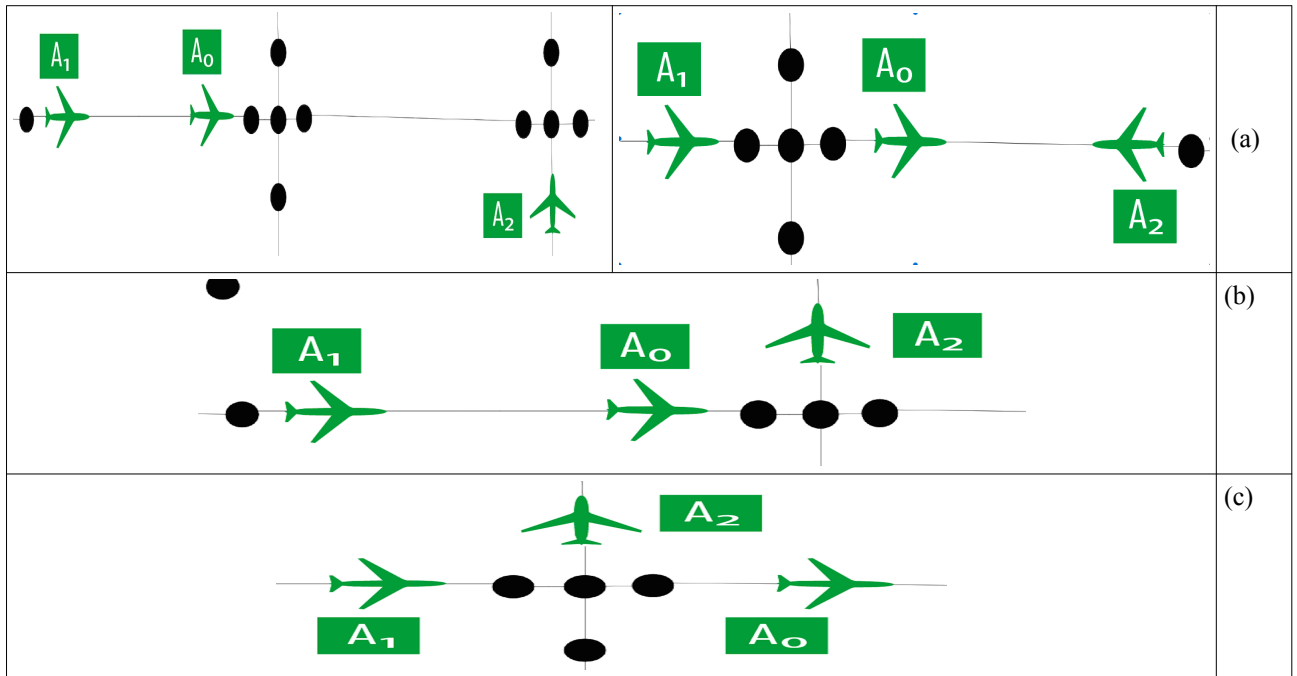


Figure II.8. Scénarios de fausse impasse.

Comme le montre la Figure II.8 (a), les aéronefs A_1 et A_2 se trouvent aux nœuds N_0 et N_2 , et l'aéronef A_0 se déplace sur le segment entre N_0 (taxiway T4) et N_1 (taxiway T3, taxiway Q1). En raison d'une mauvaise décision, une situation d'impasse peut se produire (voir Figure II.8 (b)). Cependant, la situation de blocage peut être évitée grâce à la commande de la séquence de l'aéronef basée sur les informations locales. Par exemple, on peut d'abord déterminer la priorité des aéronefs A_1 et A_2 pour l'occupation du segment relié N_1 . Définitivement, l'aéronef A_2 a la priorité absolue sur les aéronefs A_1 et A_0 pour éviter la situation de la Figure II.8 (b). Et l'aéronef A_1 arrive au nœud N_1 jusqu'au départ de l'aéronef A_0 du nœud N_1 (voir Figure II.8 (c)). Un mécanisme de coordination de la vitesse introduit au point 4.3 est adopté pour réaliser cette commande séquentielle, tout en garantissant plusieurs allées entre les aéronefs, qui sont présentées dans les contraintes (4) — (8) du modèle.

De toute évidence, la situation décrite à la Figure II.8 (a) ne conduit pas à une véritable impasse de mouvement au sol. Une véritable impasse trouve son origine dans la formation d'un bouchon des aéronefs dans le taxiway, ce qui est observé dans les scénarios d'impasse illustrés à la

Figure II.7. La raison objective de l'impasse dans laquelle se trouvent les aéronefs est le conflit entre le nombre d'aéronefs circulant au sol et le nombre limité de voies (taxiway).

3.2.3 Mécanisme d'optimisation des déplacements des aéronefs basé sur la prédiction de la distribution des conflits

La solution optimale du ASCP consiste à obtenir les séquences d'aéronefs optimales pour l'occupation des ressources des infrastructures, comme les segments (taxiways) et les Nœuds. En termes de structure du plan d'ordonnancement, il existe une répartition optimale des points de conflit dans le plan d'ordonnancement optimal. Ici, le point de conflit est le point de croisement des itinéraires dans le plan d'ordonnancement (voir Figure II.9).

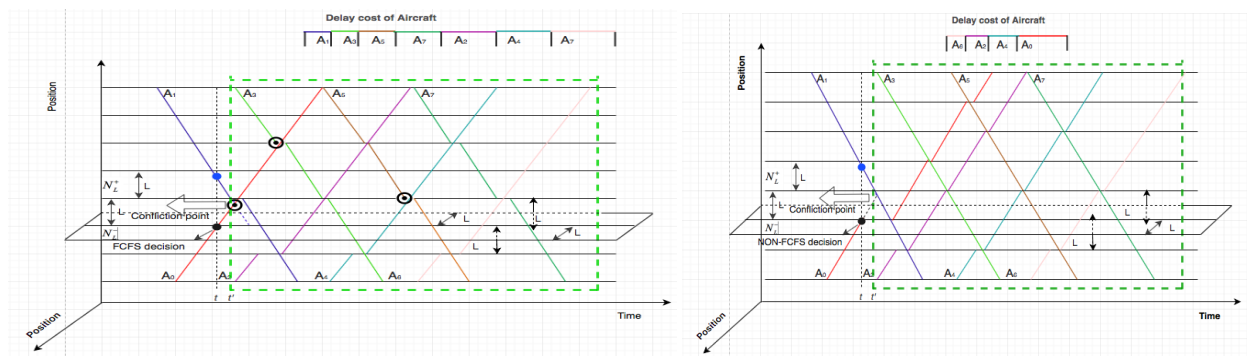


Figure II.9 Les plans consécutifs de deux algorithmes d'ordonnancement différents pour les avions

A_1 et A_0 (a) FCFS, (b) non-FCFS

Dans cette approche, le ASCP a été utilisé pour l'acheminement de l'aéronef, qui a ensuite été transmis au modèle FCFS, comme celui de (9) (10)

Pour les approches de simulation, l'ordre optimal des aéronefs pour l'occupation des ressources de la plateforme aéroportuaire est lié aux stratégies de déplacement optimales des aéronefs dans leurs trajets. Par exemple, dans la Figure II.6 (b2), il faut décider de la priorité des aéronefs A_0 et A_1 pour l'occupation des ressources sectorielles.

De meilleures stratégies de déplacement se traduiront par une répartition rationnelle des conflits. Cependant, en raison d'un plan d'horaire inconnu, il faut se demander comment évaluer l'influence des décisions de mouvements au sol des aéronefs sur la répartition des conflits.

Le principe du premier-arrivé-premier-servi (FCFS) est une règle de répartition bien connue qui a été largement appliquée dans le système de répartition aéroportuaire et ferroviaire. Certaines

règles de priorité sont également étudiées, qui sont liées aux types d'appareils. Les contrôleurs aériens espèrent organiser de façon optimale les ressources pour que les avions atteignent l'optimalité du système (SO).

L'application de ces techniques de recherche locale permet d'obtenir l'optimum local, ce qui peut s'avérer très éloigné de (SO). Cependant, ces techniques de recherche locale sont très efficaces pour obtenir un plan de planification des avions réalisable. Grâce à ces techniques de recherche locale, l'information sur les conflits entre les avions peut être obtenue rapidement. Il peut être utile d'analyser l'influence des différentes décisions de circulation au sol des avions sur la répartition des conflits.

L'idée de base du mécanisme d'optimisation proposé dans cette section est d'évaluer les différentes décisions de déplacement des avions en fonction de la répartition des conflits obtenue par le FCFS. Le cas décrit à la Figure II.9 illustre le mécanisme d'optimisation. Comme le montre la figure II.9, lorsque l'avion A_0 arrive au nœud N_L^- au moment t , le conflit pour le segment d'occupation L se produit entre les avions A_0 et A_1 . Au temps t , l'avion A_1 circule toujours dans le segment L' . Selon la règle du FCFS, l'avion A_0 a une priorité plus élevée pour occuper le segment L de l'avion A_1 . La Figure II.9 (a) présente le plan d'ordonnancement suivant lorsque la décision du FCFS est adoptée par A_0 . Cependant, dans la Figure II.9 (b), une autre décision est adoptée par l'avion A_0 .

L'avion A_0 s'arrête au nœud afin que l'avion A_1 puisse être prioritaire afin d'occuper le segment L . La Figure II.9 (b) illustre le plan d'ordonnancement suivant lorsque A_0 adopte une décision non-FCFS.

Il convient de noter que les deux plans ultérieurs sont obtenus sur la base de la règle du FCFS. Il faut ici se concentrer sur la différence entre ces deux plans. Dans la figure II.9 (a), sept avions présentent un retard dans leur processus de déplacement. Alors que dans la stratégie non-FCFS qui est adoptée par A_0 , seuls quatre avions sont retardés. Bien que l'avion A_0 semble avoir un coût de retard important, le coût total de retard de tous les avions de la Figure II.9 (b) est

inférieur à celui de la Figure II.9 (a). On peut également constater que les positions des points de conflit représentés sur la Figure II.9 (b) sont réparties de manière plus rationnelle que sur la Figure II.9 (a). De toute évidence, pour le cas donné à la Figure II.9, la décision non-FCFS de l'aéronef A_0 au moment t peut être plus rationnelle que la décision FCFS.

D'après les discussions ci-dessus, la procédure d'optimisation peut être générée comme suit :

Tout d'abord, certains symboles sont présentés dans la procédure d'optimisation :

Ω_t : l'état du système de la plateforme aéroportuaire au temps t , qui est décrit par la position et l'état de chaque aéronef au temps t .

U_t^N : ensemble d'aéronefs, dans lequel les aéronefs, dont l'état est indéterminé, sont enregistrés à l'instant t . Il est désigné par $U_t^N = \{A_k \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ et n est le nombre d'aéronefs dans l'ensemble U_t^N .

ψ_t : l'état final de la décision, qui inclut l'immatriculation de l'aéronef déterminé et son état de mouvement lorsque le processus de recherche est complètement exécuté. Il s'agit de :

$$\psi_t = (TD_t^{\min}, A^{\min}, AT^{\min}) \text{ Ici,}$$

$TD_t^{\min}$ est le coût total minimal du retard dans les plans suivants obtenu par le FCFS,

$A^{\min}$ est l'immatriculation de l'aéronef correspondant au coût total minimal du retard,

$AT^{\min}$ est une variable binaire décrivant l'état de l'aéronef $A^{\min}$. If $AT^{\min} = 1$, l'aéronef $A^{\min}$ adoptera la stratégie de mouvement. Sinon, il s'arrêtera au nœud actuel.

TD_t est le coût total des retards de tous les aéronefs dans le plan obtenu par le FCFS.

3.2.3.1 Procédure d'optimisation de la stratégie de mouvement au sol de l'aéronef

Phase 1 : A_k est l'aéronef prioritaire initial ($k = 1, A_k \in U_t^N$) dont la décision de l'état sera analysée.

Passage à la phase 2.

Phase 2 : la stratégie des mouvements est adoptée pour l'aéronef A_k au temps t . Selon la procédure de vérification de l'impasse présentée à la section 3.2.2.2, il faut analyser si l'impasse se produira sur l'itinéraire restant de A_k . S'il n'y a pas d'impasse, le plan suivant après le temps t est obtenu sur la base du FCFS. Si $TD_t < TD_t^{\min}$ mettre à jour ψ_t c'est-à-dire $TD_t^{\min} \leftarrow TD_t$, $A^{\min} \leftarrow A_k$ et $AT^{\min} = 1$.

Le système est de nouveau réglé sur l'état d'origine Ω_t .

Passage à la phase 3.

Phase 3 : la stratégie d'arrêt est appliquée pour l'aéronef A_k au temps t . Le plan suivant après le temps t est obtenu sur la base du FCFS. Si, mettez à jour, c'est-à-dire $TD_t^{\min} \leftarrow TD_t$, $A^{\min} \leftarrow A_k$, et $AT^{\min} = 0$. Le système revient à l'état original Ω_t .

Passage à la phase 4.

Phase 4 : Soit $k = k + 1$. If $k \leq n$, retourner à l'étape 1. Sinon, si, tous les aéronefs dans l'ensemble U_t^N sont examinés et la procédure est terminée. Selon l'état de la décision finale ψ_t , l'aéronef sélectionné et son état sont déterminés.

Quelques explications supplémentaires sont données à propos de la procédure d'optimisation ci-dessus. Premièrement, seul l'état d'un aéronef peut être déterminé après l'exécution de la procédure d'optimisation pour tous les aéronefs de l'ensemble ψ_t . Dans le système de mouvement au sol sur les voies à sens unique (taxiway), les états de certains aéronefs sont dépendants les uns des autres.

Par exemple, dans le cas présenté à la Figure II.6 (b2), l'aéronef A_1 doit s'arrêter au nœud si l'état de l'aéronef A_0 est en mouvement. Dans un deuxième temps, lorsque la stratégie de circulation est appliquée pour l'aéronef contrôlé à la phase 2, il est possible qu'une situation d'impasse se produise sur le parcours restant de l'aéronef contrôlé.

L'aéronef contrôlé doit donc passer la procédure de vérification de l'impasse. Si une situation d'impasse peut se produire, la stratégie de circulation provisoire de l'aéronef vérifié est annulée.

Dans un troisième temps, lors de l'adoption de FCFS pour résoudre le plan d'ordonnancement subséquent aux phases 2 et 3, une vérification de l'impasse est également nécessaire pour tous les aéronefs.

3.3 Sens de la liaison des taxiways de l'aéroport

Pour mieux gérer la directionnalité, l'une des règles fondamentales est que les liaisons pour les segments de voies de circulation soient à sens unique (taxiway). Comme le montre la Figure II.10, si un aéronef se déplace déjà sur un segment de voie de circulation, un autre aéronef se déplaçant dans la même direction peut entrer dans le segment comme expliqué ci-dessus dans la mesure où une distance appropriée est maintenue entre les deux aéronefs (turbulence de sillage). Toutefois, aucun aéronef ne peut pénétrer dans le segment de la voie de circulation dans la direction opposée jusqu'à ce que le segment soit vide.

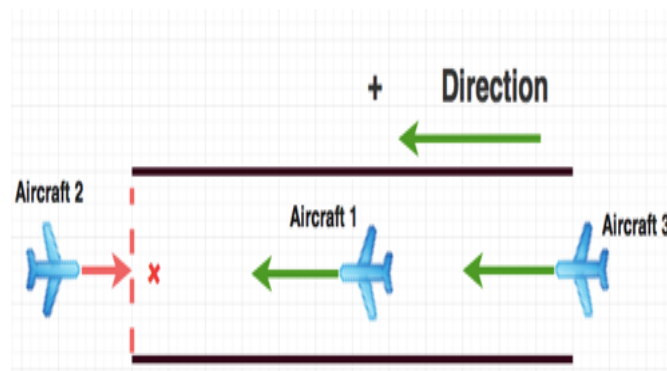


Figure II.10: Disponibilité des routes en fonction de la direction.

Chaque segment de voie de circulation est affecté d'une direction arbitraire (selon le trafic). Le nombre d'aéronefs dans la direction assignée est considéré comme un compte positif et le nombre d'aéronefs dans la direction opposée est considéré comme un compte négatif. La Figure II.11 montre un exemple de disponibilité différente en fonction de la direction du mouvement.

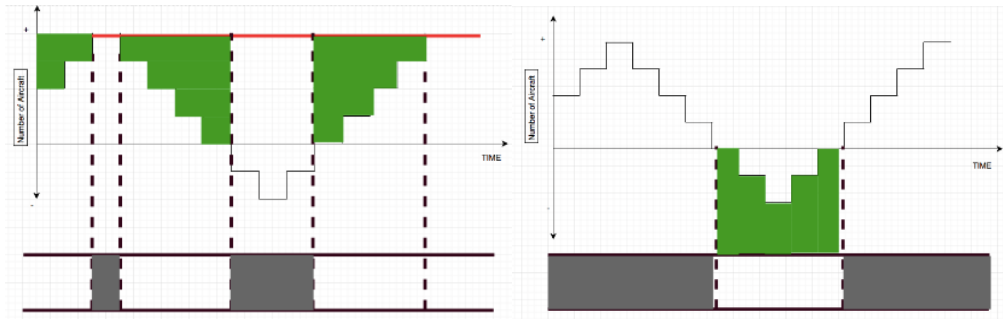


Figure II.11: La disponibilité des emplacements en fonction de la direction: (a) positif (+) (b) négatif (-).

Pour la direction positive de la figure II.11 (a), le lien est disponible lorsque le compte est positif et est plus petit que le compte positif maximum. Pour la direction négative de la figure II.11 (b), le lien est disponible lorsque le compte est négatif et est plus grand que le compte négatif minimum. Avec le concept de comptage négatif, il est possible de déterminer la disponibilité de la liaison en fonction du comptage actuel, du comptage maximum et de la direction. Cette représentation est similaire à celle de [10].

Exemple 1. Si une situation d'impasse réelle se produit dans une voie à sens unique (taxiway). Les conditions suivantes sont remplies : des bouchons positifs et négatifs sont développés sur les deux côtés du taxiway et le nombre d'aéronefs circulant entre deux bouchons est supérieur ou égal au nombre de voies dans le nœud entre deux bouchons.

Preuve. Ce qui précède peut-être décomposé dans les deux cas suivants.

Selon l'Exemple 1, trois conditions forment l'impasse de l'aéronef : la congestion positive, la congestion négative et le conflit entre le nombre d'aéronefs et le nombre de voies (taxiway). En cas d'impasse réelle, les trois conditions ci-dessus se produisent en même temps. Il est à noter que les relations entre les trois conditions ci-dessus sont progressives et non indépendantes. La relation entre trois conditions peut être décrite comme suit :

1. Une congestion positive se forme si un aéronef (prioritaire) se dirige vers son prochain nœud.
2. Une congestion négative se trouve sur la route restante de l'aéronef prioritaire si l'état (1) existe.
3. Le nombre d'aéronefs est en conflit avec le nombre de voies si les conditions (1) et (2) existent.

3.4 Mécanisme de coordination de la séparation des avions en cas de turbulence de sillage

La turbulence de sillage est un danger bien connu des pilotes. Pour rappel, un aéronef génère des vortex qui peuvent s'avérer extrêmement dangereux pour qui devrait les traverser. Ces vortex sont d'autant plus importants que l'aéronef générateur est lourd, vole lentement et est en configuration lisse. Ils sont générés vers l'arrière, ont une trajectoire légèrement descendante et sont influencés par le vent.

La parade consiste donc, à laisser approcher d'un aéronef plus lourd, de bien observer sa trajectoire pour en déduire celle des vortex et les éviter.

Un élément principal qui entre dans la configuration est la capacité de la voie de circulation. Celle-ci est déterminée en divisant la longueur de la liaison par la somme de la longueur de l'aéronef et de la distance de sécurité, qui est supposée être de 150 m. Étant donné que les liaisons dans la zone de l'aire de trafic se rapprochent des voies de circulation complexes, on utilise une vitesse de circulation plus lente de cinq nœuds tout en éliminant les contraintes liées à la capacité maximale.

Si cela s'avère impossible, il faut respecter les séparations minimales mentionnées ci-dessous dans le tableau II.4

Tableau II.4: Séparations minimales

Lead/trail	L	M	H	J
L	80	52	45	45
M	80	52	45	45
H	80	52	45	45
J	80	52	45	45

C'est pour minimiser le risque de rencontre avec la turbulence de sillage Figure II.12 que des règles d'espacement sont appliquées entre deux aéronefs.

Pour en faciliter la mise en œuvre, les aéronefs sont regroupés par catégories et des minima de séparation sont définis pour une paire de catégories. Ces minima sont à respecter pour un aéronef

qui suit ou traverse la trajectoire d'un autre aéronef, en phase d'approche et de départ, lorsque la séparation verticale est inférieure à 1 000 pieds.



Figure II.12: Turbulences de sillage

3.5. Comportement de l'exploitation d'un aéronef basé sur un mécanisme de coordination de la vitesse

Au point 3.2.2.2 de ce chapitre, il est souligné que la résolution de la fausse impasse dépend de la coordination entre les aéronefs. La résolution de certains conflits d'avance, présentés dans les expressions (4) — (7) du modèle, dépend également de la coordination entre les aéronefs.

Ici, l'interverrouillage et la coordination des comportements d'exploitation des aéronefs sont au cœur des discussions.

Quelques symboles supplémentaires sont donnés ci-dessous :

τ_{A_0} : l'intervalle de temps requis par l'aéronef A_0 pour arriver à son prochain nœud.

l_{A_0}, l_{A_1} : distance entre la position actuelle de l'aéronef A_0 ou A_1 et son nœud frontal.

3.6. Analyse des événements et mise à jour dynamique du système

La simulation événementielle introduit le concept d'« événement » pour réaliser une définition d'intervalle de temps flexible. Un événement représente l'apparition d'une modification possible de l'état du système à un moment donné.

En fonction des différentes positions des aéronefs dans le taxiway, tous les événements possibles peuvent être généralisés dans la Figure II.13

Ce qui suit donne les définitions de ces deux événements.

Événement de départ-départ : l'aéronef A_1 a quitté le Nœud N avant le départ ou a quitté le Nœud, mais l'aéronef A_0 ne peut quitter le Nœud en raison de l'écart insatisfait entre les deux départs voir la figure II.13 (a), (b).

Dans la figure II.13 (a), opposé de l'aéronef A_1 est prioritaire pour partir du nœud de l'aéronef A_0 . L'aéronef A_0 peut partir du nœud jusqu'à l'embranchement. g^{dd} est satisfait entre deux aéronefs. En conséquence, l'intervalle de temps peut être calculé de la manière suivante

$$\tau_{A_0} = t_{A_1, N}^d + g^{dd} - t$$

Pour le cas de la Figure II.13 (b), une expression similaire peut être donnée, seul le paramètre d'écartement est modifié de h^{dd} et g^{dd} .

Selon la définition de ces deux événements, l'intervalle de temps flexible $\tau^{\min}$ qui est le minimum de tous les τ_{A_0} peut être déterminée. En fonction de l'acquisition de la vitesse des aéronefs et de l'intervalle de temps, la mise à jour du système s'effectue progressivement par le biais de la modélisation du mouvement des aéronefs. En outre, il convient de déterminer si les pertes de temps des aéronefs pour l'accélération et la décélération doivent être compensées lorsque les aéronefs arrivent et quittent les Nœuds. Une fois que les aéronefs doivent s'arrêter aux Nœuds, leurs heures d'arrivées et de départs doivent être modifiées à temps.

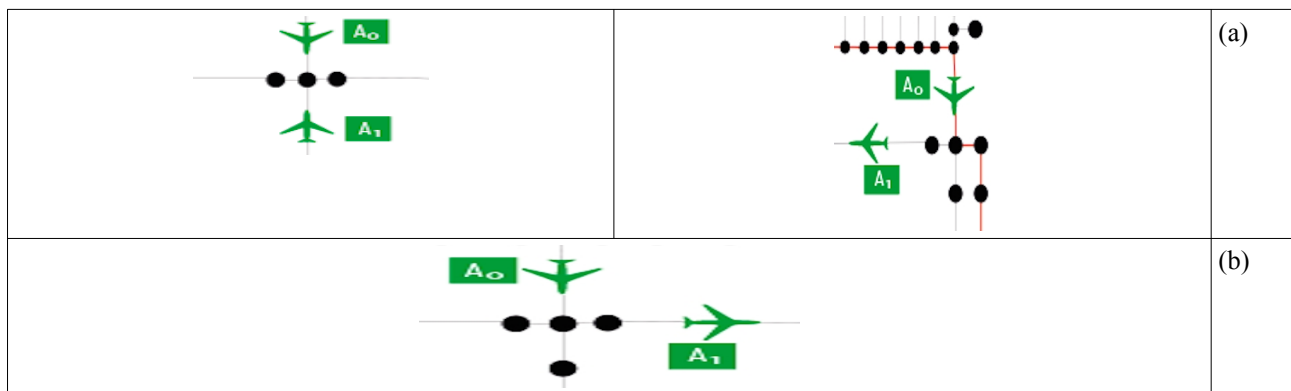


Figure II.13: Les éventuels événements et les intervalles de temps correspondants (a) et (b)

3.7. Attribution des itinéraires

Les itinéraires fréquemment utilisés et les points de conflit avant et après la reprogrammation des vols peuvent être déterminés grâce à un récent projet de recherche qui propose pour la première fois l'introduction d'une technologie de détection et de suivi utilisant des réseaux de capteurs acoustiques sans fil dans la zone de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V. La solution proposée consiste à utiliser différents filtres pour prédire la position d'une cible sur la base de l'historique de ses mesures. Lorsque la cible est en position, le capteur principal calcule la position de la cible en fonction des informations recueillies par les nœuds situés à proximité.

La plate-forme de l'aéroport est modélisée sous forme de graphique avec des nœuds et des vecteurs, l'entrée et la sortie de la piste sont indiquées en bleu, l'arrêt en vert et les intersections en rouge. [13]

Le système de surveillance proposé peut suivre les trajectoires des avions à tout moment. Cette source de données en temps réel nous sera d'une grande utilité pour savoir quelles sont les trajectoires attribuées avant et après l'ordre de circulation. En plus de connaître le nouveau point de conjonction, cela peut conduire à une réduction des points de conflit.

4 Expériences numériques sur un modèle simple extrait de l'aéroport

Les expériences numériques pour tester la qualité de l'ordonnancement ont été divisées en deux étapes :

La première étape est pour tester l'ordonnancement avec les contraintes de capacité des taxiways sur une surface aéroportuaire selon un modèle simple d'aéroport extrait de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V comme indiqué à la Figure II.14. L'itinéraire de départ est indiqué à la figure II.14 (a) et l'itinéraire d'arrivée est indiqué à la figure II.14 (b). Pour vérifier, le planificateur, la capacité de toutes les liaisons est fixée à cinq aéronefs. Le temps de traversée de jonction à tous les nœuds de jonction est fixé à 20 secondes. Le tableau II.5 montre l'ordonnancement.

La deuxième étape permet de tester la qualité de l'ordonnancement de « FCFS » et « CDPG » sur la même surface aéroportuaire extraite de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V. La modélisation de la représentation est simple, composée de 9 segments (taxiways) et de 10 nœuds (dont les intersections). 10 instances aléatoires sont construites pour évaluer la performance du « CDPG » et de « FCFS ». La longueur de chaque segment (taxiway) fait l'objet d'une répartition uniforme entre 200 m et 1000 m.

Le CDPG proposé est implémenté en langage python et exécuté sur MacOS en utilisant une machine avec les performances, 2,2 GHz Intel Core i7 et 8 Go de RAM 1600 MHz DDR3.

4.1. Analyse des décisions prises et les contraintes de capacité des taxiways

Le tableau II.5 montre les résultats de l'ordonnancement avec les contraintes de capacité de liaison uniquement. Comme on peut s'y attendre, le retard est nul pour les quatre ou cinq premiers aéronefs, car toutes les liaisons sont initialement vides, mais le retard commence à s'accumuler par la suite. La figure II.15 montre le nombre d'aéronefs dans les liaisons L12 et L14 en fonction du temps.

Comme on peut le voir sur la Figure II.14, la liaison L14, L15 doit accueillir le trafic dans les deux sens. On peut l'observer sur la Figure II.15 (a) et la Figure II.15 (b) avec des comptes alternativement négatifs et positifs. La liaison L14 n'est utilisée que pour l'itinéraire d'arrivée et n'affiche que des comptes négatifs,

La liaison L12 de la figure II.14 n'est utilisée que pour l'itinéraire de départs et n'affiche que des comptes positifs, ce qui indique une opération dans un seul sens.

Tableau II.5 Planifications des résultats sans contraintes de croisement ni contraintes de turbulence de sillage (a) Départs. (b) Arrivés.

N° Flight	Time	Delay(sec)	D/A	N° Flight	Time	Delay(sec)	D/A
RAM964Y	00:00:00	0	DEP	RAM469	00:00:20	0	ARR
RAM560Z	00:00:20	0	DEP	RAM422J	00:00:30	0	ARR
ANE19EU	00:00:30	0	DEP	JAF50A	00:00:40	0	ARR
IBB6401	00:00:40	0	DEP	RAM795Z	00:00:50	0	ARR
JAF37J	00:05:15	275	DEP	RAM219	00:01:00	0	ARR
UAE752	00:05:25	275	DEP	RAM500B	00:02:55	125	ARR
GFA020	00:07:25	385	DEP	TAR711	00:05:05	245	ARR
JAF9WT	00:09:30	500	DEP	RAM486	00:07:05	355	ARR
MAC477	00:11:30	610	DEP	MAC993	00:07:10	350	ARR
RAM822	00:11:35	605	DEP	RAM965Y	00:09:10	460	ARR

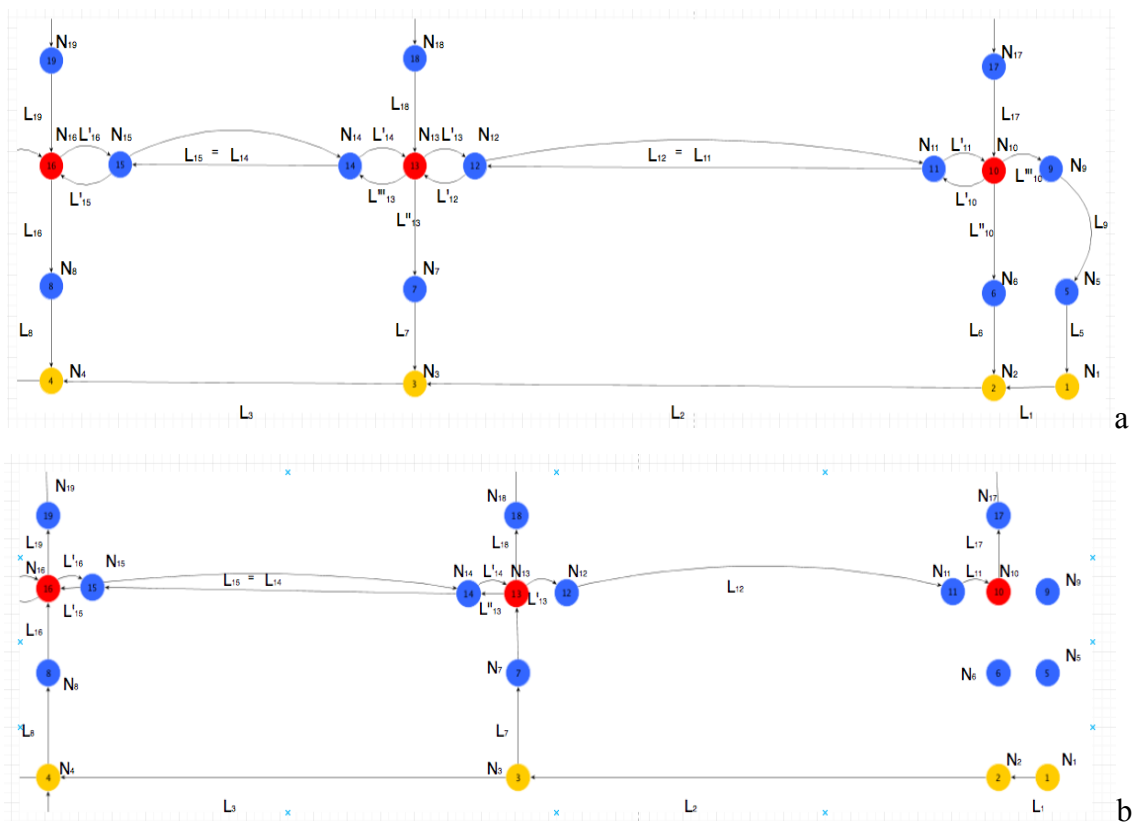


Figure II.14. Modèle simple de liaison nodale à la surface d'un aéroport. (a) Route de départ. (b) Route d'arrivée.

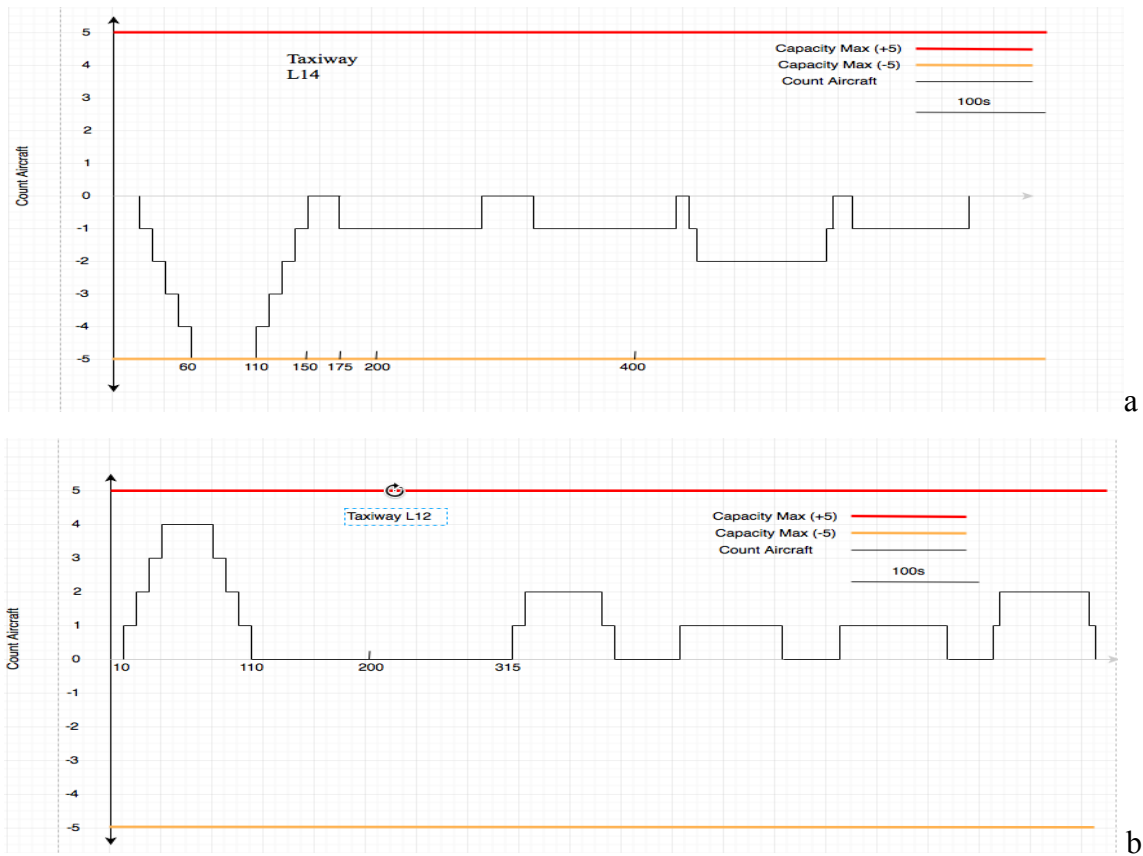


Figure II.15 Nombre d'avions et contraintes de capacité sur les voies de circulation L12 et L14.

4.2 Analyse des décisions de mouvement des aéronefs du FCFS et du CDPG

Pour refléter la différence entre le FCFS et le CDPG, la [figure II.16](#) présente des exemples de diagrammes d'aéronefs fondés sur ces deux mécanismes différents. Comme le montrent les [figures II.16 \(a\) et \(b\)](#), différentes stratégies de déplacement sont adoptées pour résoudre les conflits.

C_{A_0, A_1} Entre les aéronefs A_0 et A_1 , ce qui s'est produit dans le segment L_5 . L'aéronef A_1 arrive librement au segment L_5 à l'heure 220 s, et l'heure d'arrivée de l'aéronef A_0 est 240 s. Selon la règle du FCFS, l'aéronef A_1 arrivera avant au segment L_5 en raison de son arrivée précipitée (voir la [figure II.16 \(a\)](#)).

Le retard total de tous les aéronefs est de 1024 s dans le plan d'horaires. Dans le CDPG, les stratégies de déplacement des aéronefs sont déterminées en fonction de la prévision de la répartition des conflits dans le plan de déroulement ultérieur. Lorsque l'aéronef A_1 occupe d'abord le segment L_s , le retard total est d'environ 1024 s dans le plan d'horaires suivant obtenu par la règle de priorité locale. Cependant, si l'aéronef A_1 adopte une stratégie d'arrêt, le retard total est d'environ 956s. Évidemment, la stratégie « d'arrêt » de l'aéronef A_1 est la suivante :

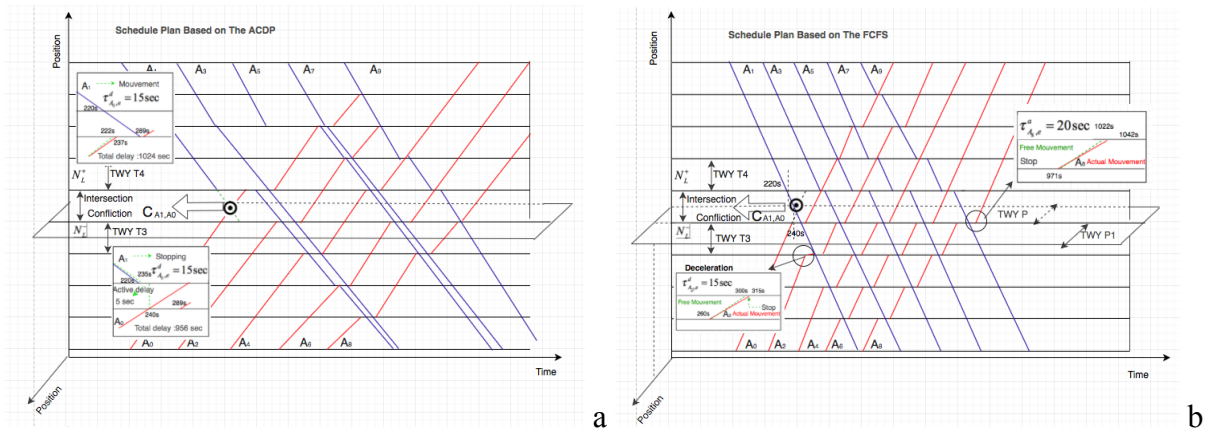


Figure. II.16.: Les plans d'ordonnancement obtenus par deux approches (a) le FCFS (b) le CDPG

On peut obtenir une meilleure répartition des conflits dans un plan d'ordonnancement subséquent. Le retard total de tous les aéronefs est de 976s dans le plan d'ordonnancement final (Figure II.16 (b)). Cela prouve également que la stratégie d'arrêt de l'aéronef A_1 pourrait être plus appropriée pour résoudre les conflits en C_{A_1, A_2} que la stratégie « en mouvement ».

Comme le montrent les contraintes (6) de la section 3.2.2, les pertes de temps des aéronefs pour l'accélération et la décélération sont examinées dans le présent chapitre. L'iconographie I de la Figure II.16 (a) représente explicitement le décalage du temps d'accélération de l'aéronef A_8 dans le segment situé entre la position N_5 et N_6 . L'aéronef A_8 part du nœud N_5 à l'heure 971 s et son heure d'arrivée au nœud N_6 est 1022s. Toutefois, en raison de l'arrêt de l'aéronef A_8 au nœud N_5 , la perte

de temps d'accélération de l'aéronef A_3 doit être compensée. Ainsi, l'heure d'arrivée de l'aéronef A_3 au nœud N_6 est en fait de 1042s. Tout comme l'iconographie I, l'iconographie II représente explicitement le décalage du temps de décélération de l'aéronef A_2 dans le segment en raison de son arrêt au N_4 .

Enfin, il se concentre sur les caractères de retard des aéronefs dans le CDPG. Deux iconographies de la figure II.16 (b) décrivent explicitement deux stratégies de déplacement différentes de l'aéronef A_1 pour résoudre un conflit entre A_0 et A_1 . L'iconographie I de la Figure II.16 (b) montre que les stratégies de déplacement du A_0 et A_1 sont déterminées par les règles de priorité locale, et l'iconographie II montre les décisions de mouvement de A_0 et A_1 du CDPG. Dans l'iconographie II, l'aéronef A_1 arrive au nœud N_4 à l'heure 235s, et l'aéronef A_0 arrive au nœud N_3 à l'heure 240s. Évidemment, en termes de caractères de retard des aéronefs, le A_1 s'arrête activement au nœud N_4 environ 5s. Cependant, les retards totaux de tous les aéronefs sont réduits à environ 69s. Évidemment, le retard actif du A_1 au nœud N_4 peut donner de meilleurs conflits dans le plan ordonnancement suivant. La figure II.16 (b) prouve également que la répartition des conflits dans le CDPG est similaire à la répartition optimale.

5 Conclusion

Afin d'améliorer la gestion des flux de trafic, le planificateur FCFS initialement introduit a été amélioré avec deux caractéristiques supplémentaires qui permettent de l'appliquer à la planification des mouvements de surface des aéroports. Le problème de directionnalité des liaisons rencontrées a été résolu par l'introduction d'un concept de comptage négatif des avions. Les conflits d'intersections existants ont été traités avec des contraintes de flux de nœuds. En outre, la capacité d'affectation des routes, qui peut évaluer jusqu'à cinq routes différentes, a été ajoutée afin que le planificateur puisse être utilisé avec le concept de routage dynamique. Le planificateur FCFS a été

vérifié à l'aide d'un modèle d'aéroport simple. Plusieurs expériences de planification ont été menées en utilisant des données de simulation sur les mouvements de surface.

L'ASCP est examiné dans un cas à voie unique (taxiway). La formulation mathématique est une programmation non linéaire complexe en nombres entiers mixtes. Elle prend en compte un système de contraintes, telles que l'espacement, les temps de parcours et la capacité des voies. L'objet du modèle est non-linéaire. Il reflète les sensibilités des avions de différents types ou routes empruntées sur le retard. Le modèle garantit également que le nombre d'avions ne dépasse à aucun moment la capacité des pistes. Pour éviter les discrétisations de l'horizon temporel, une variable de sélection des routes est introduite dans la capacité des routes sans contrainte. En outre, le modèle prend en compte certaines contraintes de séparation, telles que l'arrivée- l'arrivée, le départ- l'arrivée, le départ- l'arrivée, l'arrivée-départ, l'arrivée-départ et la turbulence de sillage. Ces contraintes sont également proches de l'exploitation réelle au sein de la plate-forme aéroportuaire.

En raison de la non-linéarité de l'objet et d'un grand nombre de variables binaires, le modèle ne peut être résolu en adoptant un algorithme exact lorsqu'il s'agit d'une instance à grande échelle.

Une approche heuristique basée sur la méthode globale Conflits - Distribution - Prévion au sol (CDPG) est présentée. Elle est en fait le résultat d'un système dynamique piloté par les événements. La CDPG aborde deux questions clés : les stratégies de blocage des avions et de mouvement quasi optimal des avions. Tout d'abord, le mécanisme de la formation du blocage est analysé en détail. Sur la base de l'analyse du mécanisme de formation du blocage de l'avion, une procédure de vérification du blocage est présentée, qui évite effectivement la formation du blocage de l'avion. Le mécanisme de coordination de la vitesse de l'avion permet d'éviter la formation de "fausses" impasses. Deuxièmement, le mécanisme d'optimisation de la stratégie de mouvement des avions est présenté sur la base de la prédiction de la répartition des conflits globaux d'avions. Les stratégies de mouvement des avions sont déterminées sur la base de la répartition des conflits dans le calendrier suivant.

L'objectif d'un futur travail est de créer d'autres systèmes de détection acoustique pour localiser et suivre les objets en mouvement sur les surfaces des aéroports. Ceci est principalement dû au fait que, contrairement au balayage radar, la détection acoustique peut être effectuée à l'aide de capteurs entièrement passifs en n'écoutant que le bruit de la cible.

CHAPITRE III :

Algorithme de Recherche Bidirectionnelle pour les Mouvements au Sol

1 Introduction

La gestion des mouvements au sol du trafic aérien est un problème majeur pour les aéroports. La meilleure optimisation des mouvements au sol permettrait de réduire les retards des vols et le coût global des voyages. Ce chapitre propose un nouvel algorithme de routage pour fournir le chemin le plus court, basé sur trois algorithmes qui permettent une bonne planification des mouvements au sol. Ces trois algorithmes sont itératifs : ils permettent de planifier la trajectoire d'un avion l'un après l'autre. Les trois algorithmes sont garantis comme un outil d'aide à la décision en temps réel pour les contrôleurs aériens, mais ils ont chacun des forces et des faiblesses. Une première version est décrite en utilisant l'algorithme classique de Dijkstra, puis la version classique de Dijkstra a été étendue par une version bidirectionnelle. Les deux algorithmes offrent une solution optimale, mais le coût du temps de calcul reste relativement long malgré une amélioration avec l'utilisation de Dijkstra bidirectionnelle. Un troisième algorithme A* est utilisé. La limitation de celui-ci étant qu'il ne garantit pas une solution optimale malgré un coût de temps de calcul plus rapide. Pour éliminer les faiblesses de chaque algorithme étudié, un nouvel algorithme hybride A* est donc présenté ici. Il intègre les avantages de chaque algorithme pour réduire le temps de calcul et optimiser la recherche du chemin le plus court tout en maintenant un temps d'exécution minimum pour assurer la faisabilité des trajectoires prévues dans un temps réduit. Ce modèle a été étendu pour traiter la faisabilité des trajectoires planifiées tout en évitant les conflits entre les avions et évalué sur le modèle de l'aéroport International de Casablanca Mohamed V.

Plusieurs recherches ont tenté de guider les contrôleurs aériens dans la prise de décision au sol. Le modèle a étudié les conséquences des retards des vols dans l'aéroport. La complexité du calcul est fonction de la croissance du flux d'avions dans l'aéroport : plus il y a de dispositifs, plus le calcul sera complexe. L'algorithme qui permet d'organiser les départs dans l'aéroport implique l'utilisation simultanée de divers algorithmes complexes tels que l'algorithme génétique [1], [9], l'utilisation d'essaims de particules [2], plusieurs algorithmes heuristiques, etc.

Ce chapitre présente un algorithme itératif pour modéliser en temps réel la simulation des mouvements au sol des taxis sur l'aéroport International de Casablanca Mohamed V, en utilisant l'algorithme Hybride A*.

Cet outil permettra d'optimiser les trajectoires et le temps de parcours entre les différentes zones (stand, entrée ou sortie de piste) et de choisir les meilleures trajectoires possibles (séquence

de points avec intervalles de temps) tout en respectant les normes de sécurité en vigueur à l'aéroport. Cet outil peut être utilisé soit par un agent humain, soit par un agent de dispositif, soit par un agent automatique [7], [8].

Le problème est présenté et modélisé dans la première section comme une introduction sur l'état de l'art de la prise de décision au sol. La deuxième section présente une solution qui utilise le nouvel algorithme hybride A* qui intègre les avantages des algorithmes Dijkstra et A* bidirectionnels. La section III est une simulation des résultats présentés. La section IV est la conclusion de ce chapitre.

2 Description du problème et modélisation

2.1 Définition de la structure de l'aéroport

L'aéroport est le seul endroit où les avions se déplacent. Il a une structure adaptée et est composé de différentes zones, chacune avec ses propres spécifications [3] :

Pistes : selon l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), une piste est une "zone rectangulaire définie sur un aérodrome terrestre préparée pour l'atterrissage et le décollage d'un avion". Il s'agit de zones où les avions décollent ou atterrissent, donc de zones où la vitesse est très rapide. Il est nécessaire ici de séquencer les avions tout en gardant à l'esprit que certains avions devront simplement traverser. Il existe des règles de sécurité, telles que les règles de séparation. La zone de piste représente une zone de sécurité dans laquelle il ne doit y avoir aucun élément devant un décollage ou un atterrissage. On peut accéder à la piste en prenant une rampe et en sortant sur une autre rampe. L'aéroport International de Casablanca Mohamed V est un grand aéroport avec plusieurs rampes d'accès et de sortie de la piste qui permettent à l'avion de se dégager rapidement avant même d'avoir terminé la manœuvre, tout cela dans le but d'optimiser les flux.

Les aires de stationnement (stand) : ce sont des aires permettant d'effectuer diverses manœuvres telles que la sortie du stand en marche arrière (pushback). La vitesse dans cette zone est réduite. Chaque parking est consacré à un type d'avion spécifique, il y a donc des règles d'accès spécifiques.

Ici, l'aéroport International de Casablanca Mohamed V "Figure I.1", "Figure I.2" (voir chapitre I) [4] dispose de deux pistes, chacune ayant son propre type de mouvement. Cette configuration est appelée par l'OACI pistes spécialisées (une pour le décollage et l'autre pour

l'atterrissage). Les aires de trafic de l'aéroport International de Casablanca Mohammed V sont organisées comme suit :

L'aire de trafic principale : destinée aux avions commerciaux avec deux configurations de stand [4]

Configuration en piqué : arrivée au moteur/sortie par refoulement :

Devant le Terminal 1 : [stand Charli 1 à Charli 11 (actuellement fermé en raison de travaux au Terminal I)].

Devant le Terminal 2 : [B1 à B14, et J5 à J9].

Devant le Terminal 3 : [C23 à C26 et J15]. Configuration à distance : arrivée et sortie vers le moteur

Devant les terminaux 1 et 2 : [E1 à E12]

Devant le terminal 3 : [J11 à J14].

La zone de fret : devant le bâtiment de fret dans deux configurations :

- Configuration " Nose-in " : arrivée au moteur/sortie par refoulement [D1 à D7].
- Configuration béquille oblique : arrivée et sortie au moteur [D8 à D15].

Lorsqu'un avion atterrit ou décolle, il provoque un phénomène de turbulence qui empêche un avion plus petit que le précédent de décoller juste derrière lui ; c'est ce qu'on appelle la turbulence de sillage. Il existe trois catégories d'avions qui définissent les règles de séparation en fonction de leur poids maximum.

(catégorie légère < 7000kg < catégorie moyenne < 136000 kg < catégorie lourde)

2.2 Définition du problème

En raison de sa structure, l'aéroport est confronté à diverses contraintes opérationnelles telles que la vitesse de rotation, le respect de la distance entre deux avions au sol, etc. Une autre contrainte à prendre en compte est qu'une piste ne peut être utilisée que par un seul appareil à la fois, de sorte qu'un séquençage des pistes devient nécessaire. Tout cela, bien sûr, dans un souci constant d'optimisation de la trajectoire et du temps afin de toujours maintenir, voire augmenter le débit. Cependant, il a été souligné dans un rapport [5] concernant l'aéroport International de Casablanca Mohamed V qu'il existe un problème dans la gestion de l'optimisation des mouvements

au sol. Ce qui entraîne des retards fréquents et de nombreux conflits au sol dus à un manque d'ordonnancement des différentes zones.

L'objectif est ici de proposer une méthode qui résout les conflits en présentant le meilleur chemin optimal pour chaque dispositif entre l'entrée ou la sortie de la piste et son support. En général, il peut être plus intéressant d'augmenter le temps de parcours, suivi par deux appareils plutôt que d'attendre l'un de ces deux appareils pendant une longue période. La prédiction des mouvements d'avions n'est pas facile, mais pour parvenir à mettre au point un outil réaliste, c'est une nécessité. Tout d'abord, un modèle de prédiction des trajectoires au sol est présenté. Ensuite, il sera intégré la détection des éventuels conflits au sol et leur résolution, et leur enchaînement sur la piste a été accepté.

3 Modélisation du problème

3.1 L'aéroport

Tous les points d'attente et les points d'attente intermédiaires et/ou les points d'attente avant piste, les voies de circulation sont présentés sous la forme d'un graphique orienté $G = (V, E)$ où les sommets V sont les points de l'aéroport (points d'attente et d'attente et intersections).

Les voies de circulation sont représentées par des arcs de type "Tw" et l'arc de piste de type "Rw".

Chaque arrêt $(u, u+1)$ a un poids correspondant à la longueur d'arc représentée par $D(u, u+1)$, dans les graphiques "Figure II.2", "Figure II.3" (voir chapitre II).

L'aéroport International de Casablanca Mohamed V dispose de deux pistes 35R/35L. Pour mieux modéliser et projeter cette étude sur le terrain, les scénarios suivants sont définis : Les deux pistes 35L/35R sont opérationnelles, la 35L est destinée à l'atterrissage et la 35R au décollage. Deux graphiques orientés ont été développés.

Le premier graphique (Figure II.2) est consacré au décollage et le second (Figure II.3) à l'atterrissage (Voir les graphiques dans le chapitre II). Le but de cette séparation est de mieux visualiser les différentes trajectoires pour chaque cas :

Cas de décollage "Figure II.2" (voir chapitre II) : Le graphique "Figure II.2" représente un graphique orienté pour les scénarios de décollage des avions sur la piste 35R. Il contient à la fois des nœuds connectés et d'autres non connectés (sommets isolés). Le but principal est d'isoler ces

nœuds afin qu'ils n'interviennent pas dans le calcul de l'algorithme pour gagner en performance de calcul car ils ne font pas partie du scénario de décollage (ils sont spécifiques à l'atterrissage). La procédure de calcul commence lorsque l'avion quitte le stand pour se diriger vers l'entrée de piste concernée.

Cas du débarquement "Figure II.3" (voir chapitre II) : Le graphique "Figure II.3" représente un graphique dirigé pour les scénarios d'atterrissage des avions sur la piste 35L. Il contient à la fois des nœuds connectés et non connectés (sommets isolés). Le but principal est d'isoler ces nœuds afin qu'ils n'interviennent pas dans le calcul de l'algorithme pour gagner en performance de calcul car ils ne font pas partie du scénario d'atterrissage (ils sont spécifiques au décollage). La procédure de calcul commence lorsque notre avion arrive dans la zone de la piste, et plus précisément lorsqu'il quitte la piste pour se rendre à son poste assigné.

3.2 Acheminement des avions

Afin de trouver le chemin le plus court entre deux points du graphe pour un avion "i", plusieurs algorithmes de recherche peuvent être utilisés.

Les avions ayant une priorité plus élevée sont prioritaires par rapport à ceux ayant une priorité plus faible. Ainsi, un avion à haute priorité aura tendance à avoir des retards moins importants. Par exemple, l'atterrissage est prioritaire sur le décollage car un avion au sol peut toujours attendre en cas d'urgence et représente donc moins de contraintes qu'un avion en vol. Ceci est expliqué dans le tableau "Table III.1" des variables.

Tableau III.1: Variables

Variable	Description
T(i)	L'heure de départ d'un aéronef dans le graphe depuis un nœud
U(i)	Le Nœud de départ d'un aéronef dans le graphe
U+1(i)	Le Nœud suivant d'un aéronef dans le graphe
V(i)	Vitesse de déplacement de l'aéronef
D(i)	Distance arrière que doit maintenir chaque aéronef selon le type d'appareil
DR(i)	Distance minimale parcouru par un aéronef sur la piste avant de décollage et après atterrissage
C(i)	Classe de la catégorie d'aéronef
Pr(i)	Priorité d'aéronef

Cet algorithme permet de calculer la distance minimale entre chaque point du graphique (intersection des voies de circulation) et tous les points de destination (point d'arrêt ou d'attente). La distance peut être transformée en un temps (on suppose d'abord que la vitesse de l'avion au sol est constante).

L'implémentation de l'algorithme de routage commence par la construction du graphe pour la zone de transfert de l'aéroport. Un graphe est constitué de nœuds et d'arcs.

Ceci est illustré dans les "Figure II.2" et "II.3" (voir chapitre II), où les points sont des noeuds et les arcs des liaisons.

Afin d'exécuter l'algorithme de recherche de chemin, une matrice adjacente, qui représente les informations de connexion des nœuds et les informations de coût (ou de distance) sous forme de matrice, est généralement utilisée comme structure de données. Ceci est illustré dans le tableau "Table III.2".

Afin de déterminer le chemin optimal, un nouvel algorithme qui permettra de calculer le chemin optimal entre deux points des deux côtés est proposé.

Tableau III.2: Extrait de la matrice adjacente pour le décollage

[illegible]

3.3 Modèle proposé

Il est nécessaire de résoudre un problème d'optimisation. Dans un premier temps, il est important de se concentrer sur la gestion des conflits lors des mouvements au sol. Pour cela des conditions de temps (1) et de vitesse (2) sont à observer

Le temps de parcours (1) de chaque avion sur un arc donné ainsi que sa vitesse maximale (2) sont représentés dans la "Figure III.1"



Figure III.1 : Temps de parcours sur un arc donné

$$\underline{ti(u+1)+ti(u)} \geq \frac{D(u,u+1)}{V_i} \quad (1)$$

$$V_i \geq \frac{D(u, u+1)}{ti(u+1) + ti(u)} \quad (2)$$

Supposons deux avions (i) et (j) qui roulent sur les mêmes arcs, mais dans des directions opposées, comme dans la figure. Pour éviter le conflit, l'un d'entre eux doit partir avant l'autre, comme expliqué aux conditions (3a) et (3b).

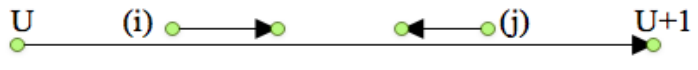


Figure III.2 : Cas de collision sur un même arc

Condition 1 :

```

1:  if  (  $t_i(u) \geq t_j(u)$  ) then
2:      Aircraft (j) goes first
3:  End If

```

(3a)

Condition 2 :

```

1:  if  (  $t_j(u+1) \geq t_i(u+1)$  ) then
2:      Aircraft (i) goes first
3:  End If

```

(3b)

3.3.1 Algorithme Dijkstra

L'algorithme de Dijkstra a été conçu par un l'informaticien Edsger W. Dijkstra en 1956 et publié trois ans plus tard, il est efficace pour résoudre les problèmes des plus courts chemins présentés dans des graphiques orientés pondérés $G = (V, E)$ dans le cas où toutes les pondérations des bords sont positives [12].

Le but est de déterminer le chemin le plus court entre S et T dans un graphe avec des poids d'arcs positifs, un nœud source S et un nœud cible T. L'algorithme de Dijkstra est un algorithme glouton pour la recherche du chemin le plus court avec une complexité temporelle et une implémentation naïve $O(S^2)$.

Il est possible de réduire la complexité temporelle en utilisant des structures de données telles que la pile de Fibonacci qui nous permet d'amener la complexité à $O(A + S \log S)$, ce qui est assez rapide mais ici il faut quelque chose de beaucoup plus rapide.

Algorithm 1 : Normal Dijkstra (G, s, t)
--

```

1:   Initialization:
2:    $d(s)=0$ .
3:    $ListeO \leftarrow \{s\}$ 
4:   For all  $u \in N-\{s\}$  do
5:      $d(u) \leftarrow \infty$ 
6:   End for
7:   While (  $ListeO \neq \emptyset$  ) do
8:      $u \leftarrow \text{delete-min}(ListeO)$ 
9:     If ( $u=t$ ) then
10:      Return path (s,u)
11:    End if
12:     $ListeF \leftarrow ListeF \cup \{u\}$ 
13:    For all  $v \in \text{successeurs}$  do
14:      If  $v \in ListeF$  then
15:        Continue
16:      Else
17:         $d(v) \leftarrow d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
18:        If  $v \in ListeO$  then
19:          If  $d(v) > d(u) + \text{poids}(u,v)$  then
20:             $d(v) = d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
21:          End if
22:        Else
23:           $d(v) = d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
24:           $ListeO \leftarrow ListeO \cup \{v\}$ 
25:        End if
26:      End if
27:    End for
28:  End while

```

3.3.2 Algorithme Dijkstra Bidirectionnel

L'algorithme bidirectionnel de Dijkstra peut être utilisé. Il utilise une Dijkstra classique qui recherche simultanément de la source à la destination et de la destination à la source. Il s'arrête lorsque les deux chemins se rencontrent et/ou lorsqu'un nœud est balayé par les deux directions. Pour l'étude, une modification de Dijkstra classique est faite car dans sa version originale, il recherche tous les chemins optimaux entre un nœud de départ et tous les autres nœuds du graphe. [6]

La recherche bidirectionnelle est plus rapide que la recherche à sens unique dans divers cas. Par exemple, dans un problème de recherche référencée par un graphique où les deux directions de recherche ont un facteur de branchement B et une distance du début au but D . Chacune des deux recherches a une complexité $O(BD/2)$ (en supposant que la recherche se rencontre au milieu) et la somme de ces deux temps de recherche est asymptotiquement bien inférieure à $O(BD)$ qui résulterait d'une recherche unidirectionnelle. [13]

Liste $O \neq 0$: Vérifie si la liste des nœuds non explorés n'est pas vide

Delete – min (Liste O) : Récupère tout élément ayant une priorité mineure

Liste O Liste $O \cup \{v\}$: Ajoute l'élément V à la priorité p ., ailleurs change sa priorité

Algorithm 2 : Bidirectional Dijkstra (G,s,t)

```

1:   $d(s)=0$ .
2:   $d(t)=0$ .
3:   $ListeOF \leftarrow \{s\}$ ,  $ListeOB \leftarrow \{t\}$ 
4:  For all  $u \in N - \{s,t\}$  do
5:       $d(u) \leftarrow \infty$ 
6:  End for
7:   $p \leftarrow \infty$ 
8:  While (  $ListeOF \neq 0$  and  $ListeOB$  ) do
9:       $P(\min F) = \text{get\_min}(ListeOF)$ 
10:      $P(\min B) = \text{get\_min}(ListeOB)$ 
11:     If  $(P(\min F) + P(\min B)) \geq p$  then
12:         Return path for  $p$ 
13:     End If
14:     If  $(p(ListeOF) + p(ListeFF) < p(ListeOB) + p(ListeFB))$  then
15:          $u \leftarrow \text{delete\_min}(ListeOF)$ 
16:          $ListeFF \leftarrow ListeFF \cup \{u\}$ 
17:         For all  $v \in \text{successeurs}$  do
18:             If  $v \in ListeFF$  then
19:                 Continue
20:             Else
21:                  $d(v) \leftarrow d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
22:                 If  $v \in ListeOF$  then
23:                     If  $d(v) > d(u) + \text{poids}(u,v)$  then
24:                          $d(v) = d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
25:                     End if
26:                 Else
27:                      $d(v) = d(u) + \text{poids}(u,v)$ 
28:                      $ListeOF \leftarrow ListeOF \cup \{v\}$ 
29:                 End if
30:             End if
31:             If  $((v \in ListeOB) \text{ and } (pf(v) + pb(v)))$  then
32:                  $P \leftarrow pf(v) + pb(v)$ 
33:             End if
34:         End for
35:     Else
36:         // search back from target to source
37:     End if
38: End while

```

3.3.3 Algorithme A*

A-Star Search (A*) (Hart, Nilsson & Raphael, 1968) est l'un des algorithmes classiques les plus robustes car il trouve toujours un chemin si celui-ci existe. Il combine également un bon rapport performance/qualité du chemin trouvé par rapport aux autres algorithmes. Le temps de réaction du programme doit être proche de l'instantané. Contrairement à la plupart des algorithmes, il utilise une heuristique de la distance entre la position de la source et le but, c'est l'une des caractéristiques qui le rend différent. Son seul inconvénient majeur est qu'il ne trouve pas toujours le meilleur chemin si les heuristiques ne sont pas admissibles alors que l'algorithme de Dijkstra le trouve. Pour obtenir une heuristique admissible, l'heuristique ne doit en aucun cas surévaluer la distance à la destination.

L'algorithme ajoute les variables g et h pour donner la variable f. Toutes les variables f de chacun des chemins empruntés par l'algorithme sont comparées afin de trouver le chemin le plus court. L'algorithme s'arrête dès qu'il trouve le point de destination et lui renvoie le chemin 3.

L'algorithme A* a l'avantage de pouvoir réduire le temps de calcul en cherchant un chemin dans la direction du nœud de destination, mais il ne garantit pas toujours des résultats optimaux [10].

Si les ajouts et les comparaisons relatifs aux coûts sont de complexité $O(1)$, la complexité de la procédure $A^*(G,s)$ est $O(n + m \log n)$.

Algorithm 3 : A* Algorithm (G, s, t)

```
1:   Initialization:
2:    $d(s)=0$ 
3:    $Open\_List \leftarrow \{s\}$  ,  $Closed\_List \leftarrow \{0\}$ ,  $g(s) \leftarrow 0$ 
4:   While (  $Open\_List \neq 0$  ) do
5:        $u \leftarrow \text{delete-min}(Open\_List)$ 
6:       If (  $u=t$  ) then
7:           Return path (s,u)
8:       End if
9:        $Open\_List \leftarrow Open\_List - \{u\}$ 
10:       $Closed\_List \leftarrow Closed\_List \cup \{u\}$ 
11:      For all (u,v)  $\in$  successeurs do
12:          If (  $v \in Closed\_List$  ) then
13:              Continue
14:          Else
15:               $g'(v) \leftarrow g(u) + \text{distance}(u,v)$ 
16:              If (  $v \in Open\_List$  ) then
17:                   $Open\_List \leftarrow Open\_List \cup \{u\}$ 
18:                   $g(v)=g'(v)$ 
19:                   $f(v)=g(v)+h(v,s)$ 
20:              End if
21:          End if
22:      End for
23:  End while
```


4 Le nouvel algorithme hybride A* : implémentation et résultats

4.1 Présentation de l'algorithme hybride A*

Afin d'améliorer l'efficacité opérationnelle de la zone de transit de l'aéroport, la meilleure route optimisée doit être communiquée au pilote par le contrôleur le plus rapidement possible. Dans ce cas, il est nécessaire d'appliquer des algorithmes avec une vitesse d'exploitation optimisée et une vitesse de calcul élevée.

Ici sont utilisés :

- L'avantage de l'algorithme de Dijkstra bidirectionnel qui permet la bidirectionnalité dans la recherche de meilleurs chemins et assure une valeur optimale.
- Un algorithme hybride A* combinant les avantages de l'algorithme A* (vitesse de calcul rapide) avec les avantages de l'algorithme Dijkstra bidirectionnel (assurant une valeur optimale) améliore l'efficacité opérationnelle.

Comme on peut le voir dans la "Figure III.3", l'algorithme hybride A* est une matrice heuristique optimisée construite à l'avance à l'aide de l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra.

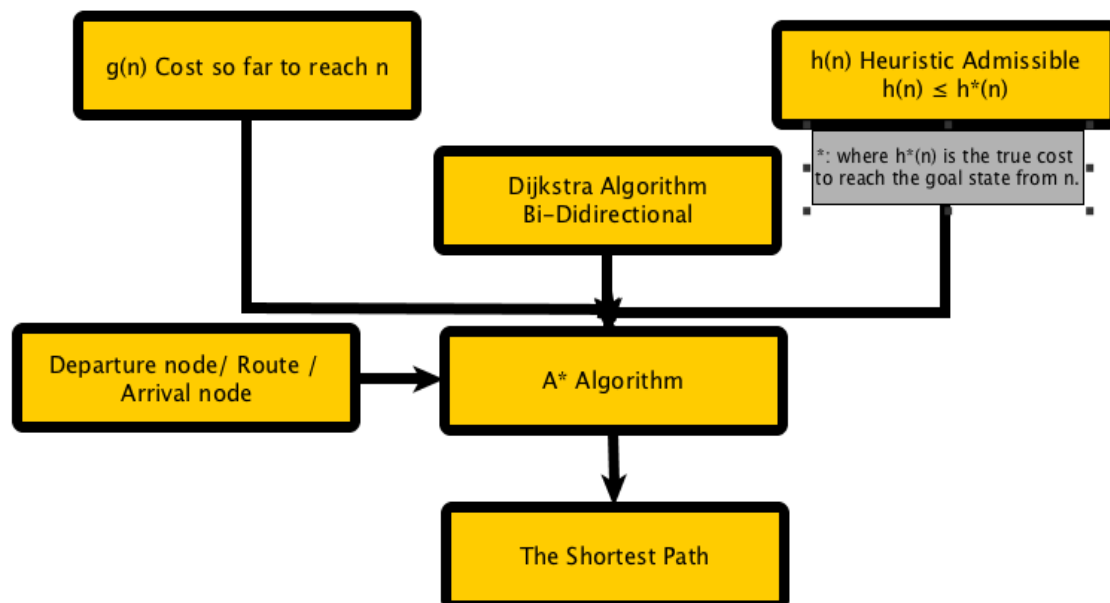


Figure III.3 Organigramme de l'algorithme Hybride A*

Actuellement, la construction de la matrice heuristique des coûts est basée sur le fait qu'elle est construite et utilisée à l'avance. Elle est mise à jour lorsque des modifications sont apportées au réseau.

L'algorithme bidirectionnel de Dijkstra dérive toujours le chemin le plus court

Ainsi, la matrice heuristique est constituée des coûts résiduels les plus courts, pour assurer l'optimalité de l'algorithme A*.

L'algorithme hybride A* est conçu pour que l'utilisateur puisse spécifier le point de départ/point de routage/point d'arrivée comme conditions et présente la recherche du chemin le plus court qui satisfait toutes les conditions.

4.2 Implémentation de l'algorithme hybride A*

Tous les algorithmes ont été implémentés en python. Les expériences ont été réalisées sur la base de l'aéroport International de Casablanca Mohamed V, dont le graphe indique 160 nœuds.

En supposant que la vitesse de l'avion est constante, le calcul du temps nécessaire pour trouver une trajectoire probable est inférieur à une seconde pour chaque avion dans les deux graphes.

Pour obtenir les mêmes performances, on utilise un Intel Core i7 de 2,2 GHz et un DDR3 de 8 Go à 1600 MHz.

4.3 Test de performance de l'algorithme hybride A*

4.3.1 Comparaison avec l'algorithme Dijkstra Bidirectionnel

Pour comparer les performances avec l'algorithme hybride A* présenté dans cet article, les performances des algorithmes existants sont testées.

Afin de tester la performance de l'algorithme Dijkstra bidirectionnel, 160 nœuds sont définis comme points de base et d'extrémité dans l'environnement Python dans lequel l'algorithme Dijkstra bidirectionnel a été mis en œuvre. Le temps de calcul total nécessaire pour trouver le chemin entre chaque nœud a été mesuré.

Environ 92 369 calculs ont été effectués, représentant une combinaison de tous les nœuds de base et d'extrémité.

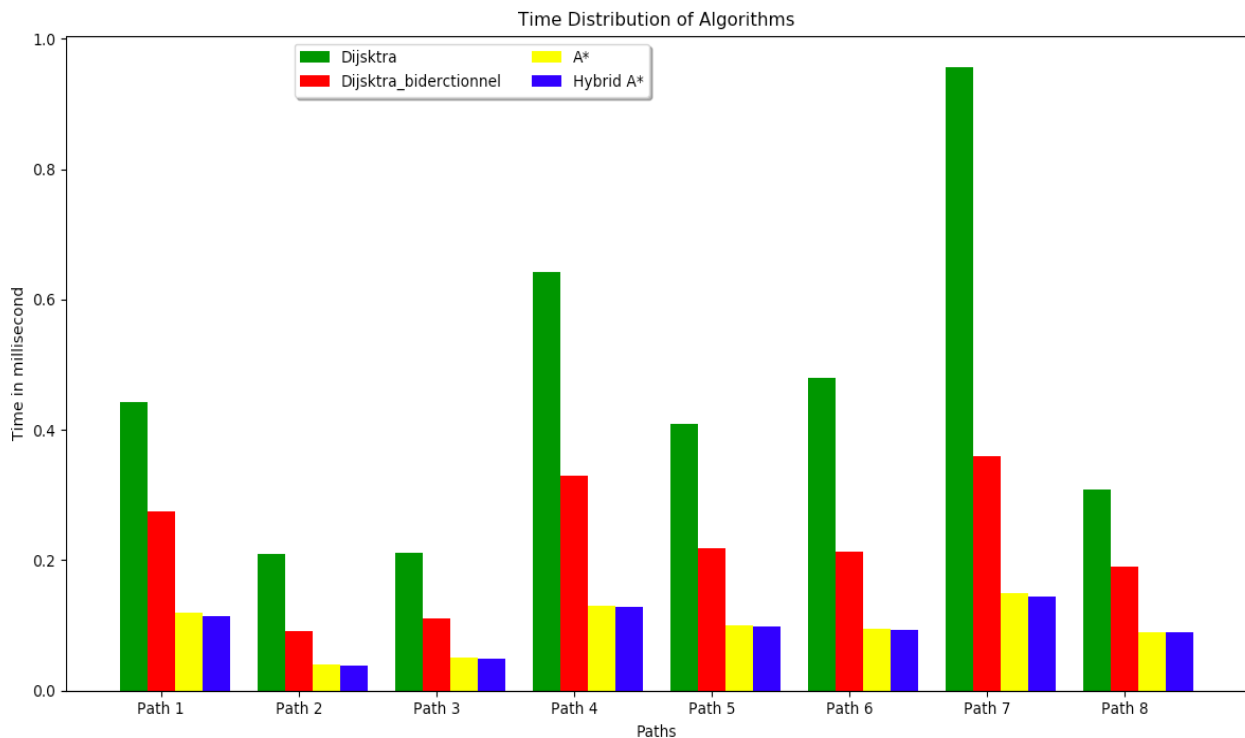


Figure III.4 Temps d'exécution des différents algorithmes

Comme le montre la "Figure III.4", l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra a un temps de calcul moyen de 0,25 ms et une distribution uniforme de 0,099 ms à 0,39 ms. L'algorithme bidirectionnel de Dijkstra a l'avantage d'obtenir plus d'informations que le temps de calcul car il obtient le chemin le plus court avec tous les nœuds qui ont été utilisés après la fin de la recherche de chemin comme nœud de destination.

Il est également vrai que la recherche séquentielle de tous les nœuds voisins à partir du nœud de départ est inefficace [14].

La "Figure III.5" montre le résultat de l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra.

Le cercle orange en gras indique l'emplacement du nœud où l'opération a été effectuée.

La ligne rouge sélectionnée correspond au chemin optimal final fourni par l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra.

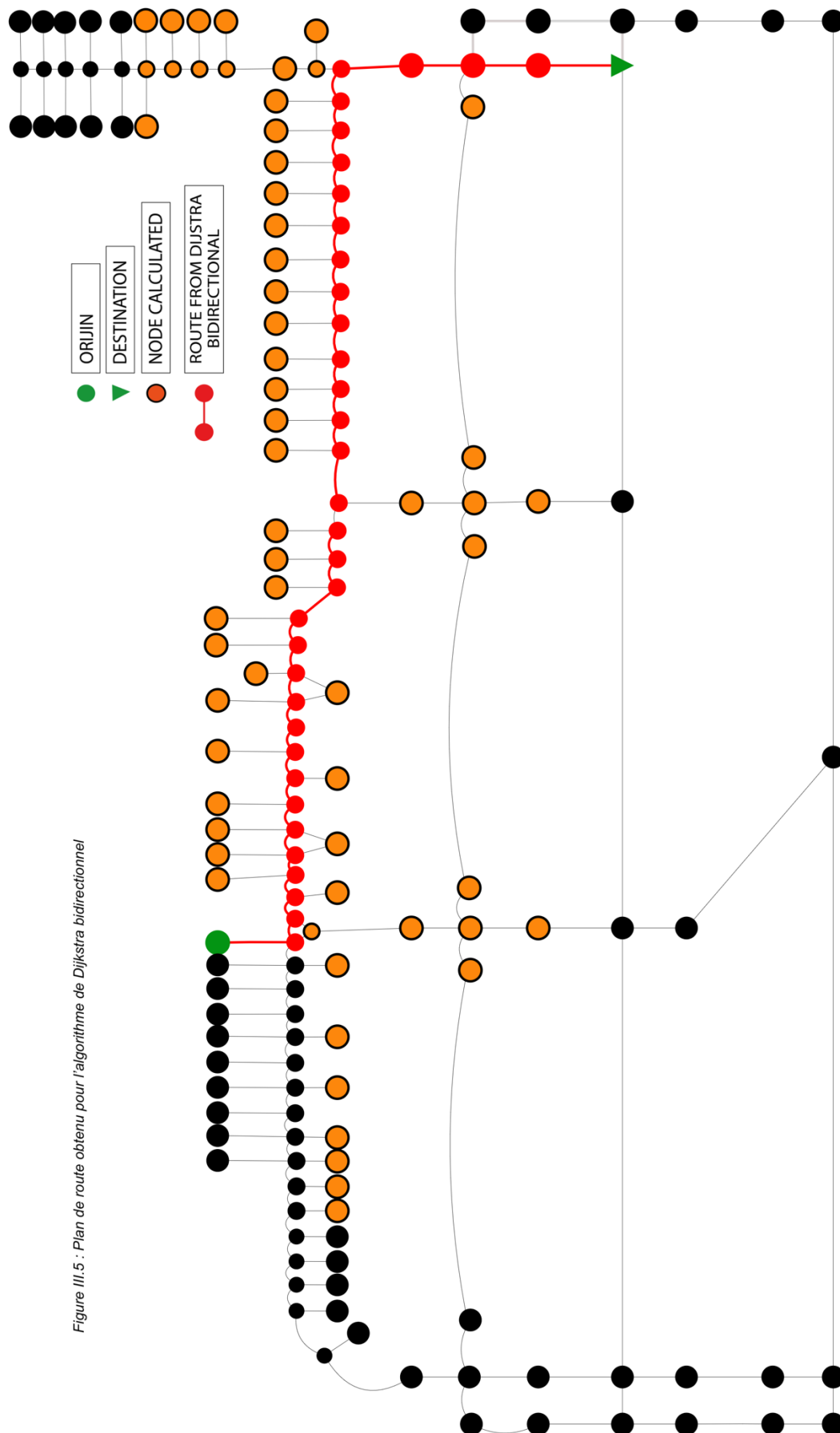


Figure III.5 : Plan de route obtenu pour l'algorithme de Dijkstra bidirectionnel

Comme le montre la "Figure III.3", l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra calcule les informations inutiles sur les nœuds en plus des nœuds de départ et de fin tout en effectuant une recherche de chemin optimale pour un nœud de départ et de fin donné. La distribution des informations est située dans tout l'aéroport.

4.3.2 Comparaison avec l'algorithme A*

Pour tester les performances de l'algorithme A*, la même méthode que la méthode de mesure des performances de l'algorithme bidirectionnel de Dijkstra a été appliquée. Comme le montre la "Figure III.4", le temps nécessaire pour trouver le chemin le plus court entre les nœuds de l'algorithme A* suit une moyenne de 0,096 ms. C'est une différence remarquable par rapport au temps de fonctionnement moyen de 0,096 ms, qui correspond à l'algorithme de Dijkstra.

Cependant, l'algorithme A* basé sur la distance géométrique ne fournit pas toujours le meilleur chemin optimisé. Comme le montre la "Figure III.6", la distance attendue du nœud n au nœud final est différente de celle du réseau non maillé, comme pour l'aéroport international de Casablanca Mohamed V. [11]

4.3.3 Comparaison avec l'algorithme Hybride A*

Dans ce chapitre, la même méthode que la méthode de test de performance pour la performance de l'algorithme A* proposé par le nouvel algorithme est appliquée.

Comme le montre la "Figure III.4", le temps de recherche de l'algorithme hybride A* suit un type de distribution normal avec une moyenne de 0,096 ms et présente une petite différence de performance par rapport à l'algorithme A*.

Cela signifie que l'algorithme hybride A* proposé dans cet article maintient la performance de vitesse de calcul qui est un avantage de A*.

En outre, comme le montre la "Figure III.7", en utilisant la base de données heuristique optimisée construite par l'algorithme de Dijkstra, l'optimalité de la recherche de chemin, qui est un avantage de l'algorithme de Dijkstra.

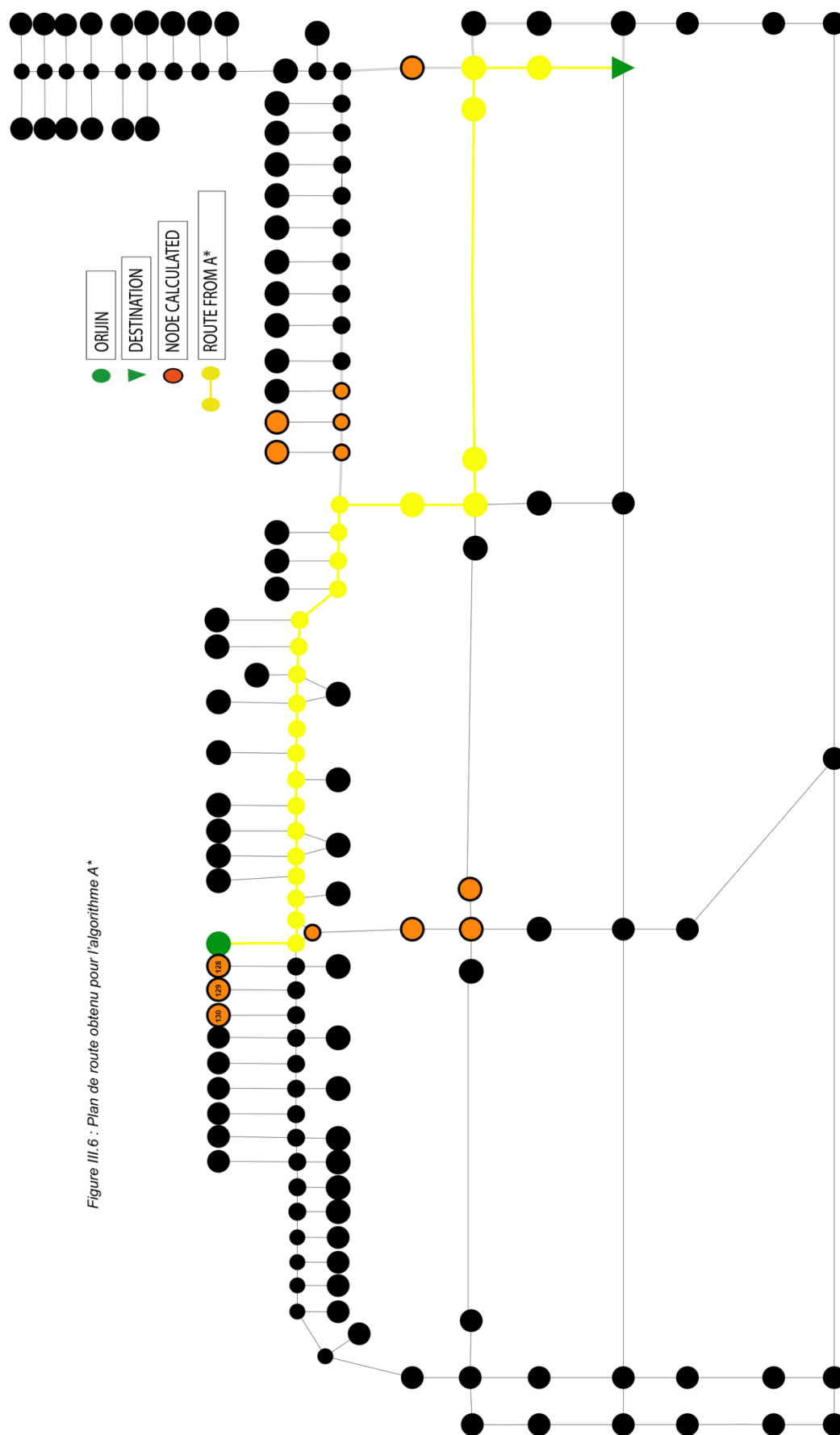


Figure III.6 : Plan de route obtenu pour l'algorithme A*

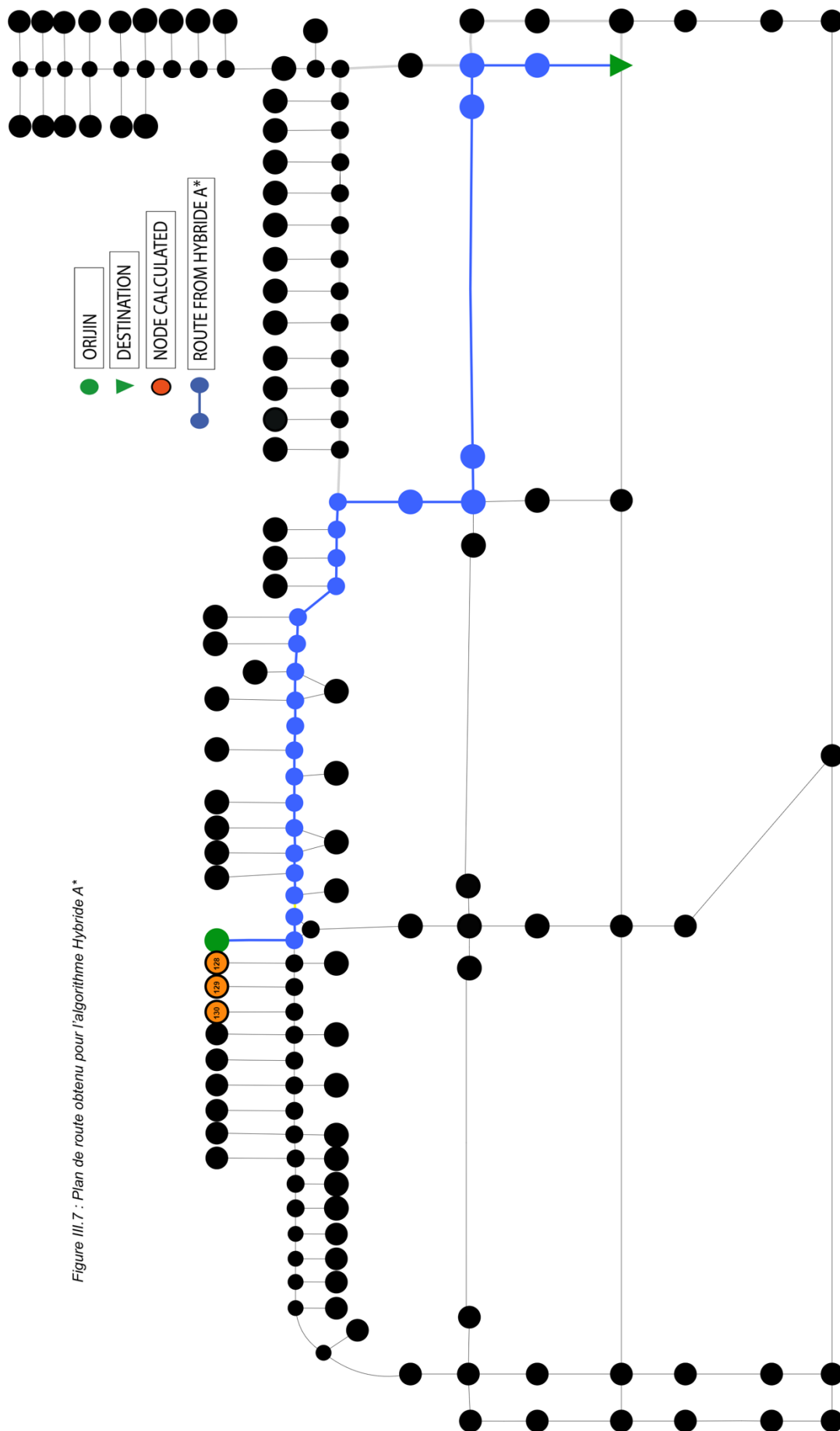


Figure III.7 : Plan de route obtenu pour l'algorithme Hybride A*

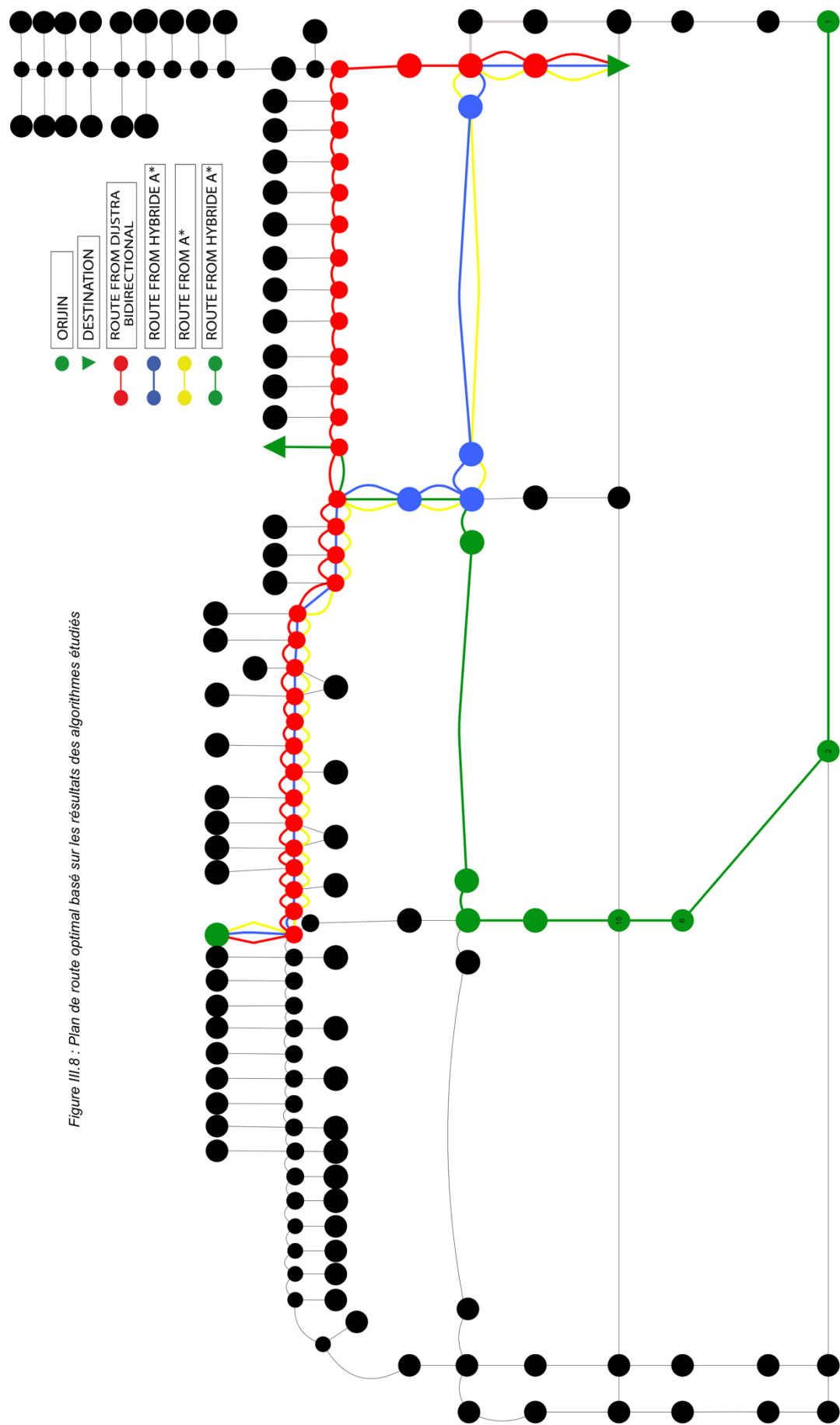


Figure III.8 : Plan de route optimal basé sur les résultats des algorithmes étudiés

5 Conclusion

La gestion des mouvements au sol du trafic aérien est un problème majeur pour les aéroports. Une meilleure optimisation des mouvements au sol permettrait de réduire les retards des vols et le coût global des voyages. Cet article propose un nouvel algorithme de routage pour fournir le chemin le plus court, basé sur trois algorithmes qui permettent une bonne planification des mouvements au sol "Figure III.8".

Ces trois algorithmes sont itératifs : ils permettent de planifier la trajectoire d'un avion l'un après l'autre. Les trois algorithmes sont garantis comme un outil d'aide à la décision en temps réel pour les contrôleurs aériens, mais ils ont chacun des forces et des faiblesses.

Une première version est décrite en utilisant l'algorithme classique de Dijkstra, puis la version classique de Dijkstra a été étendue par une version bidirectionnelle. Les deux algorithmes offrent une solution optimale, mais le coût du temps de calcul reste relativement long malgré une nette amélioration avec l'utilisation de l'algorithme Dijkstra bidirectionnelle.

Un troisième algorithme A* est utilisé. La limite de celui-ci étant qu'il ne garantit pas une solution optimale malgré un coût de temps de calcul plus rapide.

Pour éliminer les faiblesses de chaque algorithme étudié, un nouvel algorithme hybride A* est donc présenté ici. Il intègre les avantages de chaque algorithme pour réduire le temps de calcul et optimiser la recherche du chemin le plus court tout en maintenant un temps d'exécution minimum pour assurer la faisabilité des trajectoires prévues dans un temps réduit. Ce modèle a été étendu pour traiter la faisabilité des trajectoires planifiées tout en évitant les conflits entre les avions et évalué sur le modèle de l'aéroport International de Casablanca Mohamed.V.

CHAPITRE IV:

**Conception stratégique des mesures de précaution pour
les passagers des aéroports en période de crise sanitaire
mondiale Covid 19 :**

Modélisation paramétrique et algorithmes de traitement

1 Introduction

Le secteur de l'aviation connaît une crise sans précédent depuis mars 2020. En effet, presque tous les aéroports ont été paralysés suite au déclenchement de la pandémie de Covid-19.

Eurocontrol avait annoncé une réduction significative de 88% du nombre de vols d'ici le 1^{er} mai 2020 [1], [2].

Le flux du trafic international a contribué de manière significative à la propagation du virus dans le monde entier [3]. En Europe, par exemple, il semble que les régions les moins touchées par le virus soient celles où il n'y a pas d'aéroport international.

L'une des principales caractéristiques du Covid-19 est sa longue période d'incubation, qui est actuellement de 5,2 jours en moyenne [4]. La contamination pendant la période d'incubation est l'une des raisons pour lesquelles le Covid-19 se propage si largement par rapport aux autres virus, ce qui rend extrêmement difficile d'exclure la possibilité que des passagers asymptomatiques passent par l'aéroport [5],[6]. Selon l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI)[7], le trafic aérien international connaîtra une baisse significative de l'ordre de 44 % à 80 % du nombre de passagers internationaux en 2020 par rapport à 2019.

Le Conseil international des aéroports (ACI)[8] a estimé que les aéroports ont perdu deux cinquièmes de leur trafic passagers ou plus de 76 milliards de dollars de recettes en 2020 par rapport au statu quo. L'Association internationale du transport aérien (IATA)[9], qui représente les compagnies aériennes, estime que le nombre de passagers-kilomètres payants a diminué de 48 % en 2020 par rapport à 2019.

Avec le temps, l'activité économique reprendra, les gouvernements s'efforçant de rétablir la croissance et la reprise économique, ce qui nécessitera une reprise de l'activité aéroportuaire. Toutefois, les aéroports doivent être ré-ouverts progressivement tout en étant conscients du risque potentiel généré par l'hyper mobilité vécue jusqu'à présent afin d'éviter une seconde vague de la pandémie.

À ce jour, il n'existe pas de solution publiée pour un système de gestion des flux de passagers dans le cadre des nouvelles contraintes sanitaires. Néanmoins, certaines règles et normes sont définies par l'IATA pour garantir les exigences de qualité du service d'assistance aux passagers dans la zone du terminal, sur lesquelles nous avons basé nos propositions de mesures supplémentaires en fonction des exigences sanitaires pour une telle pandémie.

La distanciation sociale est l'une des principales mesures convenues, qui affectera la capacité de l'aéroport, bien que les distances récemment adoptées par certains aéroports fassent de cette question un sujet de débat. En conséquence, ce chapitre cherche à déterminer les paramètres nécessaires à la distanciation des passagers afin de minimiser la propagation potentielle du virus sans compromettre la capacité de l'aéroport à gérer le flux de passagers. Par conséquent, ce chapitre propose des simulations et des discussions sur les effets possibles de ces mesures et teste leur applicabilité.

L'objectif principal de ce chapitre est d'étudier les différentes possibilités de gérer le flux de passagers dans le cadre du renforcement des mesures de sécurité sanitaire - comme dans le cas du Covid 19 - en introduisant un outil de simulation.

Ce chapitre sera divisé en quatre sections comme suit :

- Tout d'abord, l'introduction définit la base et le contexte actuel au sein des aéroports en ce qui concerne la crise sanitaire actuelle du Covid 19.
- La deuxième section présente les bases de la gestion des flux de passagers dans un aéroport. Le contexte de la conception du simulateur sera défini avec les différents paramètres variables. Dans cette partie, le modèle mathématique de conception est exposé en fonction des différents paramètres.
- La troisième section traite de la gestion des flux de passagers arrivant aux comptoirs d'enregistrement et propose des solutions pour respecter les mesures de sécurité sanitaire.
- La section 4 traite des discussions et des résultats des différentes simulations inhérentes aux solutions envisagées dans la partie 3. La conclusion clôt ce chapitre.

2 Conception et simulation

2.1 Contexte du processus de simulation

L'aéroport international Mohammed V de Casablanca dispose de trois terminaux d'une capacité totale de 14 millions de passagers par an et constitue la plaque tournante du réseau aéroportuaire marocain. La superficie de chaque terminal est respectivement de 76 000 m² pour le T1, 66 000 m² pour le T2 et 4 000 m² pour le T3. Il est relié à plus de 96 destinations internationales par 840 fréquences hebdomadaires exploitées par 24 compagnies aériennes. Le terminal T1 sera utilisé dans cette étude en raison de sa capacité, de ses infrastructures de pointe et de ses

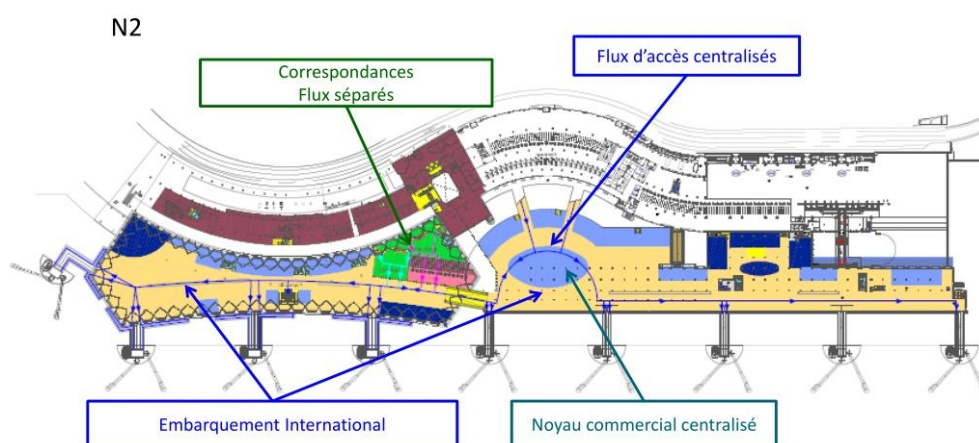
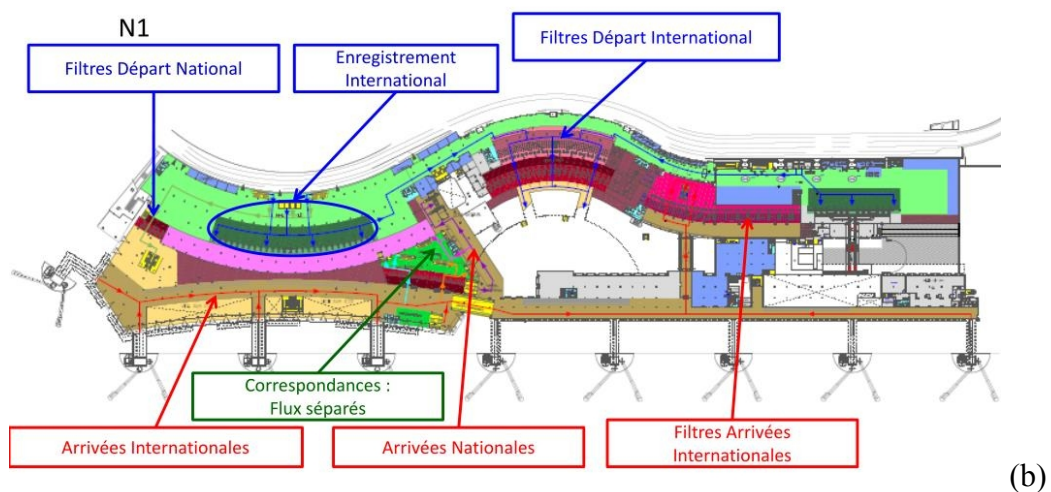
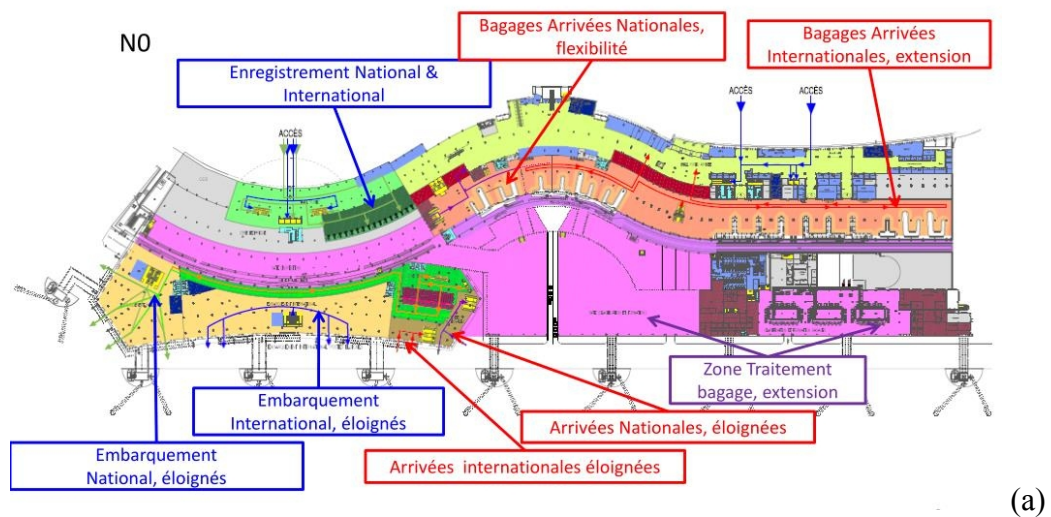
équipements qui répondent aux normes internationales actuelles en matière de sûreté, de sécurité et de qualité de service [10].

Les figures IV.1(a, b, c) représentent la configuration détaillée des terminaux 1 et 2 de l'aéroport international de Casablanca Mohamed V avec les accès et les différentes zones de traitement et de passage des passagers.

La représentation de la figure IV.1(a) est à un niveau N0, c'est à dire que cette représentation présente le premier niveau de contrôle et de gestion du flux (on parle ici du contrôle des accès).

La figure IV.1.2 représente le niveau N1 de contrôle avec les différents filtres à l'intérieur de l'espace aéroportuaire.

La figure IV.1.3 représente le niveau N2 de contrôle avec la gestion du flux des passagers en transit. Cette dernière n'est pas prise en compte dans ce chapitre car il est admis que les passagers en transit ont déjà eu à passer les différents contrôles précédents.



10

©

Figure IV.1: Représentation des terminaux 1 et 2 de l'aéroport international de Casablanca Mohamed V (a) N0, (b) N1, (c) N2

2.2 Mesures de précautions requises à l'aéroport

En vertu du Règlement sanitaire international (RSI), les autorités aéroportuaires sont tenues d'établir des plans et des dispositifs d'urgence efficaces pour faire face aux événements susceptibles de constituer une urgence de santé publique de portée internationale. L'épidémie actuelle d'une nouvelle maladie à coronavirus (COVID-19) s'est propagée à travers plusieurs frontières, entraînant des demandes de détection et de gestion des cas suspects. Afin de mettre en œuvre le modèle de gestion des flux de passagers sanitaires proposé dans cet article, il est supposé que les lignes directrices pour la détection et la gestion des voyageurs malades soupçonnés d'être infectés sont appliquées conformément aux lignes directrices provisoires pour la gestion des voyageurs malades publiées le 16 février 2020 [11], et que les règles de prévention définies par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) sont mises en œuvre dans les installations aéroportuaires [12]. En outre, nous avons proposé des mesures de précaution supplémentaires, telles que des séparateurs physiques entre les passagers et les usagers, des barrières entre les portes d'embarquement et une signalisation indiquant les itinéraires, afin que les passagers au départ et à l'arrivée ne se croisent pas.

2.3 Conception des flux des passagers

En ce qui concerne la gestion des flux de passagers, elle est basée sur le concept du robinet qui remplit un seau qui fuit, où le robinet représente le flux de passagers, et la fuite représente le flux de passagers traités, tandis que le remplissage du seau résulte de la différence entre les passagers entrants et les passagers traités [16, 17].

Les passagers sont tenus de se rendre à la zone d'enregistrement conformément aux règles en vigueur et de suivre le processus établi pour les passagers en partance [13], comme le montre la figure IV.2.

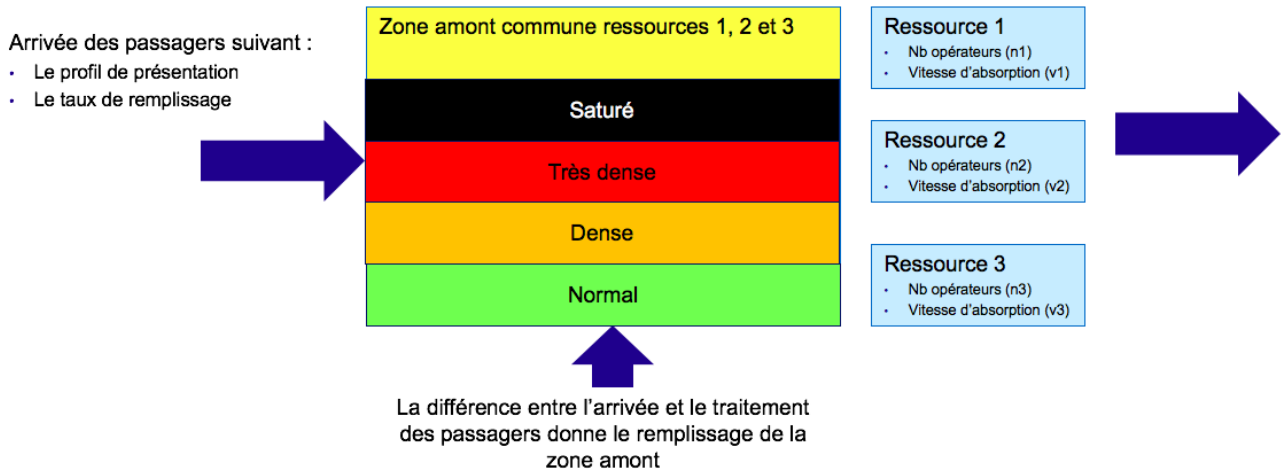


Figure IV.2: Présentation des passagers dans l'aire d'enregistrement

2.4 Entrée des données

Le modèle de simulation contient une unité centrale et une unité d'affichage. Les données d'entrée sont divisées en deux groupes, comme le montre la figure IV.3. La première partie en bleu correspond aux données de vol, aux données des passagers, à la surface d'enregistrement et aux ressources.

La deuxième partie en vert représente les paramètres variables, qui comprennent la vitesse de traitement, les modèles de mouvement des passagers, la force sociale et les déviations, et la distribution du temps avant le départ [18].

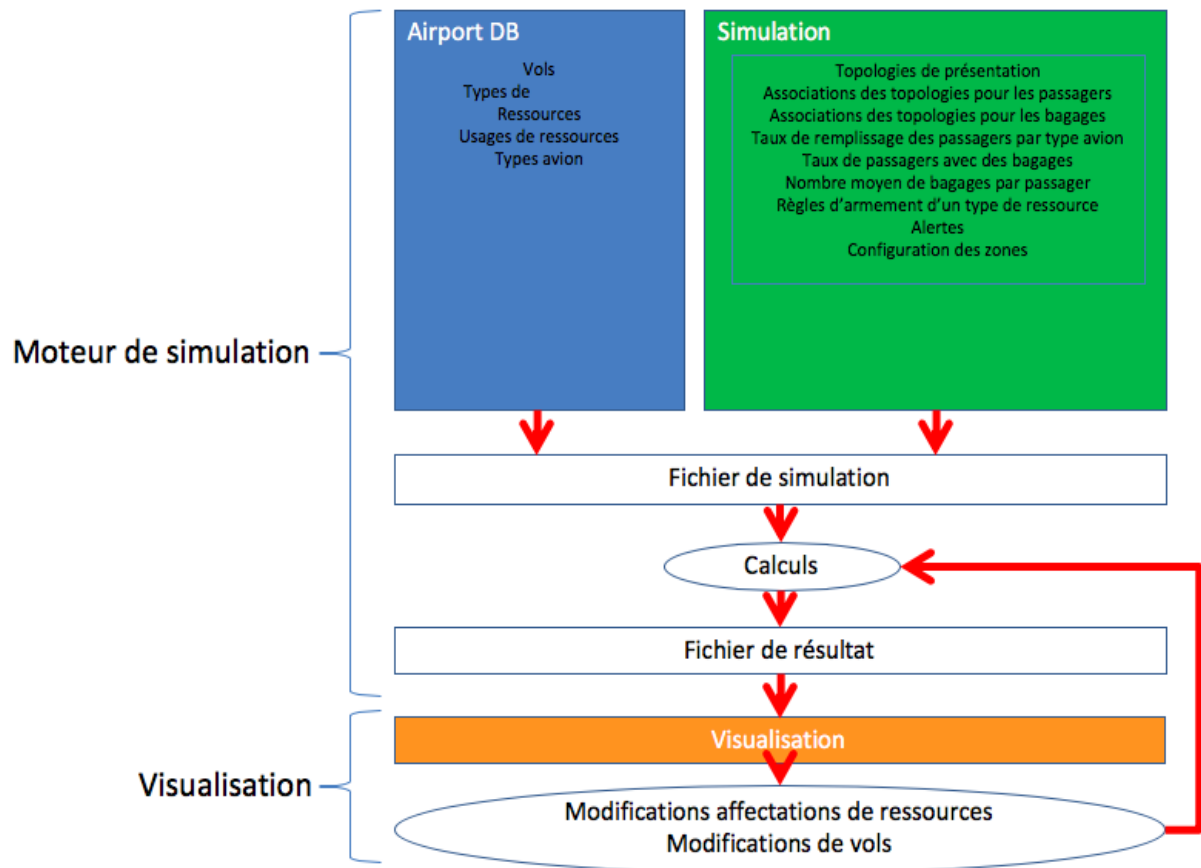


Figure IV.3 Processus détaillé de la simulation des données

Les données de vol saisies sont extraites des données accessibles communiquées par le fournisseur de services de navigation aérienne. Une distinction est faite entre les passagers nationaux et internationaux car ils ne partagent pas le même processus au sein de la structure aéroportuaire. Afin de disposer d'une simulation la plus réaliste et la plus précise possible dans la gestion des flux de passagers, les données utilisées sont basées sur la période estivale 2019 de l'aéroport. Cela permet de vérifier son applicabilité. Sur la base du nombre de mouvements par heure, tirés des horaires réels. Le flux de passagers peut être obtenu comme illustré dans la figure IV.4.

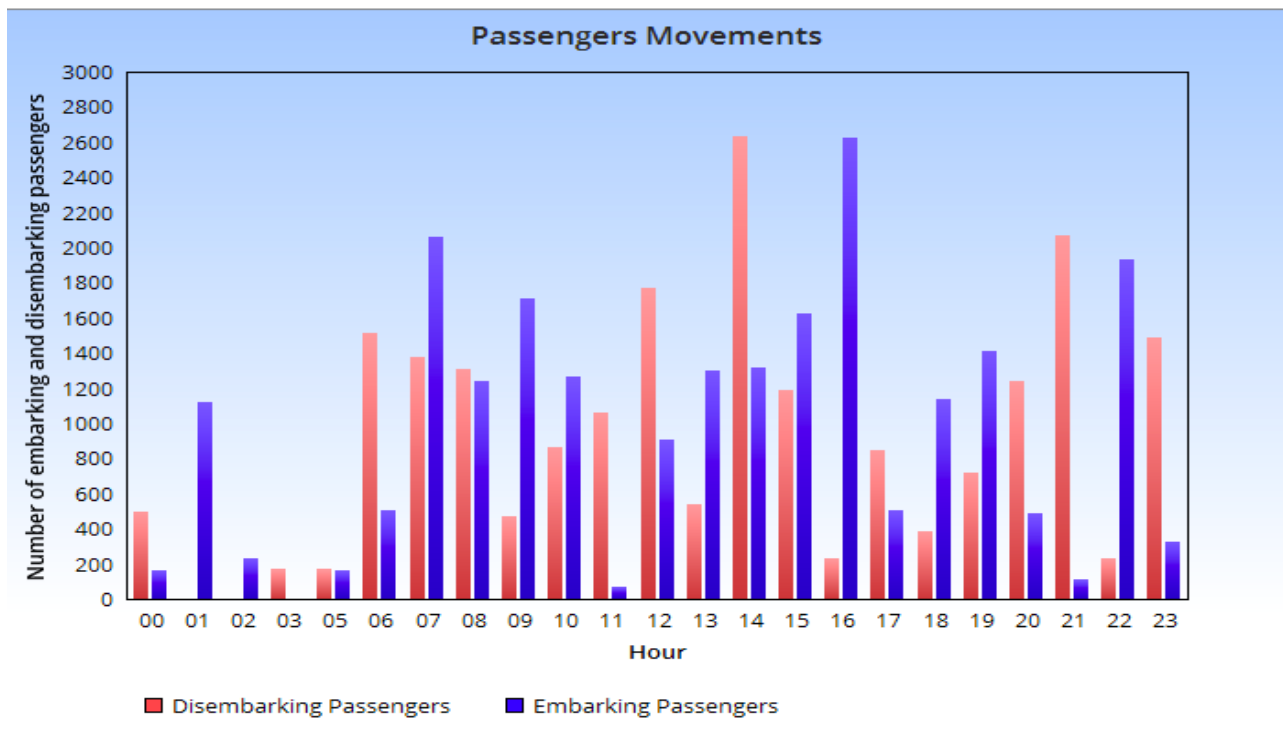


Figure IV.4: Nombre des passagers à l'embarquement et au débarquement

La figure IV.4 présente l'évolution des flux de passagers sur une journée lors du débarquement et de l'embarquement. Les créneaux horaires des vols sont tels que le plus grand nombre de passagers au départ se situe entre 7h00 et 9h00 ainsi qu'entre 14h00 et 17h00. L'aéroport international Mohammed V de Casablanca accueille en moyenne 43 000 passagers par jour. Le nombre de passagers embarqués et débarqués est à peu près équilibré avec un ratio de 22 000 passagers embarqués pour 21 400 passagers débarqués. L'heure de pointe compte 2059 passagers embarquant de 7h00 à 8h00 du matin, tandis que 2626 passagers embarquent entre 16h00 et 17h00.

2.5 Normes IATA pour les terminaux

L'attention portée au LOS est ici essentielle, surtout en temps de crise. En effet, c'est un indicateur qui permet d'observer la fluidité dans le traitement des flux de passagers. En temps de crise, il est facile d'observer les débordements, les passagers qui se mettent en colère à cause des conditions, etc. Le respect du LOS permet en partie d'éviter de devoir gérer des débordements dus par exemple à un long temps d'attente. C'est pourquoi cela reste un indicateur qui, même en temps

de crise, doit être surveillé. Des normes internationales ont été établies pour les terminaux. L'approche de l'étude préconise que les mesures relatives au temps d'attente, à la taille des files d'attente et au traitement des passagers. Les tarifs doivent être conformes aux normes de qualité de service de l'IATA [13] illustrée dans la section . Le tableau IV.1. présente la qualité de l'échelle de service représentée par l'IATA [14, 15].

Table IV.1: Levels of Service (LOS) selon la IATA sous forme de qualité de service

Niveau	Niveau de service	Flux	Attente	Confort
A	Excellent	Libre	Aucune	Excellent
B	Haut	Stable	Très peu	Haut
C	Bon	Stable	Acceptable	Bon
D	Adéquate	Instable	Passable	Adéquate
E	Inadéquate	Instable	Inacceptable	Inadéquate
F	Inacceptable	Surchargé	Surcharge	Inacceptable

L'occupation d'une zone d'attente varie considérablement en fonction du temps passé par un passager dans cette zone. Le temps d'attente dans les différents modules est un facteur clé de la qualité du service et un paramètre essentiel dans le dimensionnement et l'étude de la capacité d'un terminal. Il est extrêmement difficile d'établir une relation précise entre le temps d'attente, le niveau de service et l'espace disponible par passager. Un premier indicateur de la qualité du service est l'espace disponible par passager dans les zones d'attente et de trafic, traduit sur l'échelle du niveau de service par le ratio d'allocation d'espace exprimé en m^2 par passager. La table IV.2 présente les ratios recommandés par l'IATA pour chaque passager en fonction de la qualité du service. Une façon simplifiée d'aborder le problème consiste à fixer des temps d'attente maximums acceptables.

Table IV.2 Ratio d'allocation d'espace en m^2 par passager

	M ² /PAX				
	A	B	C	D	E
Wait at check-in	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9
	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1
	2,3	1,9	1,7	1,6	1,5
	2,6	2,3	2	1,9	1,8

La table IV.3 indique les temps d'attente maximums, en minutes, recommandés par l'IATA pour chaque module de traitement en fonction de la qualité du service [14], [19]. Ces temps d'attente maximums acceptables doivent être adaptés en fonction du contexte, des objectifs de qualité de service de l'aéroport et du type de trafic [15]. D'une manière générale, pour un passager, un temps d'attente est inacceptable dès qu'il dépasse 20 minutes [20].

Table IV.3 Temps d'attente maximum par passagers

Niveau de service	A	B	C	D	E
Temps (min)	0 – 12		12 – 30		

2.6 Modélisation mathématiques des paramètres variables

Le modèle de mouvement aléatoire et non directionnel est un mouvement unidirectionnel avec la possibilité de changer de position vers l'avant ou de rester stationnaire. Les étapes sont supposées être indépendantes. Par conséquent, les étapes suivantes ne dépendent que de leur position actuelle. x . x est une variable aléatoire. La probabilité $P(x, t)$ que x est occupé au temps t (probabilité de séjour) est le résultat des possibilités de transition pour quitter la position x ($P(x \rightarrow x')$) ou pour y entrer de l'extérieur ($P(x'' \rightarrow x)$). Comme exprimé ci-dessous, une transition vers l'avant est définie par l'équation 1. L'immobilité est définie par l'équation 2.

$$F = P'(x \rightarrow x + 1) = P'(x - 1 \rightarrow x) \quad (1)$$

$$S = P'(x \rightarrow x) = P'(x + 1 \rightarrow x + 1) \quad (2)$$

Les probabilités de résidence $P(x, t - 1)$ et $P(x'', t - 1)$ indiquent la probabilité avec laquelle les postes respectifs sont pourvus au moment précédent. Si les probabilités de transition sont pondérées par les probabilités de résidence, alors la probabilité d'occupation $P(x, t)$ de la position x au point temporel t résulte selon l'équation 3.

$$P(x, t) = F[P(x - 1, t - 1) - P(x, t - 1)] + S[P(x, t - 1)] \quad (3)$$

Pour la cartographie spatiale de la marche aléatoire, on suppose une position fixe $x_{t=0}$ et la position suivante x_{t+1} est déterminée par l'ajout d'une variable aléatoire λx dans l'équation 4.

$$x_{t+1} = x_t + \lambda x \quad (4)$$

Afin de ne pas induire une direction de mouvement privilégiée, on suppose la probabilité de la marche aléatoire selon le modèle suivant (5).

$$F + S = 1 \quad (5)$$

Puisque pour chaque pas de temps t la même décision doit être prise, il est donc possible d'obtenir la probabilité d'arriver à un point k avec un nombre n de pas par une distribution binomiale (6).

$$p(x=k) = \binom{n}{k} F^k S^{n-k} \quad (6)$$

En général, l'écart-type augmente avec le nombre n de mesures effectuées selon la formule (7) ci-dessous :

$$\sigma(x) = \sqrt{(n \times F \times S)} \quad (7)$$

est avec une attente (8)

$$\mu(x) = n \times F \quad (8)$$

Selon le théorème de la limite, dans le cas de $n \rightarrow \infty$, la distribution binomiale $b(n, F)$ s'oppose à une distribution normale $N(nF, nFS)$.

Les passagers en partance sont répartis en fonction de leur heure d'arrivée à l'aéroport. Tous les passagers en partance sont générés en fonction d'un numéro de vol. Cette génération est basée sur la fonction de densité de probabilité d'une distribution normale décalée horizontalement (9), donnée par le temps en minutes avant l'arrivée (t), le temps moyen d'arrivée (μ) avant le départ et

l'écart-type (σ). Il a été démontré que la distribution normale est bien adaptée aux arrivées de passagers dans les aéroports [22], [23] et a détecté une asymétrie vers la droite et a donc utilisé la distribution SU de Johnson pour obtenir un meilleur ajustement comme avec une distribution normale.

$$p(t|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

Comme l'heure d'arrivée des passagers est un point critique pour déterminer le pourcentage de voyageurs qui manquent leur vol en raison de barrières sanitaires ainsi que pour déterminer le niveau de qualité du service, cinq stratégies avec différentes distributions d'arrivée sont étudiées, qui sont présentées dans la figure IV.5. Les valeurs en abscisse représentent le temps restant jusqu'au départ de l'avion. Ainsi, l'origine représente le départ de l'avion. Dans le décalage horizontal de la fonction de distribution, un temps tampon (t_p) est inclus. Cela garantit que tous les passagers sont générés dans la salle d'embarquement de l'aéroport au moins 45 min avant l'heure de départ. L'hypothèse de temps tampon est basée sur les informations fournies par les compagnies aériennes. Les éventuels temps d'attente aux contrôles de sécurité ne sont pas pris en compte en premier lieu.

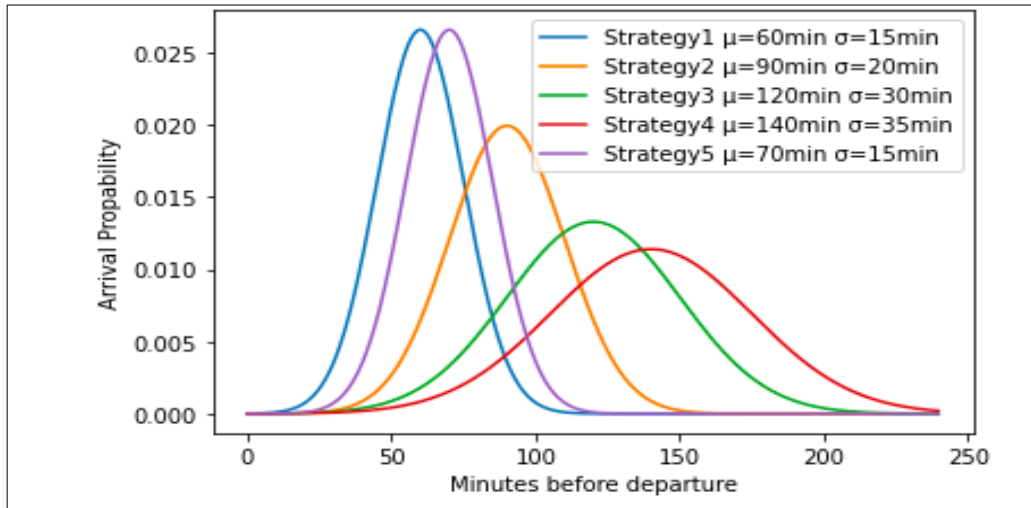


Figure IV.5: Répartition de l'heure d'arrivée des passagers au départ pour cinq stratégies

Le tableau IV.4 donne un aperçu des stratégies étudiées avec des temps d'arrivée moyens variables (μ), des écarts types (σ) et des temps tampons (p).

Tableau IV.4: Aperçu des paramètres de distribution des arrivées sélectionnés pour toutes les stratégies de simulation

Heure moyenne d'arrivée, écart type + temps tampon (minutes)			
Stratégie 1 (bleu)	$\mu = 60$	$\sigma = 15$	$t_p = 10$
Stratégie 2 (orange)	$\mu = 90$	$\sigma = 20$	$t_p = 10$
Stratégie 3 (vert)	$\mu = 120$	$\sigma = 30$	$t_p = 10$
Stratégie 4 (rouge)	$\mu = 140$	$\sigma = 35$	$t_p = 10$
Stratégie 5 (violet)	$\mu = 70$	$\sigma = 15$	$t_p = 10$

De la stratégie 1 à la stratégie 4, l'heure moyenne d'arrivée et l'écart-type ont été progressivement augmentés de 10 minutes ou 5 minutes, respectivement, ce qui signifie que la plage horaire dans laquelle les passagers arrivent à la gare a été étendue. La stratégie 5 est une variante de la stratégie 1 avec un retard de 5 minutes par rapport à l'heure de départ. Les délais de traitement des contrôles de sécurité sont basés sur les mesures recommandées par l'IATA, avec un temps de traitement moyen de 35 secondes. Les délais de traitement lors des différentes opérations dans la zone d'enregistrement sont basés sur la rapidité de traitement des passagers par les opérateurs. Le cumul des passagers dans la zone d'enregistrement se fait par l'arrivée des passagers en fonction de leur profil de présentation et du taux d'occupation de la zone d'enregistrement. La différence entre l'arrivée à l'aéroport et le traitement des passagers donne le taux de remplissage de la zone d'enregistrement. La vitesse de traitement des passagers (équation 10) dépend des ressources et augmente avec le nombre d'opérateurs (n) et le taux d'absorption.

$$V = \sum n_i \times v_i \quad (10)$$

Compte tenu des différences possibles en fonction de l'âge et du sexe des différents passagers, une vitesse moyenne de marche sans obstacle a été suggérée par [24]. La valeur moyenne est de 4,9 km/h avec un écart-type de 0,918 km/h, ce qui correspond à environ 1,36 m/s et 0,255 m/s. Sur la base de cette distribution de valeurs, cette distribution de valeurs a été acceptée comme entrée pour générer la vitesse de marche préférée pour la simulation. Une donnée similaire sur les

vitesse de marche préférées a déjà été utilisée avec succès par [23]. De plus, des vitesses de marche minimales (2,47 km/h) et maximales (6,18 km/h) ont été établies, approchant la vitesse de transition de la course à pied [25] [26]. Au cours de la simulation, les vitesses de marche réelles sont influencées par la présence de forces sociales [27]. En conséquence, des obstacles peuvent ralentir la vitesse dans un certain laps de temps. D'autre part, des forces de poussée venant de l'arrière peuvent augmenter la vitesse ou même faire dévier la marche [27]. Mathématiquement, les bases du modèle des forces sociales sont maintenant formulées [27] [28] , [29] et ont récemment donné une interprétation en termes de contrôle optimal et de jeu différentiel [30]. La position d'un passager peut être représentée par un point $r_\alpha(t)$ dans l'espace, qui change continuellement au cours du temps t , de sorte que la vitesse $v_\alpha(t)$ est régie par l'équation de mouvement suivante (11) :

$$\frac{dr_\alpha(t)}{dt} = v_\alpha(t) \quad (11)$$

En effet, si la force sociale globale $f_\alpha(t)$ représente la somme des différentes influences systématiques de différents facteurs environnementaux sur le comportement d'un passager α , et que le terme de fluctuation $\xi_\alpha(t)$ reflète des variations comportementales aléatoires résultant d'écarts volontaires ou involontaires par rapport au comportement optimal, on obtient l'équation suivante pour l'accélération ou la décélération et le changement de direction des passagers (12) :

$$\frac{dv_\alpha}{dt} = f_\alpha(t) + \xi_\alpha(t) \quad (12)$$

Selon notre description de $f_\alpha(t)$ (13), une force d'accélération est prise en compte $f_{0\alpha}(v_\alpha)$ effets répulsifs, $f_{\alpha\beta}(r_\alpha)$ en raison des limites, des interactions répulsives $f_{\alpha\beta}(r_\alpha, v_\alpha, r_\beta, v_\beta)$ avec les autres passagers β , et des effets d'attraction $f_{ai}(r_\alpha, r_i, t)$.

$$f_\alpha(t) = f_\alpha^0(v_\alpha) + f_{\alpha\beta}(r_\alpha) + \sum_{\beta \neq \alpha} f_{\alpha\beta}(r_\alpha, v_\alpha, r_\beta, v_\beta) + \sum_i f_{ai}(r_\alpha, r_i, t) \quad (13)$$

Dans ce qui suit (14), les termes à force unique sont discutés. Chaque passager a sa propre

vitesse de déplacement v_{α}^0 dans la direction e_{α} de sa prochaine destination. Les écarts de la vitesse

réelle v_{α} par rapport à la vitesse souhaitée $v_{\alpha}^0 = v_{\alpha}^* e_{\alpha}$ dus à des perturbations (par des obstacles

ou des manœuvres d'évitement) sont corrigés dans le temps dit «de relaxation» $\tau_{\alpha} \approx 1$ s

$$f_{\alpha}^0(v_{\alpha}) = \frac{1}{\tau_{\alpha}} (v_{\alpha}^0 e_{\alpha} - v_{\alpha}) \quad (14)$$

Dans des circonstances normales, la vitesse souhaitée v_{α}^0 (15) est approximativement distribuée de manière gaussienne avec une valeur moyenne de 1,3 m/s, éventuellement plus petite,

et un écart type d'environ 0,3 m/s. Afin de rattraper les retards, la vitesse souhaitée $v_{\alpha}^0(t)$ est souvent augmentée au cours du temps. Elle peut être décrite, par exemple, par la formule suivante :

$v_{\alpha}^{\max}$ qui est la vitesse maximale souhaitée et $v_{\alpha}^0(0)$ la vitesse initiale, qui correspond à la vitesse de départ prévue (16) [30]. Ce paramètre, qui dépend du temps, reflète la nervosité ou l'impatience des passagers.

$$V_{\alpha}^0(t) = [1 - n_{\alpha}(t)] V_{\alpha}^0(0) + n_{\alpha}(t) V_{\alpha}^{\max} \quad (15)$$

$$n_{\alpha}(t) = 1 - \frac{v_{\alpha}(t)}{V_{\alpha}^0(0)} \quad (16)$$

Selon la description de $f_{\alpha}(t)$, une force d'accélération est prise en compte $f_{\alpha}^0(v_{\alpha})$, où $v_{\alpha}(t)$ indique la vitesse moyenne sur la direction de mouvement désirée. Fondamentalement, de longs temps d'attente diminuent la vitesse réelle tandis que la vitesse souhaitée augmente. Tragiquement, à des pressions élevées, des effets de foule peuvent se produire et les personnes risquent de perdre la distance sociale qui les sépare [28]. Pour éviter ce type de situation, les passagers doivent garder une certaine distance de séparation à tout moment. Plus la distance est faible, plus le passager se sent [31] mal à l'aise [32]. Cet effet peut être décrit (17) par une force répulsive $f_{\alpha\beta}$, qui diminue de façon monotone avec la distance $\|r_{\alpha} - r_{\beta}^{\alpha}\|$ entre le lieu $r_{\alpha}(t)$ des passagers et le point le plus proche r_{β}^{α} de la barrière. Dans le cas le plus simple, cette force peut être exprimée en termes de potentiel répulsif V_{β} :

$$f_{\alpha\beta}(r_{\alpha}) = -\Delta_{r_{\alpha}} V_{\beta}(\|r_{\alpha} - r_{\beta}^{\alpha}\|) \quad (17)$$

Des termes similaires de force répulsive $f_{\alpha\beta}(r_{\alpha}, v_{\alpha}, r_{\beta}, v_{\beta})$ peuvent décrire que chaque passager α garde une distance avec les autres passagers selon la situation de β . Les simulations effectuées dans ce document ont défini la force d'interaction répulsive selon la formule suivante (18).

$$f_{\alpha\beta}(t) = A_{\alpha}^1 \exp\left[\frac{(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta})}{B_{\alpha}^1}\right] n_{\alpha\beta} \left(\lambda_{\alpha} + (1 - \lambda_{\alpha}) \frac{1 + \cos(\varphi_{\alpha\beta})}{2} \right) + A_{\alpha}^2 \exp\left[\frac{(r_{\alpha\beta} - d_{\alpha\beta})}{B_{\alpha}^2}\right] n_{\alpha\beta} \quad (18)$$

3. Distribution pour la précocité de l'arrivée

3.1. Distribution de précocité à l'arrivée par jour

En utilisant l'équation de distribution (9) et dans le manuel du terminal aéroportuaire de l'IATA [6], il a été possible de présenter le modèle de précocité d'arrivée à la zone d'enregistrement du terminal 1 de l'aéroport international Mohammed V de Casablanca pour les vols intérieurs

(Figure IV.6.) et les vols internationaux (Figure IV.7.). Le programme vise à obtenir la répartition appropriée des passagers. Le programme est développé en utilisant les fonctions Python, le programme se compose de 5 feuilles de calcul: distribution des arrivées, données d'entrée, distribution quotidienne et graphiques.

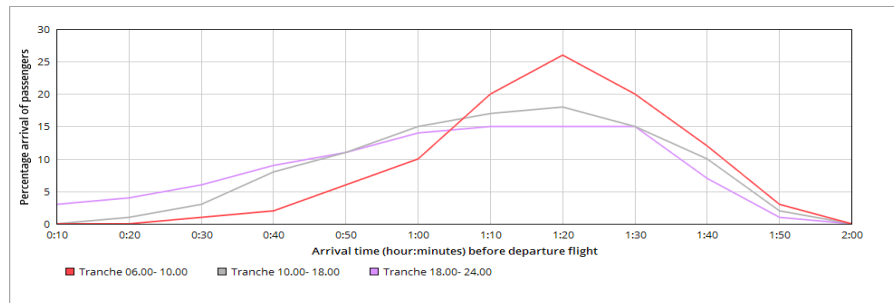


Figure IV.6: Distribution IATA de la précocité des arrivées au niveau national

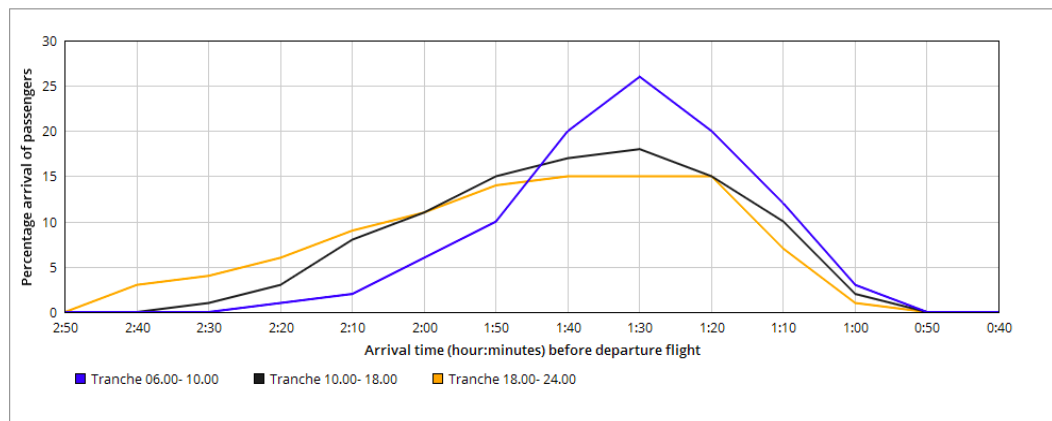


Figure IV.7: Distribution IATA de la précocité des arrivées au niveau international

Les Figures IV.6 et IV.7. montrant le débit de passagers à l'enregistrement sont fournies à des intervalles de dix minutes avant l'heure de départ. Ils montrent également que le modèle sera différent selon l'heure de la journée. Il y a trois périodes différentes appliquées, de 06h00 à 10h00, de 10h00 à 18h00 et de 18h00 à 24h00. Le créneau horaire entre 00h00 et 06h00 n'est pas pris en compte car il s'agit d'une période à faible trafic.

3.2 Corrélation entre l'heure d'arrivée du passager et l'heure d'embarquement

La comparaison de la précocité d'arrivée des passagers est présentée à la Figure IV.8. Elle montre la différence de précocité d'arrivée des passagers pour les vols internationaux et domestiques [18]. Pour les vols internationaux, les derniers passagers doivent arriver 70 minutes avant l'heure de départ. Pour les vols intérieurs, les passagers peuvent arriver beaucoup plus tard. Cependant, les passagers des vols internationaux et domestiques doivent désormais arriver plus tôt, car ils doivent se soumettre à des formalités supplémentaires et respecter des mesures sanitaires, décrites dans la section suivante. Il peut également y avoir une mise en quarantaine et des tests obligatoires.

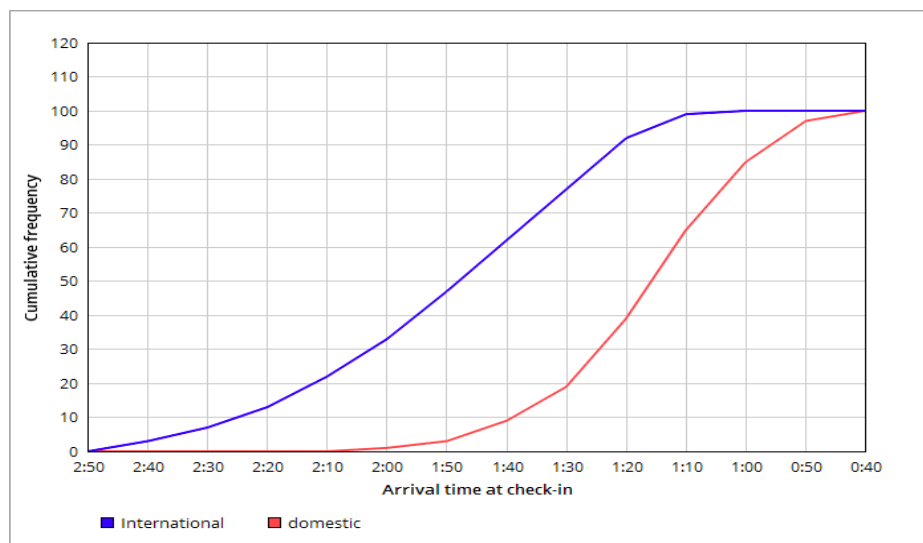


Figure IV.8: Relation entre l'heure d'arrivée et la répartition des passagers.

4. Modélisation et analyse des simulations

Les données relatives aux vols et aux passagers affichées dans les simulations correspondent à une heure de départ typique de l'été (7h00) par jour. Autour de cette heure, il y a environ 14 vols pour un total de 2050 passagers, dont 62,5 % voyagent en Boeing B-737, 18,75 % en Embraer E-190, 12,5 pour cent en B-787 et 6,25 % en B-767. Les vols sont effectués à partir du terminal T1, réservé essentiellement à la compagnie nationale Royal Air Maroc. Le terminal étant conforme aux

normes IATA, selon les normes de conception [18], [19] la zone d'enregistrement ne mesure pas plus de 1462 m² pour un total de 52 comptoirs d'enregistrement.

4.1 Développement du scénario

Les comptoirs d'enregistrement tels qu'ils sont organisés aujourd'hui (Figure IV.9.) n'offrent aucune séparation physique entre les opérateurs d'enregistrement et les passagers. Il est donc nécessaire d'établir une procédure de gestion des passagers lors de l'exécution des formalités d'enregistrement dans le respect des règles sanitaires requises [19] .

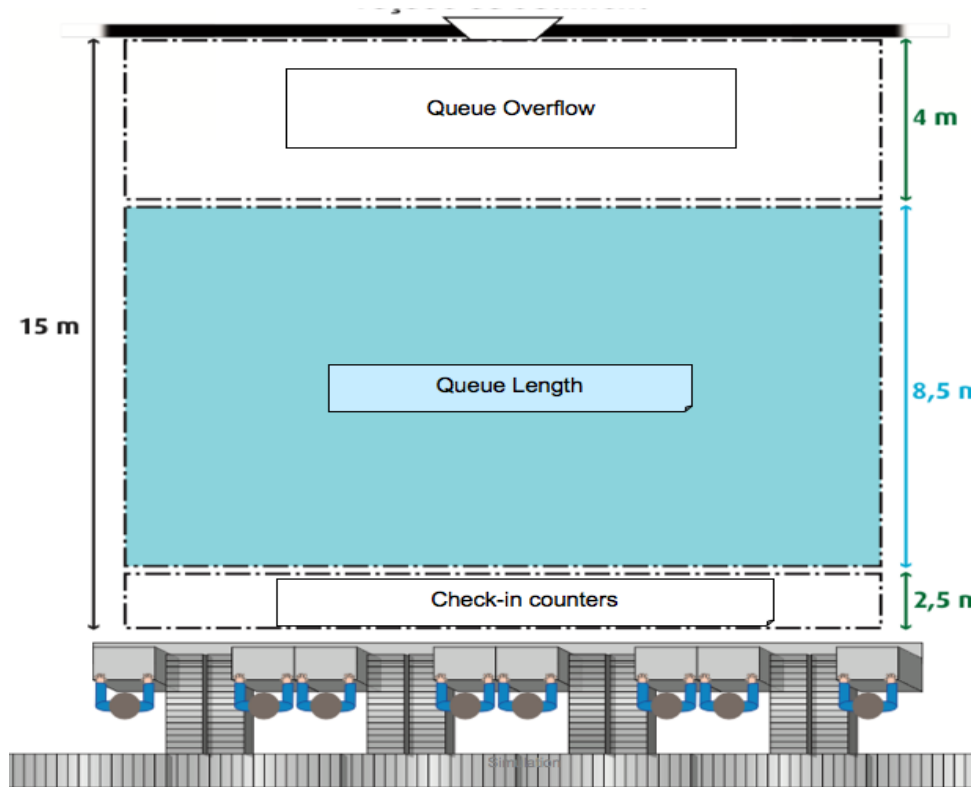


Figure IV.9: Organisation des comptoirs d'enregistrement (source: Service Technique de l'Aviation Civile / DGAC)

Les simulations prennent en charge deux scénarios possibles. Le premier scénario envisage la fermeture d'un comptoir sur deux en l'absence de panneaux de séparation en plexiglas. Le second scénario suppose l'installation de panneaux de séparation entre les files d'attente et les opérateurs ainsi que des guichets côte à côte, mettant ainsi tous les guichets en service . Dans chaque scénario,

trois simulations sont effectuées afin d'ajuster la distance sociale entre les passagers. Par exemple, la première simulation opère une distance de 2m, la deuxième une distance de 1,50m et la troisième une distance de 1m.

4.2. Interface du programme de simulation

Normalement, les passagers doivent être présents à l'aéroport 3 heures avant le départ pour les vols internationaux. Le programme de simulation est développé pour gérer le flux de passagers dans les zones d'enregistrement en tenant compte des nouvelles mesures sanitaires. Certains écrans d'affichage du simulateur sont présentés dans les Figures IV.10 et IV.11.

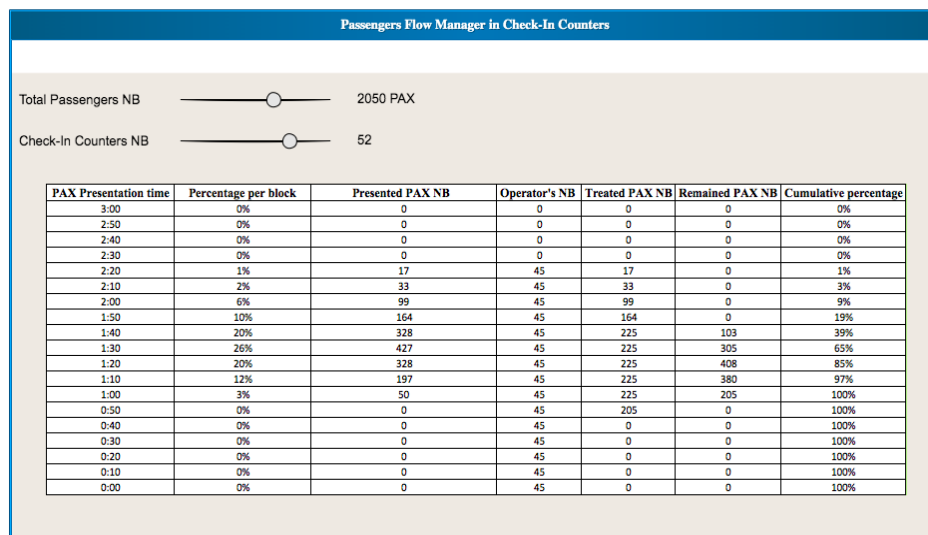


Figure IV.10: Gestion des flux de passagers aux comptoirs d'enregistrement

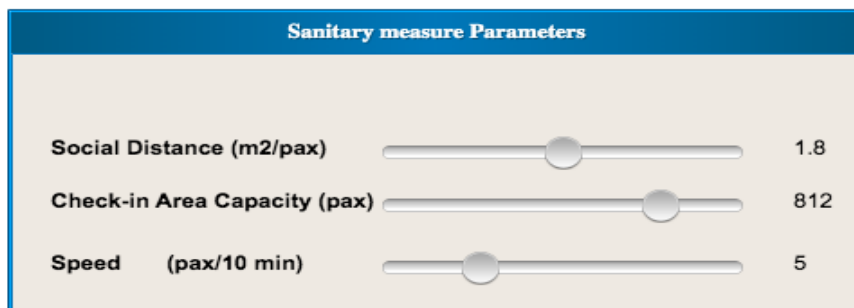


Figure IV.11: Gestion des paramètres de mesures sanitaires

Selon les paramètres entrés (distance entre deux passagers, capacité de la zone d'enregistrement, temps de traitement moyen) illustrés dans la Figure IV.11

Le programme de simulation estime par pas de 10 minutes, en fonction des comptoirs d'enregistrement ouverts, le pourcentage et le nombre cumulés de passagers présents dans la zone d'enregistrement, les passages enregistrés et ceux en cours d'enregistrement, comme illustré à la Figure IV.10.

4.3. Analyse et discussion des résultats

4.3.1 Variation de la longueur de la file d'attente

4.3.1.1 Cas de 26 comptoirs d'enregistrement

La Figure IV.12. représente, pour chacune des trois simulations réalisées dans le premier scénario, la longueur de la file d'attente observée en unités de personnes avant le départ de l'avion.

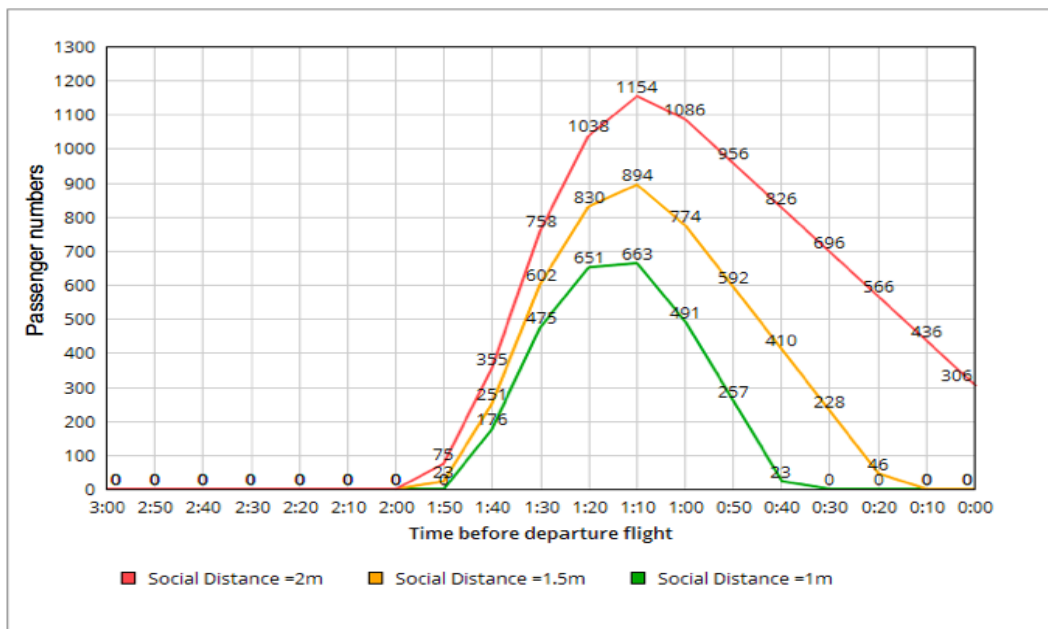


Figure IV.12: Variation de la file d'attente en fonction du temps selon la distance sociale appliquée avec 26 guichets.

Avec une distance sociale de 2m (courbe rouge), l'accumulation des passagers est très rapide. Un point haut est observé 1h10 avant le départ avec 1154 personnes encore en attente. Au total, au départ de l'avion, il y a encore 306 passagers qui n'ont pas encore été traités. Si l'on se base sur l'heure de fermeture de l'enregistrement, qui intervient généralement 40 minutes avant le départ, 826 passagers n'auront pas été traités.

Avec une distance sociale de 1,50m (courbe orange), l'accumulation des passagers est rapide. Un point haut est également observé 1h10 avant le départ avec 894 passagers encore en attente. A la fin, 20 minutes avant le départ, il reste encore 46 personnes dans la file d'attente. Sachant que 40 minutes avant le départ de l'avion, l'enregistrement est fermé, ce sont alors 410 personnes qui, à ce moment-là, n'auront pas encore été traitées.

Avec une distance sociale de 1m (courbe verte), l'accumulation des passagers est plus lente. Le traitement des passagers est plus fluide. Comme dans les deux autres scénarios, il y a un point haut dans le temps d'attente, comme dans les deux autres scénarios, 1 heure 10 minutes avant le départ, avec 663 personnes qui attendent encore. 40 minutes avant le départ, il y a encore 23 passagers dans la file d'attente et l'enregistrement est sur le point de fermer.

Dans les trois scénarios présentés ici, le nombre de passagers au départ, malgré une fluctuation de la mesure de distance sociale, n'est pas traité dans le temps disponible. En effet, même avec une distance de 1m, 40 minutes avant la fermeture du comptoir d'enregistrement pour le départ, il y a encore des passagers dans la file d'attente. La solution consistant à ouvrir un seul comptoir d'enregistrement sur deux pour assurer l'application des mesures sanitaires n'est donc pas une solution optimale en termes de gestion des flux de passagers

4.3.1.2 Cas de 52 comptoirs d'enregistrement

La Figure IV.13. représente, pour chacune des trois simulations du second scénario, la longueur de la file d'attente observée en unités de personnes avant le départ de l'avion.

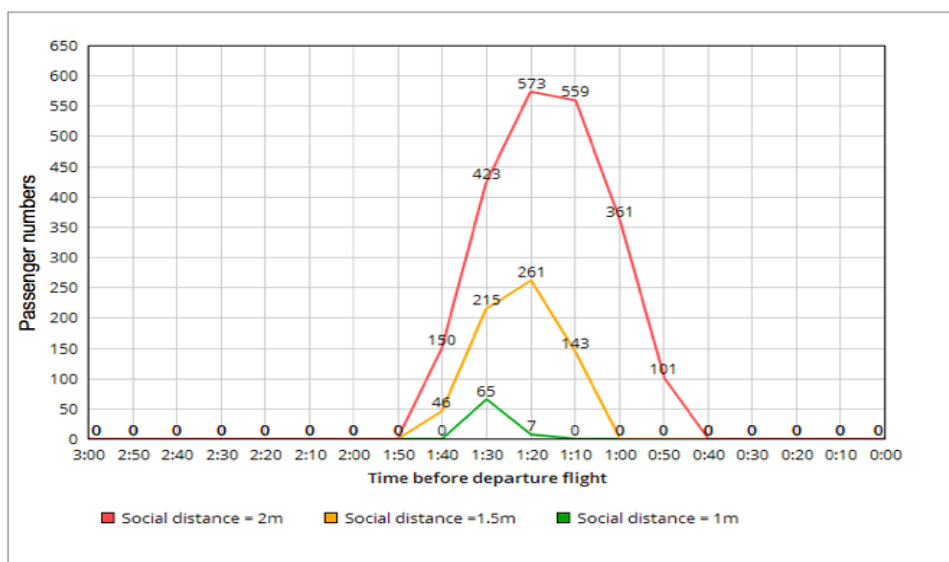


Figure IV.13: Variation de la file d'attente en fonction du temps selon la distance sociale appliquée avec 52 guichets.

Avec une distance sociale de 2m (courbe rouge), l'accumulation observée des passagers est rapide. Un pic est observé 1h20 avant le départ avec 573 personnes encore en attente. Cependant, contrairement à ce qui a pu être observé précédemment, 40 minutes avant le départ, tous les passagers ont pu être traités.

Avec une distance sociale de 1,50m (courbe orange), l'accumulation des passagers est plus lente. Un pic est également observé 1h20 avant le départ avec 261 personnes encore en attente. Cependant, contrairement à ce qui a été observé précédemment, 60 minutes avant le départ, tous les passagers ont été traités.

Avec une distance sociale de 1m (courbe verte), le nombre total de passagers est presque inexistant. Le traitement des passagers se fait de manière fluide. Un léger point haut est observé comme dans les deux autres scénarios 1h30 avant le départ avec 65 personnes en attente. Cependant, contrairement à ce qui a pu être observé précédemment, 1h10 avant le départ, tous les passagers ont pu être traités.

Avec un plus grand nombre de comptoirs d'enregistrement ouverts, il est plus facile de respecter les mesures de distanciation sociale tout en assurant un flux de traitement des passagers efficace.

En effet, dans toutes les simulations du premier scénario, il y a encore des passagers qui ne peuvent pas monter à bord de l'avion parce qu'ils sont toujours dans la file d'attente, alors que dans

toutes les simulations du second scénario, tous les passagers parviennent à terminer leur enregistrement.

Il convient donc de dire qu'une mesure efficace pour maintenir la bonne gestion du flux de traitement des passagers serait de disposer d'un système de séparation des comptoirs d'enregistrement et des files d'attente associées afin de pouvoir ouvrir un maximum de comptoirs et ainsi pouvoir contenir le flux de passagers arrivant au point de départ.

4.3.2. Variation du temps d'attente

En cas d'afflux important de passagers, la capacité demandée peut dépasser la capacité de traitement possible. Cela crée une accumulation de files d'attente.

4.3.2.1 Cas de l'ouverture de 26 guichets

La Figure IV.14. montre la variation du temps d'attente pour une mesure de distance de 2m, dans le cas du premier scénario.

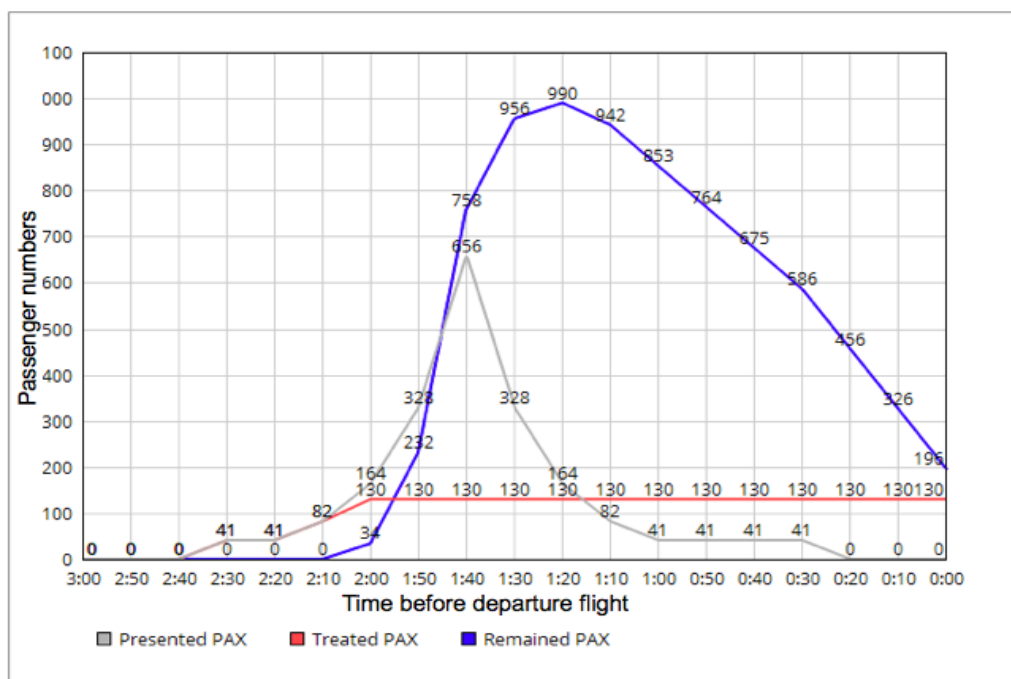


Figure IV.14: Evolution du temps d'attente dans le cas de 26 guichets

La ligne grise représente le nombre de passagers arrivant au comptoir d'enregistrement. Le point culminant de la présentation des passagers se produit 1h40 avant le départ avec 656 personnes.

La ligne rouge représente le nombre de passagers qui sont traités à temps. Avec seulement 26 comptoirs d'enregistrement ouverts, il n'est pas possible de dépasser un maximum de 130 passagers traités dans un intervalle de 10 minutes. Cela limite la capacité et crée une attente à l'arrivée des passagers.

La ligne bleue représente les passagers restant dans la file d'attente. Un point haut dans le nombre total de passagers restants peut être observé 1 heure 20 minutes avant le départ du vol avec 990 passagers en attente.

On peut observer ici que le nombre cumulé de passagers ne peut être absorbé, car même après le départ, il y a encore des passagers en attente. La capacité à gérer le flux de passagers en partance a donc été dépassée. Le nombre limité de guichets d'enregistrement ouverts en raison des mesures de déviation n'a pas permis de traiter le flux

4.3.2.2 Cas de l'ouverture de 52 guichets

La Figure IV.15. montre l'évolution du temps d'attente pour une mesure de distance de 2m dans le cas du deuxième scénario.

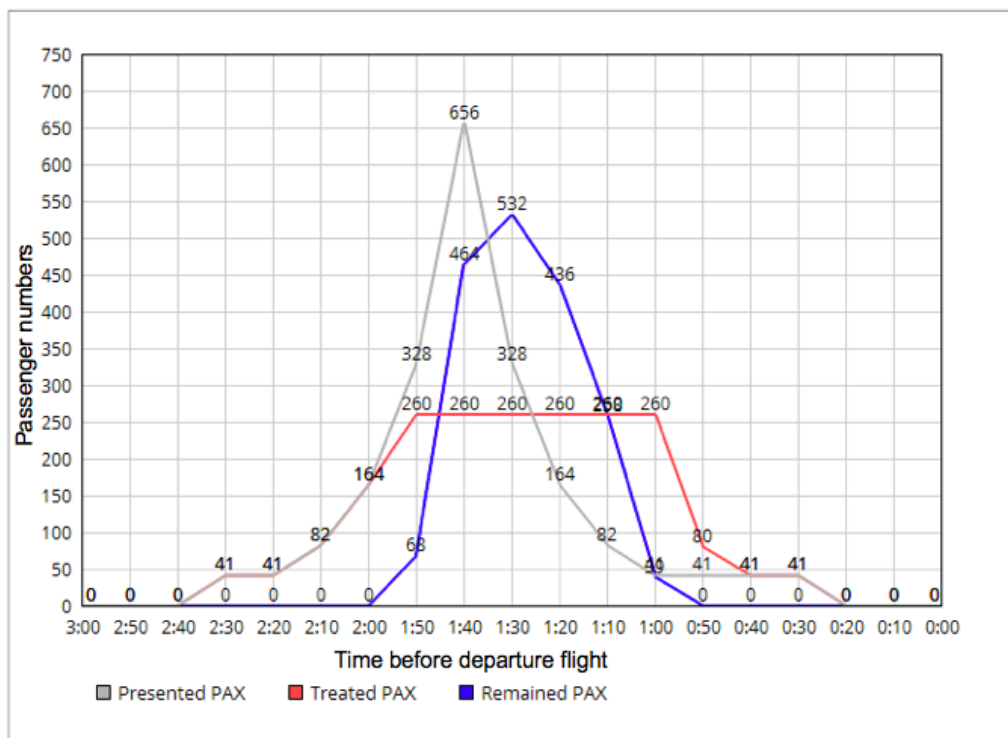


Figure IV.15: Evolution du temps d'attente dans le cas de 52 guichets

La ligne grise représente le nombre de passagers se présentant au comptoir d'enregistrement. Le point culminant de la présentation des passagers se produit 1h40 avant le départ avec 656 personnes.

La ligne rouge représente le nombre de passagers qui sont traités à temps. Avec seulement 52 comptoirs d'enregistrement ouverts, il n'est pas possible de dépasser un maximum de 260 passagers traités dans un intervalle de 10 minutes. Cela limite la capacité et crée une attente à l'arrivée des passagers.

La ligne bleue représente les passagers restant dans la file d'attente. Un point culminant dans le nombre total de passagers restants peut être observé 1,5 heure avant le départ du vol avec 532 passagers en attente.

On constate ici que le nombre total de passagers a été absorbé. En effet, 30 minutes avant le départ, il n'y a plus de passagers dans la file d'attente. Il y a donc eu une bonne gestion de la capacité à traiter le flux de passagers en partance. Le nombre plus élevé de comptoirs d'enregistrement a permis de traiter le flux.

4.4. Limites d'utilisation

Le programme de simulation fournit une représentation assez précise du flux de passagers. Il fournit des informations sur la file d'attente, la gestion des comptoirs d'enregistrement, donne le temps d'attente et le nombre de passagers restants. Il est également conforme aux mesures IATA pour le traitement des passagers.

Cependant, malgré son efficacité, le programme de simulation présente des limites dans son utilisation.

La surface des comptoirs d'enregistrement n'est pas allouée en fonction de la répartition des vols. Cela signifie que les vols sont traités uniformément sans distinction. Les passagers sont traités pour tous les vols ensemble et on suppose que le traitement est homogène.

De plus, le tableau IATA distribuant le volume d'espace par passager étant très étendu, la simulation a été réalisée pour un paramètre particulier présent à l'enregistrement et non en fonction de tous les paramètres.

De même, le calcul de la surface du hall d'enregistrement est fait selon les normes de la DGAC et non avec un calcul réel effectué au sein du terminal en question.

Les personnes à mobilité réduite et les personnes assistées ne sont pas incluses dans la simulation. On a considéré qu'elles passaient par une voie distincte qui leur était spécifiquement affectée.

De même, le temps nécessaire à la réalisation d'éventuelles mesures sanitaires supplémentaires avant la zone d'enregistrement n'est pas pris en compte dans le calcul.

Les modèles de simulation utilisés sont stochastiques et dynamiques. Ils représentent une approximation proche du système réel et intègrent la plupart de ses principales caractéristiques. L'analyse des résultats obtenus atteste de la bonne utilisation de la solution de gestion des flux de passagers proposée. En période de crise sanitaire, l'outil de paramétrage permet d'assurer l'application des distances requises tout en anticipant la saturation de la zone d'enregistrement. Cependant, son utilisation reste non exhaustive et limitée à une étude de cas relative au terminal T1, où le traitement des vols est considéré comme uniforme, car il est dédié exclusivement à la compagnie aérienne nationale. Cependant, cela ne s'applique pas nécessairement aux autres terminaux.

5. Conclusion

Alors que cette étude révèle les faiblesses de la gestion traditionnelle des flux de passagers et souligne la nécessité d'un système de gestion totalement intégré pour répondre aux exigences de qualité de service, l'outil proposé permettra de devancer les événements imprévus, en évitant les goulots d'étranglement et les longs temps d'attente, tout en garantissant le maintien des mesures sanitaires telles que la distanciation sociale pendant une crise sanitaire internationale. En outre, cette recherche pourrait également être étendue à d'autres zones de l'aéroport confrontées à des défis similaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse a eu pour objectif premier de participer au développement des techniques de gestion des flux d'avions et de passagers au sein des plateformes aéroportuaires.

Cette étude a couvert tant le niveau de la planifications des activités qu'au niveau de leurs mise en place.

Une fois choisi le thème de cette étude, il a fallu faire fi des nombreuses études déjà réalisées dans les domaines de l'aéroportuaire et de l'intelligence artificielle et du peu d'éléments détaillés pouvant étayer une recherche plus approfondie.

Afin de mener à bien les recherches, il a fallu faire preuve d'inventivité et d'originalité. Tâche compliquée au vu du nombres d'études préliminaires et aussi des nombreuses contraintes liées à l'environnement de recherche et à la possibilité d'appliquer les systèmes pensés au domaine aéroportuaire.

Nous avons donc retenu une démarche scientifique basée sur l'analyse de la problématique de base, de ses applications possible au domaine choisi, et des principaux problèmes liés à la prise de décision qu'il fallait traiter.

L'étude de l'état de l'art et sa comparaison avec les conditions d'applicabilité a alors permis dans plusieurs cas de dégager une approche originale.

De ce fait, la notion de capacité aéroportuaire a été revue en introduisant une troisième composante qui est la gestion du trafic au sol. Cela a permis de réévaluer la notion de capacité tant sur un plan pratique que théorique.

De plus la prise en compte du flux de trafic au sol, et des situations que cela engendre (retard, saturation, ...) qui se répercutent également sur la gestion du flux des passagers , a permis de proposer une approche originale, de caractère adaptatif, pour le choix des itinéraires suivis par les aéronefs sur les voies de circulation d'une plate-forme aéroportuaire. (surtout dans un contexte de pandémie tel que de Covid-19)

1. Limitations

Il est évident que ce travail ne reste qu'une proposition parmi tant d'autres, il y a encore beaucoup à faire dans le domaine tant pour l'évaluation que pour la mise en œuvre en coopération avec les autres systèmes en place.

Nous avons ici tenté d'élargir le champ de réflexion quant à la gestion du trafic au sol et à la prise de décision qui sont largement caractérisées par un souci d'applicabilité et pour lesquelles de riches perspectives, sur le plan scientifique comme sur le plan technique, peuvent être attendues.

2. Perspectives

De toute l'histoire de l'humanité, l'accès aux capitaux, à la technologie et à la connaissance n'ont jamais été aussi massifs. C'est ainsi que nous avons vécu, ces cinquante dernières années, la plus formidable accélération que notre humanité n'ait jamais vécue. Et l'intelligence artificielle constituera, sans aucun doute, le moteur d'une accélération encore plus importante.

Si l'intelligence artificielle continue de questionner, son utilisation a d'ores et déjà commencée. Permettant tour à tour d'augmenter la productivité, de diminuer des coûts, d'apporter un niveau de service élevé, l'intelligence artificielle présente de nombreux cas d'usage, riches et variés.

Nous travaillons actuellement sur divers projets :

- Prévision de l'impact de la météo sur la capacité des aéroports
- Smart Airport intelligent à l'aide des capteurs de mouvements
- Etude des stratégies de priorisation

REFERENCES

Chapitre II

- [1] A. Lieder, D. Briskorn, and R. Stolletz, “A dynamic programming approach for the aircraft landing problem with aircraft classes,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 243, no. 1, pp. 61–69, May 2015.
- [2] G. Gupta, W. Malik, and Y. Jung, “A Mixed Integer Linear Program for Airport Departure Scheduling,” in 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Hilton Head, South Carolina, 2009.
- [3] J. Montoya, Z. Wood, S. Rathinam, and W. Malik, “A Mixed Integer Linear Program for Solving a Multiple Route Taxi Scheduling Problem,” in AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2010.
- [4] L. Cook, S. Atkins, and Y. Jung, “Improved Prediction of Gate Departure Times Using Pre-Departure Events,” in The 26th Congress of ICAS and 8th AIAA ATIO, Anchorage, Alaska, 2008.
- [5] G. Zhu, C. Matthews, P. Wei, M. Lorch, and S. Chakravarty, “En Route Flight Time Prediction Under Convective Weather Events,” in 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, Georgia, 2018.
- [6] D. Spies, J.-H. You, and R. Hayward, “Mutex Graphs and Multicliques: Reducing Grounding Size for Planning,” *Electron. Proc. Theor. Comput. Sci.*, vol. 306, pp. 140–153, Sep. 2019.
- [7] P. J. Godbole, A. G. Ranade, and R. S. Pant, “Branch-and-Bound Global-Search Algorithm for Aircraft Ground Movement Optimization,” *J. Aerosp. Inf. Syst.*, vol. 14, no. 6, pp. 316–326, 2017.
- [8] A. Salehipour and M. M. Ahmadian, “Heuristics for Flights Arrival Scheduling at Airports,” *SSRN Electron. J.*, 2019.
- [9] F. Li, J.-B. Sheu, and Z.-Y. Gao, “Deadlock analysis, prevention and train optimal travel mechanism in single-track railway system,” *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 68, pp. 385–414, Oct. 2014.
- [10] B. Park, H. Lee, S. Y. Kang, and H. Lee, “Airport Surface Movement Scheduling with Route Assignment Using First-Come First Served Approach,” in 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Denver, Colorado, 2017.
- [11] “Part 3 AERODROME (AD).” [Online]. Available: <http://siamaroc.onda.ma/eAIP/AD/index.htm>.
- [12] Y. Dabachine, B. Bouikhalene, and A. Balouki, “Bidirectional Search Algorithm for Airport Ground Movement,” in 2018 International Arab Conference on Information Technology (ACIT), Werdanye, Lebanon, 2018, pp. 1–9.
- [13] H. Taheri, A. E. Gennouni, and A. Lyhyaoui, “A METHODOLOGY FOR MULTIPLE OBJECT TRAJECTORY PREDICTION IN AIRPORT ENVIRONMENT,” *J. Theor. Appl. Inf. Technol.*, vol. 97, no. 13, p. 12, 2005.
- [14] B. Park et al., “Comparison of First-Come First-Served and Optimization Based Scheduling Algorithms for Integrated Departure and Arrival Management,” in 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Atlanta, Georgia, 2018.
- [15] A. Awasthi, O. Kramer, and J. Lassig, “Aircraft Landing Problem: An Efficient Algorithm for a Given Landing Sequence,” in 2013 IEEE 16th International Conference on Computational Science and Engineering, Sydney, Australia, 2013, pp. 20–27.

- [16] C. Nithyanandam and D. G. Mohankumar, "STUDY OF A REAL TIME AIRCRAFT LANDING SCHEDULE WITH AN ATTEMPT TO OPTIMIZE THE SAME USING NON TRADITIONAL ALGORITHMS," J. Theor. Appl. Inf. Technol., vol. 65, no. 3, p. 9, 2005.

Chapitre III

- [1] J.B. Gotteland and N. Durand. Genetic algorithms applied to airport ground traffic optimization [C]. In Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, Canberra, Australia, vol. 1, 2003.
- [2] Jianli Ding, Xinru Wang, Tao Xu. Hybrid particle swarm algorithm for flight delay recovery [J]. Journal of transportation engineering. 2008,02:90-95.
- [3] R. Deau, « Optimisation des séquences de pistes et des mouvements au sol sur les grands aéroports », PhDThesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2010.
- [4] « Service de l'Information Aéronautique du Maroc ». [En ligne]. Disponible sur: <http://siamaroc.onda.ma/>.
- [5] Rapport ONDA Piste parallèles Med V
- [6] B. Pesic, « Optimisation de la circulation des aéronefs au sol », Rapp. De, 2000
- [7] Barnhart C., Bertsimas D., Constantine Caramanis, Fearing D., Equitable and Efficient Coordination in Traffic Flow Management, Transportation Science, 2012.
- [8] Bertsimas D. and Gupta S., Fairness and Collaboration in Network Air Traffic Flow Management: An Optimization Approach, Transportation Science, 2016.
- [9] Cicero R. F. de Almeida, Li Weigang, Giovani V. Meinerz, Leihong Li, Satisficing Game Approach to Collaborative Decision Making Including Airport Management, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016.
- [10] Hao C., Yi W., Zhan W., Research on the MOIPSO Model for Collaborative Capability-flow Allocation in Multi-airports Terminal Area, Procedia Engineering, 2015.
- [11] "S. Lee, K. Jung, B. Hwang, and W. Jung, 'Modified bidirectional A* algorithm for optimal car route guidance search,' in Autumn Conference of Korean Society for Internet Information, Seoul: Korea, pp. 44-45, 2002."
- [12] E. W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. NumerischeMathematik, 1:269–271, 1959.
- [13] S. Sawlani, "Explaining the Performance of Bidirectional Dijkstra and A* on Road Networks," p. 59.
- [14] " S. H. Ok, J. H. Ahn, S. Kang, and B. Moon, 'A combined heuristic algorithm for preference-based shortest path search', The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 47, No. 8, pp. 74-87, Aug. 2010."

Chapitre IV

- [1] Eurocontrol, "covid19-eurocontrol-comprehensive-air-traffic-assessment-07052020," Eurocontrol, May 2020.
- [2] Eurocontrol, "covid19-eurocontrol-comprehensive-air-traffic-assessment-25052020," Eurocontrol, May 2020.
- [3] M. U. G. Kraemer et al., "The effect of human mobility and control measures on the COVID-19 epidemic in China," Science, vol. 368, no. 6490, pp. 493–497, May 2020, doi: 10.1126/science.abb4218.

- [4] W. Guan et al., “Clinical Characteristics of Coronavirus Disease 2019 in China,” *New England Journal of Medicine*, vol. 382, no. 18, pp. 1708–1720, Apr. 2020, doi: 10.1056/NEJMoa2002032.
- [5] M. N. Postorino, L. Mantecchini, C. Malandri, and F. Paganelli, “A methodological framework to evaluate the impact of disruptions on airport turnaround operations: A case study,” *Case Studies on Transport Policy*, vol. 8, no. 2, pp. 429–439, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.cstp.2020.03.007.
- [6] G. Pullano, F. Pinotti, E. Valdano, P.-Y. Boëlle, C. Poletto, and V. Colizza, “Novel coronavirus (2019-nCoV) early-stage importation risk to Europe, January 2020,” *Eurosurveillance*, vol. 25, no. 4, Jan. 2020, doi: 10.2807/1560-7917.ES.2020.25.4.2000057.
- [7] ICAO, “Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis,” Air Transport Bureau, Montréal, Canada, May 2020.
- [8] ACI, “Guide to Airport Performance Measures,” Airports council international, Montreal Canada, Feb. 2012.
- [9] IATA, “COVID-19 Puts Over Half of 2020 Passenger Revenues at Risk,” Apr. 14, 2020. .
- [10] A. M. V. ONDA, “Visite du nouveau Terminal 1 de l’aéroport Mohammed V au profit de la presse nationale,” OFFICE NATIONAL DES AEROPORTS, CASABLANCA, MAROC, 2019.
- [11] World Health Organization, “Management of ill travellers at points of entry – international airports, ports and ground crossings – in the context of the COVID-19 outbreak.” World Health Organization, Feb. 16, 2020.
- [12] World Health organization, “Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation Report – 82,” World Health organization, Apr. 2020.
- [13] J.-W. Park and J. Se-Yeon, “Transfer Passengers’ Perceptions of Airport Service Quality: A Case Study of Incheon International Airport,” *International Business Research*, vol. 4, no. 3, Jun. 2011, doi: 10.5539/ibr.v4n3p75.
- [14] M. B. Kağan Albayrak, İ. Ç. Özcan, R. Can, and F. Dobruszkes, “The determinants of air passenger traffic at Turkish airports,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 86, p. 101818, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101818.
- [15] G. C. L. Bezerra and C. F. Gomes, “Antecedents and consequences of passenger satisfaction with the airport,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 83, p. 101766, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101766.
- [16] C.-H. Yeh and Y.-L. Kuo, “Evaluating passenger services of Asia-Pacific international airports,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 39, no. 1, pp. 35–48, Jan. 2003, doi: 10.1016/S1366-5545(02)00017-0.
- [17] G. C. L. Bezerra and C. F. Gomes, “Antecedents and consequences of passenger satisfaction with the airport,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 83, p. 101766, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101766.
- [18] IATA, International Air Transport Association (IATA), 1989, *Airport Terminal Reference Manual*, Seventh Edition, Montreal, Canada., 9th ed. International Air Transport Association.
- [19] Guilhem PiAT, Frédéric FuSo, *Capacité des aéroports passagers - Guide technique*, TAC/SinA groupe Documentation et diffusion des connaissances (DDC). France, Paris: service technique de l’Aviation civile, 2010.
- [20] C. Baumann, S. Hoadley, H. Hamin, and A. Nugraha, “Competitiveness vis-à-vis service quality as drivers of customer loyalty mediated by perceptions of regulation and stability in steady and volatile markets,” *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 36, pp. 62–74, May 2017, doi: 10.1016/j.jretconser.2016.12.005.
- [21] W.-L. Chang, H.-T. Liu, Y.-S. Wen, and T.-A. Lin, “Building an integrated model of future complaint intentions: The case of Taoyuan International Airport,” *Journal of Air Transport Management*, vol. 14, no. 2, pp. 70–74, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.jairtraman.2007.11.004.

- [22] M. Schultz, “Entwicklung eines individuenbasierten Modells zur Abbildung des Bewegungsverhaltens von Passagieren im Flughafenterminal,” Ph.D. thesis., Allemagne, 2010.
- [23] D. Helbing and P. Molnár, “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical Review E*, vol. 51, no. 5, pp. 4282–4286, May 1995, doi: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- [24] S. B. Young, “Evaluation of Pedestrian Walking Speeds in Airport Terminals,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1674, no. 1, pp. 20–26, Jan. 1999, doi: 10.3141/1674-03.
- [25] A. J. Raynor, C. J. Yi, B. Abernethy, and Q. J. Jong, “Are transitions in human gait determined by mechanical, kinetic or energetic factors?,” *Human Movement Science*, vol. 21, no. 5–6, pp. 785–805, Dec. 2002, doi: 10.1016/S0167-9457(02)00180-X.
- [26] W. Daamen and S. P. Hoogendoorn, “Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1828, no. 1, pp. 20–30, Jan. 2003, doi: 10.3141/1828-03.
- [27] D. Helbing, *Quantitative Sociodynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [28] D. Helbing, I. J. Farkas, and T. Vicsek, “Freezing by Heating in a Driven Mesoscopic System,” *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 6, pp. 1240–1243, Feb. 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.84.1240.
- [29] W. W. F. Klingsch, Ed., *Pedestrian and evacuation dynamics 2008*. Heidelberg ; New York: Springer, 2010.
- [30] D. Helbing, L. Buzna, A. Johansson, and T. Werner, “Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions,” *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp. 1–24, Feb. 2005, doi: 10.1287/trsc.1040.0108.
- [31] W. W. F. Klingsch, C. Rogsch, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg, Eds., *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [32] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, “Simulating dynamical features of escape panic,” *Nature*, vol. 407, no. 6803, pp. 487–490, Sep. 2000, doi: 10.1038/35035023.

RÉSUMÉ

L'aéroport est le seul endroit où les avions ont la possibilité de circuler. Il a donc sa propre structure adaptée. On y trouve différentes zones avec pour chacune sa fonction propre. De par sa structure, l'aéroport est régi par diverses contraintes opérationnelles telles que la vitesse de roulement, le respect de la distance entre deux avions au sol, ...

Une autre contrainte à prendre en compte est le fait qu'une piste ne peut être utilisée que par un seul appareil à la fois, un séquençement de piste devient alors nécessaire. Tout cela bien entendu dans un souci constant d'optimisation de chemin et de temps afin de toujours maintenir voire augmenter le flux.

L'objectif général de cette thèse est de concevoir et de développer un système de prédiction des données plus efficace dans le domaine aéronautique. Pour atteindre cet objectif, ce travail propose un système qui utilise l'intelligence artificielle. Ce travail a utilisé, comme base de recherche et de tests, des données réelles de l'Aéroport International de Casablanca Mohamed V au MAROC.

Cela amène donc à étudier la structure aéroportuaire dans sa globalité, les types de mouvement qui circulent dans les zones de trafic ou encore le chemin empruntés par les usagers. Cela a permis d'identifier les contraintes et défis à résoudre afin d'implémenter le système proposé.

L'objectif est ici de mettre en avant des méthodes qui permettent de résoudre les conflits en présentant le meilleur chemin optimal pour chaque appareil entre l'entrée ou la sortie de piste et son parking. D'une manière générale, tant pour la résolution de conflit au sol que pour le confort des passagers et la gestion des retards, il peut être plus intéressant d'augmenter le trajet suivi par deux appareils plutôt que de faire patienter un seul de ces deux avions sur une longue durée.

La notion de gestion du flux des passagers, notamment en temps de crise, comme nous avons pu le constater récemment avec la pandémie de Covid-19 est également abordée. La prédiction des mouvements dans une plateforme aéroportuaire n'est pas facile, mais pour réaliser le développement d'un outil réaliste c'est une nécessité.

Mots clés : Aéroport International de Casablanca Mohamed V, Théorie des graphes, Système d'information, Air traffic Management (ATM), Premier Arrivé Premier Servi (FCFS), Mouvement au sol, Organisation aéroportuaire, Flux des passagers, Covid-19