



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة

Ecole Nationale Supérieure des Technologies Avancées

Département : Génie Logistique Et Transport



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

D'Ingénieur d'état

-Filière-

Ingénierie des Transport

-Spécialité -

Ingénierie des Transports

- Thème-

Mise en place d'un outil d'aide à la décision face aux opérations irrégulières

Cas de Tassili Airlines

Réalisé par

BELALMI Maroua & HAMIDOUCHE Sara

Les membres de Jury :

TALBI Tayeb /MAA	Président
BADJARA Mohamed el Amine/MAA	Promoteur
BOUZID M.Cherif /MCA	Examineur
AGGUINI Chafik /MAB	Examineur

Alger, le 01/07/2024

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

En tout premier lieu, on remercie le bon dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à **M.BADJARA Mohamed el Amine** de nous avoir encadré dans notre projet de fin d'étude et sa patience et le temps qu'il nous a consacré.*

*Nos sincères remerciements à notre encadrant au sein de Tassili Airlines, **M.SAIDI Amine** qui nous a ouvert ses portes et veillé à ce que notre travail se déroule dans les meilleures conditions.*

*Nos remerciements s'adressent également à **M. BENAZZOUZ Said** représentant de Tassili Travail Aérien pour sa générosité, son aide et son encouragement dont il a su faire preuve malgré sa charge de travail.*

*On remercie également **M.BAAZIZ Adlane** et tous les employés de Tassili Airlines qui m'ont beaucoup aidé pour réaliser ce travail.*

Merci à la PAF de l'aéroport d'Alger pour leurs accueils.

Un grand remerciement à tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter et de juger notre travail. Et enfin, nous remercions du fond du cœur toute personne ayant contribué à ce travail.

Merci

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours été présents à mes côtés pour me soutenir et m'encourager tout au long de mon parcours, merci pour votre amour inconditionnel et vos précieux conseils.

A ma sœur, mon frère et à toute la famille

A mon encadrant M.BADJARA

A la famille AIESEC dans le monde

A mon binôme et ma sœur Sara

A tous mes chers amis Aux enfants Martyrs de Gaza

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Marwa

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Mes parents qui ont été mes plus grands soutiens tout au long de ma vie et de
mes Études.*

*Votre amour inconditionnel, vos encouragements incessants et votre confiance
en moi ont été les piliers de ma réussite.*

*À ma sœur Zahra, Je me considère extrêmement chanceuse d'avoir une sœur
comme toi, sur qui je peux toujours compter. Ton soutien, tes encouragements
m'ont été inestimables, et je suis tellement fière de toi. Je te remercie
sincèrement pour tout ce que tu as fait pour moi.*

À Mon Encadrant M Badjara Mohamed El Amine

A mon chère binôme : Belalmi Maroua

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Sara

<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i>	<i>V</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>VI</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>VIII</i>
<i>LISTE DES PSEUDO-CODE</i>	<i>IX</i>
<i>TERMINOLOGIE</i>	<i>X</i>
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
<i>CHAPITRE 1 : COMPAGNIE ET CAS D'ETUDE</i>	<i>3</i>
<i>I. INTRODUCTION</i>	<i>4</i>
<i>II. PRESENTATION DE LA COMPAGNIE AERIENNE TASSILI AIRLINES</i>	<i>4</i>
<i>II.1 Définition</i> :.....	<i>4</i>
<i>II.2 Historique</i> :	<i>4</i>
<i>II.3 Activités et prestations de la compagnie</i> :.....	<i>5</i>
<i>II.4 La Flotte</i> :.....	<i>5</i>
<i>II.5 Réseaux et Destinations</i>	<i>6</i>
<i>II.5.1 Réseau régulier international et domestique</i>	<i>6</i>
<i>II.5.2 Réseau Charter navettes pétrolières</i>	<i>8</i>
<i>III. STRUCTURE DE L'ORGANISATION DE LA COMPAGNIE</i> :.....	<i>8</i>
<i>III.1 Organigramme générale</i>	<i>9</i>
<i>III.2 Organigramme de la direction d'exploitation sol</i>	<i>10</i>
<i>III.3 Missions de la direction d'exploitation sol</i> :.....	<i>11</i>
<i>IV. REALITE ET CONTRAINTES DE TASSILI AIRLINES</i>	<i>11</i>
<i>IV.1 Perturbation</i> :.....	<i>12</i>
<i>IV.1.1 Vol à la demande (vol spécial / irrégulier / imprévu)</i> :.....	<i>12</i>
<i>IV.1.2 Retard de vol</i> :.....	<i>13</i>
<i>IV.1.3 Annulation de vol</i> :	<i>13</i>
<i>IV.1.4 Vol reporté</i> :.....	<i>13</i>
<i>IV.2 Problématique</i>	<i>13</i>
<i>IV.3 La Gestion a Tassili Airlines</i> :.....	<i>14</i>
<i>IV.3.1 Slots et Gestion des vols imprévus</i> :.....	<i>14</i>
<i>IV.3.2 Ponctualité et Gestion des changements de la dernière minute</i> :	<i>14</i>
<i>IV.3.3 Suivie Journaliers de l'exploitation</i> :.....	<i>15</i>

Table des matières

IV.3.4 Analyse critique de la gestion actuelle :	16
V. CONCLUSION	18
CHAPITRE 2 : CONCEPTS ET OUTILS.....	19
I. INTRODUCTION.....	20
II. LA RECHERCHE OPERATIONNELLE :.....	20
II.1 Définition	20
III. LA MODELISATION MATHEMATIQUE :.....	20
IV. LA PROGRAMMATION MATHEMATIQUE :.....	21
V. NOTIONS D'OPTIMISATION	22
V.1 L'optimisation combinatoire :	22
V.2 L'optimisation multi objectif :	22
V.3 Notion de dominance	23
V.4 Points particuliers :.....	23
VI. METHODES DE RESOLUTION	24
VI.1 Les méthodes exactes	25
VI.2 Les méthodes approchées.....	26
VI.2.1 Les algorithmes évolutionnaires :(AE).....	27
VI.2.2 Les algorithmes génétiques.....	28
VI.2.3 L'algorithme génétique de tri par non-dominance NSGA-II.....	30
VI.2.4 Les opérateurs de variation de l'algorithme NSGA-II.....	31
VII. THEORIE DES GRAPHERS :.....	33
VII.1 Définition	33
VII.2 Graphes :.....	33
VII.3 Graphe d'intervalle :.....	34
VII.4 Propriétés :.....	34
VIII. CONCLUSION	35
CHAPITRE 3 : FORMULATION MATHEMATIQUE ET RESOLUTION DU PROBLEME.....	36
I. INTRODUCTION.....	37
II. MODELISATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME :.....	37
II.1 Notations et définitions.....	37
a. Notation des indices :.....	37
b. Notation des ensembles :.....	37
c. Notation des paramètres :	38
d. Définition de variable de décision :	38

Table des matières

e. Définition des Fonctions objectives :.....	38
f. Définition des contraintes :.....	38
II.2 Hypothèses :.....	39
III. OUTILS DE RESOLUTION :.....	40
III.1 Présentation de Python :.....	40
Caractéristiques du langage choisi :.....	40
III.1 Présentation de Pyomo :.....	40
III.3 Présentation de NumPy.....	41
III.4 Présentation de Tkinter :.....	41
III.5 Présentation de pandas:	42
III.6 Présentation de pillow:	42
III.7 Présentation de DEAP :.....	42
III.8 Présentation de Pycharm :.....	43
III.9 Présentation de LaTeX :.....	43
IV. LA RESOLUTION DU PROBLEME :.....	44
V. PRESENTATION DU LOGICIEL :.....	46
V.1 Un logiciel :.....	46
V.2 Fonctionnement de logiciel :.....	47
V.2.1 Fenêtre d'accueil :.....	47
V.2.2 Fenêtre d'identification :.....	48
V.2.3 Fenêtre d'opérations :.....	48
V.2.3.1 Importation des données :.....	51
VI. ADAPTATION DE L'ALGORITHME GENETIQUE AU PROBLEME :.....	53
VII. ADAPTATION DE L'ALGORITHME NSGA 2 AU PROBLEME :.....	54
VII.1 La première étape : Initialisation	54
VII.2 La deuxième étape : Exécution de l'algorithme NSGA-II.....	55
□ Evaluation de la population :.....	55
❖ Tri non dominé (Non-dominated Sorting) :.....	55
□ Calcul de Distance de Crowding :.....	56
❖ Sélection :.....	57
❖ Croisement et mutation :.....	58
❖ Formation de la nouvelle population :.....	60
❖ Selection pour la nouvelle génération :.....	61
VII.3 La troisième étape : Génération du fichier final.....	61
VIII. CONCLUSION :.....	62

CHAPITRE 4 : IMPLEMENTATION, RESULTATS ET RECOMMANDATIONS	63
I. INTRODUCTION	64
II. IMPLEMENTATION :.....	64
II.1 La déclaration sur python et la Construction du modèle par pyomo :	64
II.2 Implémentation du NSGA-II dans la bibliothèque DEAP :.....	69
III. ANALYSE DES RESULTATS :.....	70
III.1 Evaluation des fonctions objectives :.....	70
IV. COMPARAISON ENTRE LA COMPAGNIE VS FLIGHT-OPT :.....	75
V. AVANTAGES DU LOGICIEL OPT-FLIGHT :	77
Compagnie VS Flight-Opt :	78
VI. RECOMMANDATIONS	78
VII. CONCLUSION	80
CONCLUSION GENERALE	81
BIBLIOGRAPHIE	83
ANNEXES	87
RESUME	91

Liste des abréviations

AACO	Arab Air Carriers Organization
AFRAA	Association des Compagnies Aériennes Africaines
AIMS	Airline Information Management System
AOC	Air Operator's Certificate
ATE	Agent Technique d'Exploitation
ATS	Air Traffic Services
EVASAN	Evacuation Sanitaire
IATA	International Air Transport Association
MOEA	Multi-Objectif Evolutionnary Algorithm
MOSA	Multi-Objectif Simulated Annealing
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale
PN	Personnel Navigant
PSO	Particle Swarm Optimization
SGS	Système de Gestion de Sécurité
SPA	Société par Action
SV	Surveillance des Vols
TAL	Tassili Airlines
VIP	Very Important Person

Liste des figures

<i>Figure 1: Logo de Tassili Airlines</i>	<i>4</i>
<i>Figure 2: Boeing 737-800 de la compagnie Tassili Airlines</i>	<i>6</i>
<i>Figure 3: Organigramme d'ensemble de la Compagnie Aérienne Tassili Airlines.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 4: Organigramme Général de la Direction d'Exploitation sol.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 5: Logo Sonatrach.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 6: Premier vol de Tassili Airlines au départ d'El Oued Vers l'aéroport de Taibah à Médine 02/2024</i>	<i>12</i>
<i>Figure 7: Interface du logiciel AIMS.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 8: Evaluation des retards journaliers pour une semaine donnée.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 9: Graphique circulaire indiquant le pourcentage des personnes qui ont rencontrés un report de vol avec la compagnie.</i>	<i>17</i>
<i>Figure 10: Graphique circulaire indiquant le pourcentage d'impact des annulations sur les clients de la compagnie.</i>	<i>17</i>
<i>Figure 11: Schéma de procédure utilisée par la RO.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 12: Représentation d'un problème d'optimisation multi objectif.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 13: Représentation du front de pareto et des solutions non dominées pour un problème biobjectif de minimisation.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 14: Le point idéal et point nadir du front de Pareto dans le cas De minimisation de deux objectifs.</i>	<i>24</i>
<i>Figure 15 : Classification des méthodes de résolution</i>	<i>25</i>
<i>Figure 16: Fonctionnement du NSGA II (exemple 3 fronts admis)</i>	<i>29</i>
<i>Figure 17: Exemple d'un croisement en 1 point.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 18: Un graphe d'intervalles</i>	<i>35</i>
<i>Figure 19 : Formulation mathématique du problème</i>	<i>39</i>
<i>Figure 20: Logo Python</i>	<i>40</i>
<i>Figure 21: Logo Pyomo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 22: Logo NumPy.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 23: Logo Tkinter.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 24: Logo Pandas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 25: Logo Pillow.....</i>	<i>42</i>

<i>Figure 26: Logo DEAP</i>	43
<i>Figure 27: Logo Pycharm</i>	43
<i>Figure 28: Logo Latex</i>	43
<i>Figure 29: Fenêtre d'accueil</i>	47
<i>Figure 30: Fenêtre pour utilisateur</i>	48
<i>Figure 31: Fenêtre d'opération</i>	49
<i>Figure 32: Fichier Excel des vols imprévus</i>	49
<i>Figure 33: Fichier Excel des vols programmé</i>	50
<i>Figure 34 : Graphique des vols par saison de la compagnie Tassili Airlines durant l'année 2023</i>	51
<i>Figure 35 : Programme de vols</i>	52
<i>Figure 36: Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique</i>	53
<i>Figure 37: Exemple de codification des chromosomes</i>	54
<i>Figure 38 : Output Flight-Opt</i>	61
<i>Figure 39 : Fichier Excel des vols imprévus</i>	65
<i>Figure 40 :Fichier Excel des vols programmés</i>	65
<i>Figure 41: L'étape de sélection des fichiers Excel (.xlsx)</i>	66
<i>Figure 42:Exemple de transformation des données sur Pycharm</i>	67
<i>Figure 43:Vols /Matin</i>	71
<i>Figure 44: Vols /après-midi</i>	72
<i>Figure 45:Vols /soir</i>	72
<i>Figure 46 :Nombre de vols avant et après l'intégration des vols imprévus</i>	73
<i>Figure 47:Proportion de vols perturbés VS non perturbés</i>	74
<i>Figure 48 :Comparaison entre le nombre de vol avant et après l'intégration des vols imprévus pour une semaine donnée</i>	75
<i>Figure 49:Logo de TAL VS logo de logiciel Flight-Opt</i>	78
<i>Figure 50:Prototype Application mobile</i>	79

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: La flotte de Tassili Airlines</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2: Types des vols imprévus</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 3: Comparaison entre la modélisation mathématique et la Programmation mathématique</i>	<i>21</i>
<i>Tableau 4: 5 solutions d'une population initiale</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 5: Attribution des rangs</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 6: Calcul de distance de crowding pour les 5 solutions.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 7: Comparaison entre la solution de l'entreprise et la solution proposée</i>	<i>76</i>

Liste des Algorithmes

<i>Algo 1: Pseudo-code d'un algorithme génétique.....</i>	<i>28</i>
<i>Algo 2 : Pseudo-code de NSGA-II</i>	<i>30</i>
<i>Algo 3 :Pseudo-code de l'initialisation de la population</i>	<i>45</i>
<i>Algo 4 :Pseudo-code de l'évaluation de la population.....</i>	<i>55</i>
<i>Algo 5: Pseudo-code de la Sélection des parents par tournoi.....</i>	<i>57</i>
<i>Algo 6 :Pseudo-code de Croisement SBX.....</i>	<i>58</i>
<i>Algo 7:Pseudo-code de la Mutation polynomiale.....</i>	<i>60</i>
<i>Algo 8 :Pseudo-code de Sélection des individus pour la nouvelle génération</i>	<i>61</i>
<i>Algo 9 :Pseudo-code de transformation des données.....</i>	<i>66</i>

Terminologie

Un Vol : c'est l'élément unitaire et indivisible du programme, il est défini par une suite de données (selon que la période étudiée est une journée ou une semaine) : (Numéro de vol, Type d'avion, Jour de fonctionnement du vol, Escale de départ, Heure de départ, Heure d'arrivée, Escale d'arrivée)

La Flotte : C'est l'ensemble des aéronefs dont dispose la compagnie, elle est constituée de plusieurs types d'appareils exploitables selon le vol affecté.

Un programme de vols : c'est une prévision de mise en œuvre des moyens volants nécessaire pour satisfaire la demande de trafic pour une saison donnée.

Plus concrètement, un programme de vols contient l'ensemble des lignes que doit exploiter une compagnie aérienne en précisant pour chacune des fréquences, ses horaires et les types d'appareils exploités.

Vol domestique : Les passagers et les bagages ne quittent pas le territoire national, Ils ne sont soumis à aucune formalité de frontière, mais doivent subir un contrôle de sûreté contrairement aux vols internationaux.

Vol charter : la mise à disposition de l'avion pour le client (Un ou plusieurs) afin d'exécuter un vol ou plusieurs vols avec une capacité totale ou bien partiel (Bloc- sièges).

Vol régulier : Les vols effectués à jours fixes et à horaires fixes par une compagnie aérienne qui utilise soit ses propres appareils mis au service du grand public.

Service de la circulation aérienne (ATS) : Terme générique désignant à la fois le service du contrôle de la circulation aérienne, le service d'information de vol et le service d'alerte.

Agent Technique d'Exploitation (ATE) : est un professionnel au sein de la compagnie responsable de la gestion administrative et technique des aéronefs, y compris la mise à jour des immatriculations et la communication de changements aux services de la circulation aérienne.

Vol taxi : un court vol non programmé utilisé pour déplacer un avion, souvent à des fins de maintenance ou de repositionnement, sans transporter de passagers commerciaux.

Vol prise de vue : un vol de prise de vue désigne un vol effectué dans le but de capturer des images ou des vidéos aériennes, souvent utilisé pour la photographie, le cinéma, la cartographie ou la surveillance.

Vol de mise en place : est un vol destiné à repositionner un avion pour un vol ou un service régulier ou non régulier. Ces vols, souvent sans passagers, sont organisés pour des raisons logistiques.

Vol de convoyage : Un vol de convoyage est le transport d'un avion dans le seul but de changer l'emplacement de l'aéronef souvent entre des aéroports ou des bases aériennes en vue de leurs exploitations

Vol d'instruction : les vols d'instruction sont définis comme l'utilisation d'aéronefs pour l'instruction en vol avec un instructeur.

Vol d'essais : est un vol réalisé principalement dans le but de vérifier la contrôlabilité de l'avion dans les différentes manœuvres et conditions de vol, Ces vols sont réalisés par des pilotes qualifiés et sont souvent nécessaires avant qu'un avion puisse être certifié pour une utilisation commerciale ou militaire.

Vol compte SONELGAZ : Les vols de compte Sonelgaz désignent les vols spéciaux opérés par la compagnie aérienne Tassili Airlines pour le compte de Sonelgaz. Ces vols sont généralement effectués pour répondre aux besoins de déplacement de personnel ou de transport de matériel liés aux activités de la société.

Un slot aéroportuaire : (ou « créneau ») est une autorisation accordée par un coordinateur pour une opération planifiée d'utiliser la gamme complète des infrastructures aéroportuaires nécessaires pour arriver ou partir d'un aéroport à une date et une heure spécifiques.

Introduction Générale

Le secteur aéronautique qui se caractérise par une concurrence intense tout en ayant comme défis les exigences de qualité, de sécurité et de ponctualité surtout, doit maintenir ses parts du marché mondial, car ce dernier revêt une importance primordiale non seulement en terme de développement de l'économie mondiale et le développement des sociétés mais également il fait appel à des technologies très avancées et performantes, mais aussi aux facilités et autres avantages offerts aux opérateurs.

Les compagnies aériennes ont dès lors tout avantage à avoir en leurs dispositions les meilleurs outils d'aide à la décision ainsi que les meilleurs algorithmes de résolution afin de rester compétitifs. Tassili Airlines, l'opérateur du transport public domestique et international, de passagers et de marchandises depuis 2011 contribue à assainir l'industrie du transport aérien en Algérie, mais aussi de s'affirmer à l'étranger. Elle a plus que jamais décidé de rester dans la course, de préserver et d'améliorer son marché. C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés à Tassili Airlines et que nous avons choisi le thème suivant : Mise en place d'un outil d'aide à la décision face aux opérations irrégulières.

En effet, cette compagnie fait face à divers imprévus qui ont un impact considérable sur l'ensemble des activités opérationnelles et des ressources impliquées tels que les fluctuations de la demande, les conditions météorologiques imprévisibles, les pannes techniques...etc. C'est pour ces raisons que la planification optimale de son programme de vols est devenue indispensable.

Pour ce faire, on va procéder à la recherche opérationnelle (aussi appelée aide à la décision), qui peut être définie comme l'ensemble des méthodes techniques rationnelles d'analyse et de synthèse des phénomènes d'organisation utilisables pour élaborer de meilleures décisions. Elle propose des modèles conceptuels pour analyser des situations complexes qui permettent aux décideurs de faire les choix les plus efficaces, et aussi elle peut aider le décideur lorsque celui-ci est confronté à un problème combinatoire, aléatoire ou concurrentiel.

De tout ce qui précède notre problématique consiste à savoir comment reprogrammer les vols en intégrant la nouvelle demande avec le moins de perturbations possible afin de permettre à la compagnie de reprendre ses opérations prévues ?

Pour répondre à cette question, on structure notre travail de la manière suivante :

Le 1er chapitre sera consacré à la présentation de la compagnie Tassili Airlines et les contraintes auxquels elles sont confrontés.

Le 2ème chapitre portera sur les méthodes de résolution d'optimisation combinatoire que nous avons utilisées dans notre recherche.

Le 3ème chapitre sera consacré à la modélisation mathématique de notre problématique, on donne un aperçu sur les outils de résolution et on présente le logiciel mis en place.

Le 4ème chapitre portera sur l'implémentation de nos solutions, les résultats trouvés et les recommandations proposées.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et la liste des références bibliographiques qui nous ont permis d'élaborer ce travail.

Chapitre 1

Compagnie et cas d'étude

I. Introduction

Tout au long de ce premier chapitre "Compagnie et cas d'étude" nous aborderons l'état des lieux de notre stage, nous présenterons ce que nous avons découvert au sein de la compagnie aérienne, en commençant par la présentation de sa structure organisationnelle ainsi que ses ressources. Nous spécifions également les services qu'elle propose à ses clients tels que les types de vols, les avions exploités...etc.

La 2eme partie vient pour vous présenter le projet sur lequel nous avons travaillé, les données qu'on possède et les différentes contraintes et restrictions qui régissent le problème. Par la suite, on va exposer un aperçu général sur la solution qu'on propose, ses avantages par rapport à la réalité de la compagnie

II. Présentation de la compagnie aérienne Tassili Airlines

II.1 Définition :

Tassili Airlines est une compagnie aérienne algérienne filiale de la compagnie pétrolière Sonatrach, elle assure historiquement des vols réguliers domestiques et le transport des ouvriers vers les gisements de pétrole et de gaz du Sahara algérien. Son hub principal est l'aéroport d'Alger, depuis octobre 2001, Tassili propose une offre voyageurs pour le grand public, son siège social se situe à Alger. De plus, Tassili est membre des organisations internationales IARA, AACO, AFRAA et TIACA [1]



Figure 1: Logo de Tassili Airlines

(Source : <https://www.tassiliairlines.dz/web/>)

II.2 Historique :

Tassili Airlines a été créée le 4 mars 1998 et a entamé ses opérations aériennes en avril 1999. À ses débuts, la compagnie était une coentreprise entre Air Algérie et Sonatrach, mais en

2005, elle est devenue une filiale à part entière de Sonatrach suite au rachat des parts détenues par Air Algérie. Cette acquisition a entraîné une restructuration de Tassili Airlines en un groupe comportant trois filiales distinctes : Naftal Tassili Air, chargée du transport des Travailleurs du secteur à partir des gisements d'hydrocarbures ; Tassili Airlines, responsable du transport public national et international de passagers et de marchandises, et Tassili Travail Aérien (TTA), une filiale spécialisée dans le travail aérien.

En octobre 2010, un accord a été conclu avec le ministère de la Santé algérien pour fournir des équipages et des avions en mesure d'effectuer des évacuations sanitaires depuis le sud du pays vers les hôpitaux du nord, afin de prendre en charge des cas graves tels que le cancer et les blessures graves. Le 28 septembre 2011, Tassili Airlines a reçu l'autorisation du ministère des Transports pour effectuer des vols commerciaux grand public. Le 4 octobre 2011, la compagnie a réceptionné son quatrième Boeing 737-800 et a ouvert sa première agence commerciale à l'aéroport d'Alger. Depuis novembre 2011, Tassili Airlines détient le label international de qualité IOSA délivré par l'Association internationale du transport aérien (IATA). Le 28 septembre 2012, la compagnie a inauguré son premier vol international à destination de Saint-Étienne et Grenoble, en France. [1]

II.3 Activités et prestations de la compagnie :

Les différentes activités aériennes de la compagnie Tassili Airlines comprennent l'exploitation des lignes aériennes intérieures et internationales pour assurer le transport régulier et non régulier de passagers, de bagages, de fret et de courriers. En plus des vols commerciaux, la compagnie offre des services de prise de vues photographiques ou cinématographiques, d'exécution de relevés géophysiques et topographiques, de pulvérisation agricole, d'assistance éducative et scientifique, et des missions publicitaires. Elle effectue également les vols à la demande, les évacuations sanitaires, le transport de délégations du secteur des hydrocarbures, ainsi que la surveillance hélicoptérée des installations industrielles. [2]

II.4 La Flotte :

Tassili Airlines possède aujourd'hui, en toute propriété, une flotte d'aéronefs de divers types qui lui permet de répondre, de façon adaptée, à la demande du marché aérien en Algérie. Elle est

composée de 15 aéronefs dont la capacité va de 37 à 155 sièges.



Figure 2: Boeing 737-800 de la compagnie Tassili Airlines

(Source : <https://www.algerie.flights>)

Tableau 1: La flotte de Tassili Airlines

(Source : [2])

Type d'appareil	Boeing 737-800	Dash8-Q400	Dash8-Q200
	7T-VCA	7T-VCL	7T-VCP
	7T-VCB	7T-VCM	7T-VCQ
	7T-VCC	7T-VCN	7T-VCR
	7T-VCD	7T-VCO	7T-VCS
	7T-VCE	/	/
	7T-VCF	/	/
	7T-VCG	/	/

II.5 Réseaux et Destinations

II.5.1 Réseau régulier international et domestique

Tassili Airlines dessert 29 destinations dont 26 destinations domestiques (Base pétrolière et gisement de gaz inclus) et 3 internationales.

❖ Algérie

- * **Adrar** - Aéroport d'Adrar -Touat -Cheikh Sidi Mohamed Belkebir
- * **Hassi R'Mel** - Aéroport d'Hassi R'Mel - Tiltrhemt
- * **Alger** -Aéroport d'Alger Houari Boumédiène (Base)
- * **Illizi**- Aéroport d'Illizi - Takhamalt
- * **Annaba** - Aéroport d'Annaba- Rabah Bitat
- * **In Aménas** - Aéroport de Zarzaïtine - In Amenas
- * **Batna** -Aéroport de Batna -Mostepha Ben Boulaid
- * **In Salah** - Aéroport d'In Salah
- * **Béjaïa** -Aéroport de Béjaïa Soummam- Abane Ramdane
- * **Laghouat** -Aéroport de Laghouat - Moulay Ahmed Medeghri
- * **Béchar** -Aéroport de Béchar -Boudghene Ben Ali Lotfi
- * **Oran** - Aéroport d'Oran - Ahmed Ben Bella
- * **Biskra** - Aéroport de Biskra -Mohamed Khider
- * **Ouargla** - Aéroport d'Ouargla - Aïn Beida
- * **Constantine** -Aéroport de Constantine - Mohamed Boudiaf
- * **Sétif** - Aéroport de Sétif - 08 mai 1945
- * **Djanet** - Aéroport de Djanet Tiska
- * **Tamanrasset** -Aéroport de Tamanrasset - Aguenar-Hadj Bey Akhamok
- * **El Oued** - Aéroport d'El Oued – Guemar
- * **Tiaret** -Aéroport de Tiaret -Abdelhafid Boussouf Bou Chekif
- * **El Bayadh** - Aéroport d'El Bayadh
- * **Tindouf** - Aéroport de Tindouf
- * **Ghardaïa** -Aéroport de Ghardaïa - Noumérat- Moufdi Zakaria
- * **Tlemcen** - Aéroport de Tlemcen -Zenata - Messali El Hadj
- * **Hassi Messaoud** -Aéroport d'Hassi Messaoud Oued Irara Krim Belkacem (Base)
- * **Touggourt** - Aéroport de Touggourt -Sidi Mahdi

✦ France :

- Nantes - Aéroport de Nantes Atlantique
- Strasbourg - Aéroport de Strasbourg - Entzheim
- Paris - Aéroport de Paris – Orly

III.5.2 Réseau Charter navettes pétrolières

TAL a mis à disposition de ses clients pétroliers des vols charters navettes, où l'une d'entre elles est quotidienne et les deux autres hebdomadaires, ces dernières sont réparties comme suit :

- Navette quotidienne sur la ligne : ALG-HME-ALG
- Navette hebdomadaire sur la ligne : ALG-ORN-IAM-ORM-ALG
- Navette hebdomadaire sur la ligne : CZL-TGR-IAM-TGR-CZL [1]

III. Structure de l'organisation de la compagnie :

Pour mener à bien sa mission et fournir une bonne dynamique adaptée à ses préoccupations et à ses activités de transport aérien, la compagnie s'est organisée selon l'organigramme suivant :

III.1 Organigramme générale

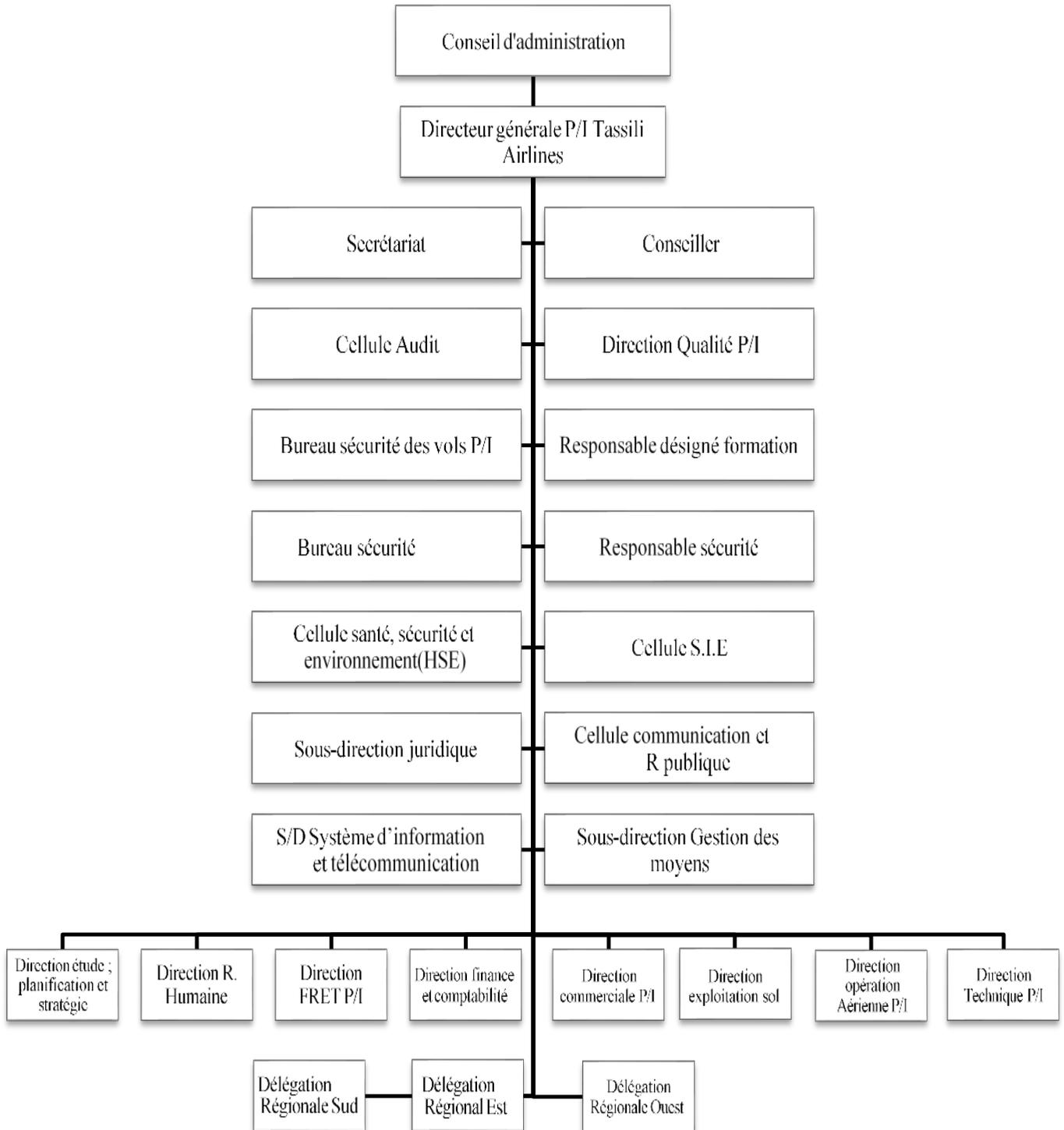


Figure 3: Organigramme d'ensemble de la Compagnie Aérienne Tassili Airlines

(Source :[2])

III.2 Organigramme de la direction d'exploitation sol

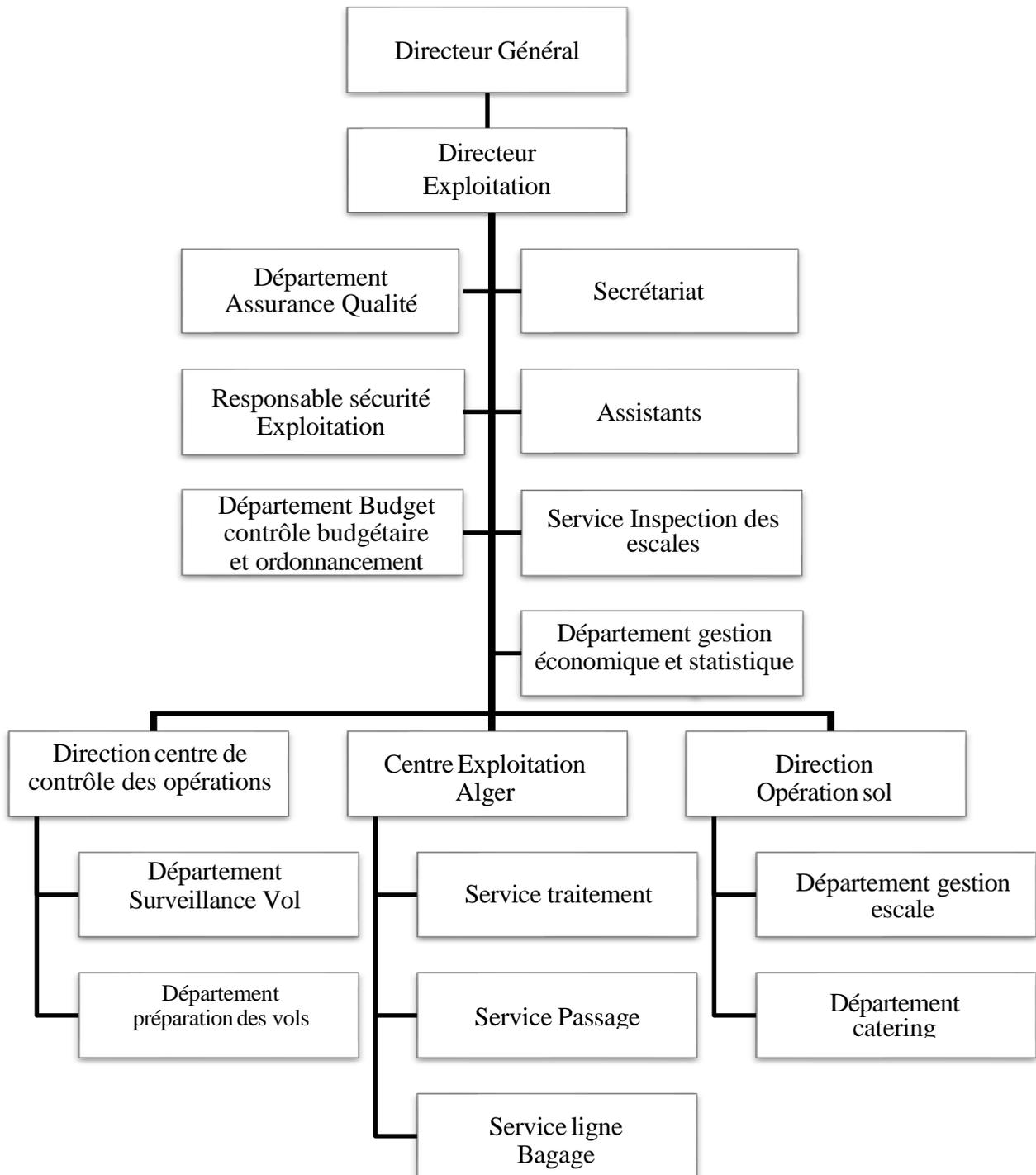


Figure 4: Organigramme Général de la Direction d'Exploitation sol

(Source :[2])

III.3 Missions de la direction d'exploitation sol :

Le directeur Exploitation sol est responsable de l'exécution du programme d'exploitation de la Compagnie dans les conditions de sécurité, de régularité, de qualité et de rentabilité économique conformément à la réglementation aéronautique nationale et internationale et aux procédures de la Compagnie, Il supervise la gestion des risques de sécurité et des menaces de sûreté au sol, veillant à ce que les opérations au sol respectent les restrictions réglementaires et les normes de la compagnie, Il coordonne les activités liées à la préparation, l'exécution, le suivi et le contrôle des vols programmés, il Met en œuvre les actions préventives et correctives relevant de la Direction Exploitation Sol .De plus, il fournit les ressources nécessaires pour le fonctionnement du Système de Gestion de la Sécurité (SGS), notamment pour la gestion des risques.[2]

IV. Réalité et contraintes de Tassili Airlines

Comme mentionné précédemment, Tassili est une filiale de la compagnie pétrolière SONATRACH, le 1er groupe d'hydrocarbure du continent Africain. Cela accroît la responsabilité de Tassili, qui doit être toujours prête à répondre rapidement aux demandes de sa société mère. Jouant ainsi un rôle essentiel dans son fonctionnement, que ce soit pour le transport régulier des employés en navette, des vols à la demande de PDG ou des cadres de Sonatrach, ainsi que pour gérer des vols imprévus pour diverses raisons.



Figure 5: Logo Sonatrach

(Source : <https://worldvectorlogo.com>)

IV.1 Perturbation :

Les événements suivants qui empêchent les passagers à arriver à leurs destinations à temps :

IV.1.1 Vol à la demande (vol spécial / irrégulier / imprévus) :

Les vols imprévus selon Tassili sont des vols qui ne sont pas planifiés à l'avance et qui surviennent de manière inattendue en raison de diverses circonstances. Ces vols peuvent être nécessaires pour répondre à des urgences ou d'autre type de vols :

Tableau 2: Types des vols imprévus (Source : Réalisé par les étudiants)

Vols imprévus	
Transport de délégation	Demandes de dernière minute, augmentation soudaine de la demande (Omra)
Des pannes techniques d'autres avions	Evénements sportifs (coupe d'Afrique)
Vols d'essais, Vols Compte SONELGAZ	Vols de convoyage, Vols de mise en place, Vols EVASAN
Besoins spécifiques d'entreprises ou de clients	Demandes de dernière minute
Vols VIP	Situations de crise, Vols Prise de vue



Figure 6: Premier vol de Tassili Airlines au départ d'El Oued Vers l'aéroport de Taibah à Médine 02/2024

(Source : <https://voyagerdz.com>)

IV.1.2 Retard de vol :

Un retard de vol survient lorsqu'il y a un délai entre l'heure prévue de départ ou d'arrivée et l'heure réelle de départ ou d'arrivée du vol, par rapport à l'heure annoncée. En d'autres termes, un retard de vol se produit lorsque le départ a lieu après l'heure indiquée sur le billet. Les causes d'un retard peuvent être diverses, telles que la mauvaise planification et gestion des vols, les problèmes de communication, les problèmes techniques, les conditions météorologiques défavorables, les causes liées aux passagers ou encore événements géopolitiques. Les retards ont une tolérance et elles doivent être signalées et codifiées. [3]

IV.1.3 Annulation de vol :

C'est la décision prise par la compagnie aérienne de ne pas effectuer un vol qui était initialement prévu. En d'autres termes, le vol planifié n'aura pas lieu et les passagers ne pourront pas voyager comme prévu.

IV.1.4 Vol reporté :

Un vol reporté est un vol qui est déplacé à une date ou une heure ultérieure par rapport à l'horaire initialement prévu. Dans ce cas, les vols sont souvent attribués à un nouveau numéro de vol, et parfois, même à un nouvel itinéraire. Et donc le vol est décalé dans le temps de manière significative, et ça nécessite généralement une nouvelle planification de voyage pour les passagers concernés. [4]

IV.2 Problématique

Dans le cadre de la mise en place d'un programme de vols qui satisfait à la fois les exigences de la compagnie aérienne et les attentes des clients, il est crucial de repenser les méthodes traditionnelles de gestion des vols imprévus. Actuellement, ces vols représentent des opérations irrégulières, gérées de manière empirique et souvent manuellement, ce qui entraîne des inefficacités et des délais dans la prise de décision. Une dépendance excessive à l'égard de l'expérience individuelle des gestionnaires peut limiter la capacité de la compagnie à mettre en œuvre des solutions innovantes et à tirer parti des meilleures pratiques de l'industrie.

Pour répondre à ces défis, nous envisageons de développer une solution digitale innovante capable d'optimiser la gestion des vols imprévus tout en récupérant les vols initialement programmés.

Et donc, Comment développer cette solution digitale ? Quelles sont les contraintes à prendre en compte ? Comment cette solution peut-elle améliorer la gestion des vols imprévus par rapport aux procédures actuelles de la compagnie ?

IV.3 La Gestion a Tassili Airlines :

IV.3.1 Slots et Gestion des vols imprévus :

La gestion des créneaux horaires, ou slots, est nécessaire pour assurer une exploitation fluide des vols. Ces slots représentent des périodes réservées au décollage des avions. En cas des vols imprévus, Tassili Airlines adopte une approche empirique dans la gestion de ces créneaux, en se basant sur l'expérience de ses gestionnaires. Dans ce contexte, les décisions sont prises souvent en réaction directe aux événements. Ainsi, la compagnie peut choisir de reporter ou d'annuler certains vols jusqu'à J+1 voire J+3 afin de les remplacer par des vols imprévus, si aucun slot n'est disponible.

IV.3.2 Ponctualité et Gestion des changements de la dernière minute :

La ponctualité au départ est un des indicateurs de performance clé (KPI) de Tassili Airlines, constituant un élément fondamental de la qualité de service. Elle reflète la capacité de la compagnie à respecter les dates annoncées. Des facteurs tels que les vols imprévus mal programmés, le PN, les conditions météorologiques défavorables et les pannes techniques peuvent influencer cette ponctualité, entraînant des annulations ou des retards de vols. Tassili a mis en place 3 procédures de gestion des changements de la dernière minute :

- **Irrégularité avion (IRGAV)** : En cas de changement Immatriculation avion l'ATE appellera par téléphone l'ATS pour transmettre le changement introduit. En cas de changement type avion le plan de vol sera automatiquement annulé et remplacé par un nouveau plan de vol déposé. [2]

- **Irrégularité itinéraire (IRGIT)** : S'il y a une modification de route, le plan de vol sera automatiquement annulé et remplacé par un nouveau plan de vol déposé par l'ATE en conformité avec la nouvelle route. [2]

● **Irrégularité horaire (IRGHO)** : Lorsqu'il se produit un retard de plus d'une heure par rapport à l'heure estimée de départ du poste de stationnement, pour lequel un plan de vol a été, déposé, l'ATE appellera par téléphone l'ATS pour transmettre le changement introduit, et le plan de vol devrait être amendé ou, s'il y a lieu, un nouveau plan de vol devrait être déposé et l'ancien plan de vol annulé. [2]

IV.3.3 Suivre Journaliers de l'exploitation :

Dans le cadre des exigences réglementaires OACI en matière de suivi des aéronefs, Tassili utilise un système de gestion d'information, AIMS (Airline Information Management System) afin d'assurer un contrôle efficace des opérations. L'écran offre un aperçu du vol et horaire de l'avion pour une date et heure limités, sa fonctionnalité inclut la possibilité d'assurer le suivi quotidien de la flotte (Aircraft Route) et du personnel navigant (Crew Route) le jour j. Ces tâches sont attribuées au service de surveillance des vols en collaboration avec d'autres services. L'agent technique d'exploitation est doté d'une session AIMS personnelle avec des privilèges bien précis pour assurer un contrôle optimal des vols. L'ATE SV ou l'agent d'opération SV est tenu dès réception des informations de les introduire sur le système, le chef de quart SV doit veiller à ce que le système AIMS soit correctement renseigné.

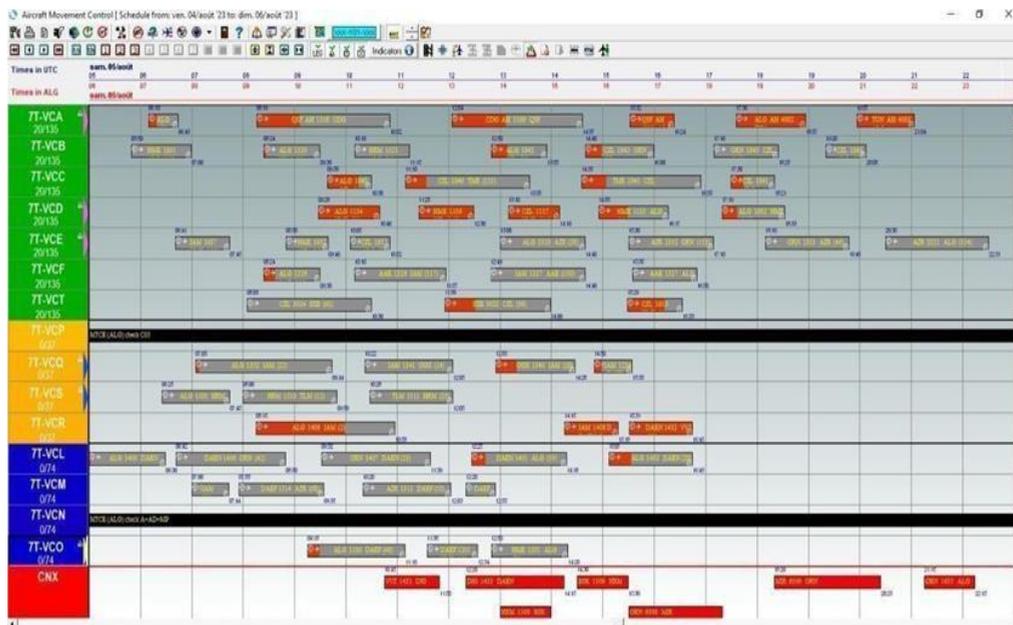


Figure 7: Interface du logiciel AIMS

(Source : pris par les étudiants)

IV.3.4 Analyse critique de la gestion actuelle :

La gestion empirique des créneaux horaires et des changements de dernière minute présente certains inconvénients. En adaptant une approche basée sur l'expérience des gestionnaires, la compagnie peut parfois manquer de prévisibilité et de cohérence dans ces opérations.

Cela peut entraîner **un temps de réaction plus lent**, car la gestion empirique dépend de **l'intervention humaine** plutôt que d'un système informatisé. De plus, le risque d'erreur humaine est élevé, en particulier dans des situations complexes ou sous pression. Ainsi, la transmission des connaissances basées sur l'expérience peut être difficile à formaliser et à transmettre à d'autres membres de l'équipe ou à de nouveaux employés.

Dans la gestion des vols imprévus, on remarque que la décision que prend Tassili est souvent d'annuler, retarder ou reporter les vols, une approche qui n'est pas toujours optimale et qui a un impact significatif sur les passagers.

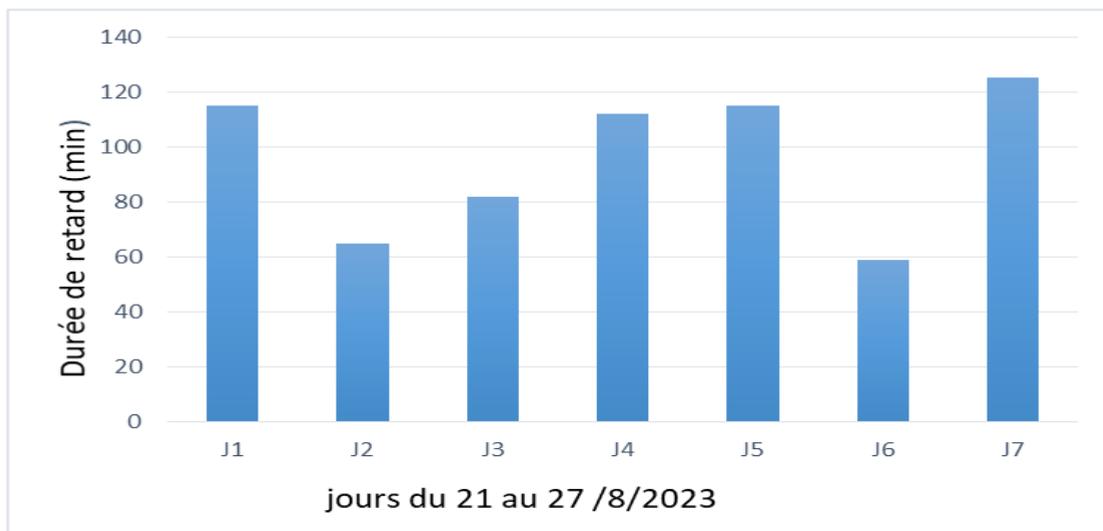


Figure 8: Evaluation des retards journaliers pour une semaine donnée.

(Source : Réalisé par les étudiants)

Prenons une semaine donnée dans la saison estivale, soit dans le mois d'août de l'année précédente, qui est souvent le plus chargé en vols. D'après le graphique indiqué ci-dessus, on remarque que les durées de retard présentent une signification notable tout au long de la semaine ce qui confirme leur impact substantiel sur la compagnie.

Dans le cadre de notre étude, une petite enquête a été faite afin de renforcer et d'assurer la crédibilité de notre travail. Un formulaire a été envoyé à un échantillon spécifique, les employés de SONATRACH, qui utilisent fréquemment les services de Tassili et se sont les plus touchés par ce type de gestion, les résultats de l'enquête nous ont permis d'obtenir les graphiques suivants :



Figure 9: Graphique circulaire indiquant le pourcentage des personnes qui ont rencontrés un report de vol avec la compagnie.

(Source : élaboré par les étudiants)

D'après leurs réponses, 90% ont déjà rencontré un report de vol. Cela souligne l'importance de revoir et d'améliorer les méthodes de gestion actuelles.

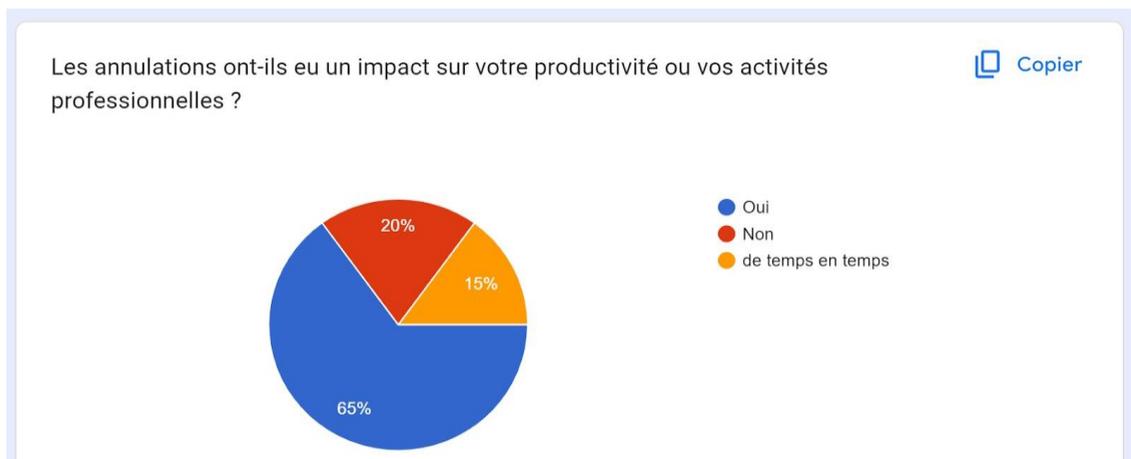


Figure 10: Graphique circulaire indiquant le pourcentage d'impact des annulations sur les clients de la compagnie.

(Source : élaboré par les étudiants)

De plus 65% des passagers ont été impactés par ces annulations, cela provoque l'insatisfaction des clients de cette compagnie. Ce qui nécessite une optimisation des procédures afin de minimiser les perturbations et de gagner la bonne réputation de la compagnie.

Ce qui confirme qu'une mauvaise gestion des irrégularités, peut entraîner des retards et des annulations !

V. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la compagnie Tassili Airlines et ses activités. Ensuite nous avons cerné les contraintes au sein de la compagnie ainsi que les procédures de gestion des irrégularités qui nous ont permis de mettre en lumière la problématique à étudier. Les objectifs étant cernés, le chapitre qui suit portera sur les concepts théoriques qui seront d'une grande aide au cours de notre travail.

Chapitre 2 : Concepts et outils

I. Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons les concepts de bases et les définitions clés qui seront essentielles pour la compréhension de notre travail. Il s'agit de cerner les termes spécifiques à notre domaine d'étude et d'établir un cadre de référence commun. Par la suite, on procède à la présentation théorique du problème traité dans ce mémoire.

A la fin, nous présenterons les outils et les approches que nous avons utilisés pour résoudre le problème posé, leurs avantages et les raisons pour lesquelles nous les avons choisis.

II. La Recherche opérationnelle :

II.1 Définition

La recherche opérationnelle (RO) est la discipline des mathématiques appliquées qui traite des problèmes d'optimisation des ressources dans l'industrie et dans le secteur public. Depuis une dizaine d'années, le champ d'application de la RO s'est élargi à des domaines comme la gestion des entreprises, logistique et transport, Finance, Ingénierie, santé, marketing...etc.

La RO fournit des outils pour modéliser des situations complexes et identifier les variables clés afin d'optimiser la prise de décision, elle permet de trouver des solutions optimales ou approximativement optimales qui respectent les contraintes imposées par le système. [5]

III. La modélisation mathématique :

Un modèle mathématique est une interprétation abstraite de la réalité physique, qui décrit nos croyances. En modélisation mathématique, on traduit ces croyances dans le langage des mathématiques. Modéliser consiste à écrire en notation mathématique ce qui est déjà exprimé en mots. [9]

Afin de construire un modèle d'optimisation il nous faut 3 composantes principales [6] :

- Les variables qui représentent les composantes du modèle qui peuvent être modifiées pour créer des configurations différentes.
- Les contraintes qui représentent les limitations sur les variables.
- La fonction objectif qui assigne une valeur à chaque configuration différente. Le terme "objectif" vient du fait que l'objectif est d'optimiser cette fonction.

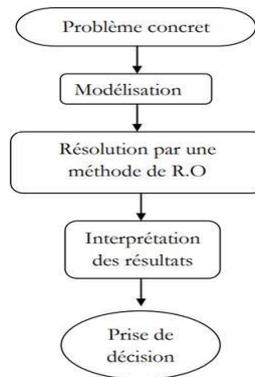


Figure 11: Schéma de procédure utilisée par la RO

(Source [7])

IV. La programmation mathématique :

La programmation mathématique est une approche couramment utilisée en recherche opérationnelle (RO) pour résoudre des problèmes d'optimisation, tandis que la modélisation est une étape fondamentale dans la RO, le tableau suivant montre une comparaison entre ces deux notions :

Tableau 3: Comparaison entre la modélisation mathématique et la Programmation mathématique (Source : édité par les étudiants)

Caractéristique	Modélisation mathématique	Programmation mathématique
Objectif	Représenter un système réel ou un problème décisionnel	Trouver des solutions optimales à un problème modélisé mathématiquement
Champ d'application	Plus large, englobe la construction de modèles mathématiques pour divers domaines	Plus restreint, se concentre sur la résolution de problèmes exprimés sous forme de modèles mathématiques
Outils utilisés	Équations, inéquations, variables, paramètres	Algorithmes de résolution, techniques d'optimisation
Résultats	Un modèle mathématique qui représente le système	Des valeurs optimales pour les variables de décision

V. Notions d'optimisation

V.1 L'optimisation combinatoire :

L'optimisation combinatoire, aussi appelée optimisation discrète, est une branche de l'optimisation en mathématiques appliquées et en informatique, également liée à la recherche opérationnelle, l'algorithmique et la théorie de la complexité. L'optimisation combinatoire consiste à trouver dans un ensemble un sous-ensemble contenant les « meilleures solutions ».[8].

V.2 L'optimisation multi objectif :

Un problème d'optimisation multi objectifs (multicritères) (MOP) peut être défini de la manière suivante :

$$(MOP) = \begin{cases} \text{Opt } f_i(x) & i = 1, \dots, k; \\ g_l(x) \geq 0 & l = 1, \dots, m; \\ x \in S. \end{cases}$$

Où x un vecteur de décision, k le nombre d'objectifs, m le nombre de contraintes du problème et S représente l'ensemble des solutions réalisables associées à des contraintes d'égalité et d'inégalité. [9]

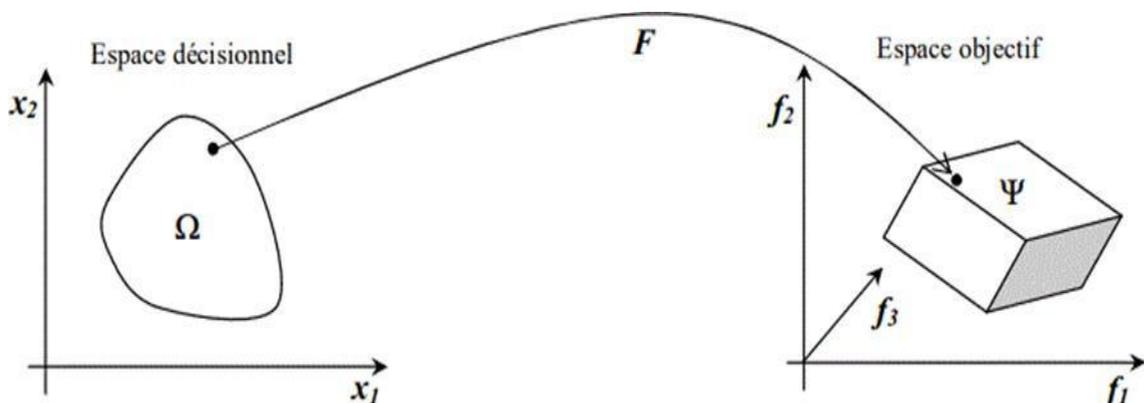


Figure 12: Représentation d'un problème d'optimisation multi objectif

L'ensemble des vecteurs de décision de X qui ne sont pas dominés par aucun autre vecteur de X , constituent l'ensemble des solutions non dominées ou ensemble de Pareto qu'on notera PO. L'image de cet ensemble par F est appelée la frontière de Pareto ou surface du compromis. (Front Pareto dans le cas bi-objectifs).

Les solutions placées sur cette frontière ne peuvent pas être comparées, aucune n'étant systématiquement meilleure que les autres. C'est le décideur qui aura pour rôle de choisir la solution à retenir.

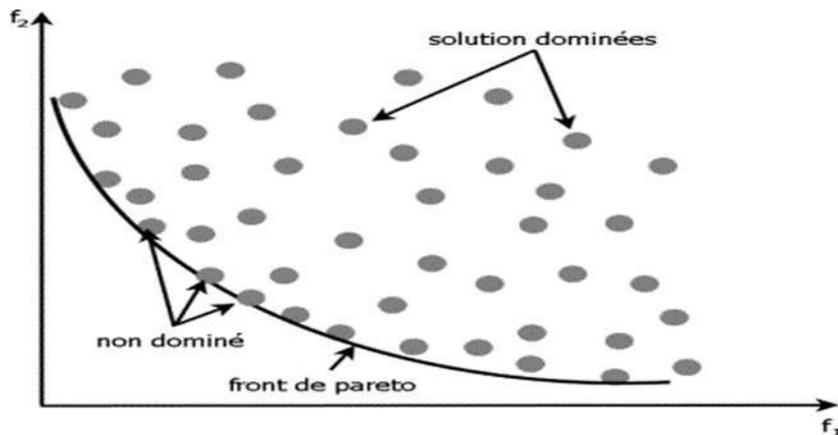


Figure 13: Représentation du front de Pareto et des solutions non dominées pour un problème biobjectif de minimisation

(source :[10])

V.3 Notion de dominance

La notion de dominance consiste à attribuer un rang à chaque individu en favorisant la sélection des individus de rang le plus élevé pour rechercher une meilleure solution. Lorsqu'on résout un problème d'optimisation multi-objectif, on obtient une multitude de solutions. Seul un nombre restreint de ces solutions va nous intéresser.

Pour qu'une solution soit intéressante, il faut qu'il existe une relation de dominance entre la solution considérée et les autres solutions, dans le sens suivant :[11]

Soit x et x' deux de décision,

$$x \text{ domine } x' (x \prec x') \quad \text{ssi} \quad f(x) \leq f(x') \text{ et } f(x) \neq f(x').$$

V.4 Points particuliers :

On observe deux points caractéristiques associés à une surface de compromis (front de Pareto) :

1/ **Point idéal** : On appelle un point idéal, le vecteur :

$$F(X^*) = \left(\max_{x \in D} (f_1(x)), \max_{x \in D} (f_2(x)), \dots, \max_{x \in D} (f_p(x)) \right)$$

C'est le point qui prend les composantes des solutions optimales sur chaque fonction objective.

2/ **point nadir** : On appelle un point nadir, le vecteur :

$$F(\bar{X}) = \left(\min_{x \in D_e} (f_1(x)), \min_{x \in D_e} (f_2(x)), \dots, \min_{x \in D_e} (f_p(x)) \right)$$

Où D est l'ensemble des solutions efficaces de (PMO). C'est le point qui prend le minimum des composantes des solutions efficaces sur chaque fonction objective. [12]

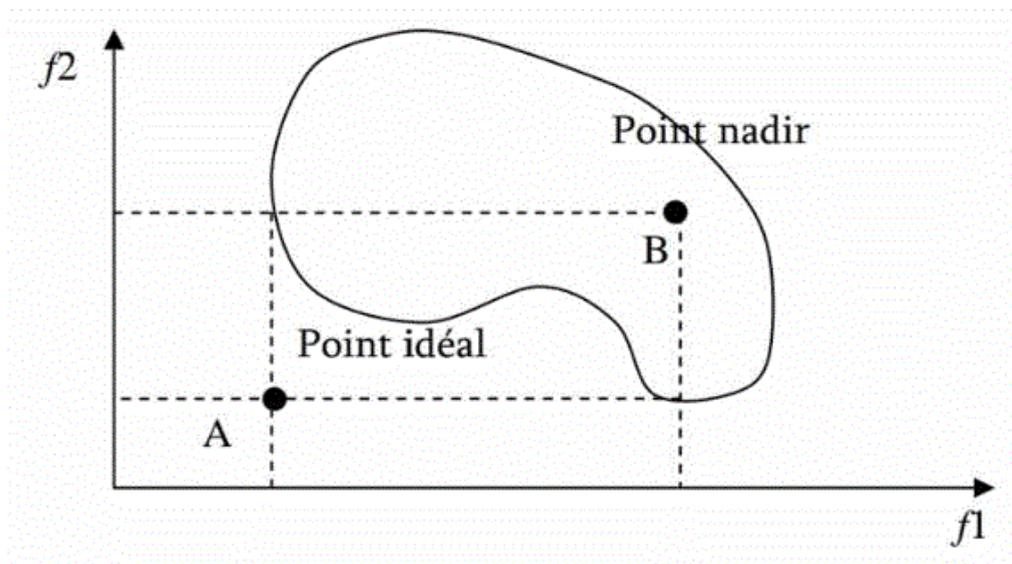


Figure 14: Le point idéal et point nadir du front de Pareto dans le cas de minimisation de deux objectifs.

(Source : [13])

VI. Méthodes de résolution

La recherche opérationnelle propose différentes approches pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire. Ces approches peuvent être regroupées en deux grandes familles :

Les méthodes exactes, qui garantissent l'optimalité de la solution mais peuvent nécessiter des temps de calcul partiellement abordables, et les méthodes approchées, qui peuvent compromettre l'optimalité de la résolution mais offrent souvent des solutions de haute qualité dans des délais raisonnables.

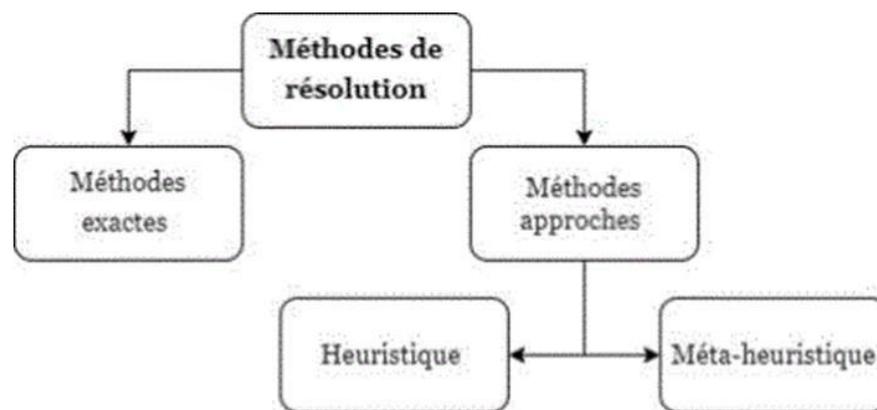


Figure 15 : Classification des méthodes de résolution

(Source : élaboré par les étudiants)

VI.1 Les méthodes exactes

Les méthodes exactes, également appelées méthodes complètes, sont utilisées pour trouver une solution optimale à un problème d'optimisation spécifique. Elles reposent généralement sur des techniques de recherche arborescente et d'énumération partielle de l'espace des solutions. [14] Parmi les algorithmes exacts les plus connus, on retrouve :

- **La méthode d'évaluation et de séparation progressive (Branch and Bound)**

Est une approche générale qui convient à de nombreux problèmes d'optimisation. Elle explore de manière itérative les différentes branches de l'arbre de recherche, évaluant et élaguant les solutions non prometteuses. Cela permet de trouver progressivement la solution optimale, en réduisant l'espace de recherche. [15]

- **La programmation en nombres entiers (Branch and Cut)**

Est une approche qui combine des techniques de recherche arborescente avec des procédures de coupes. Elle utilise des contraintes supplémentaires (coupes) pour réduire l'espace de recherche de manière plus efficace, améliorant ainsi l'efficacité de la résolution. [16]

- **La programmation dynamique**

Est une technique de résolution qui décompose le problème en sous-problèmes plus petits et résout chaque sous-problème de manière itérative. Cette approche peut être efficace pour résoudre des problèmes de grande taille en utilisant des calculs récursifs et en stockant les résultats intermédiaires. [17]

Cependant, ces méthodes ont l'inconvénient d'exiger un temps de calcul important, car le nombre de combinaisons augmente avec la dimension du problème. Par conséquent, leur efficacité est généralement limitée aux instances de problèmes de petite taille. Elles sont particulièrement adaptées pour trouver des solutions efficaces à des problèmes de petite taille.

VI.2 Les méthodes approchées

Les méthodes approchées se révèlent être une alternative efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation de grande taille lorsque les méthodes exactes ne sont pas applicables. Elles offrent la possibilité d'obtenir rapidement des solutions de bonne qualité tout en réduisant le temps de calcul requis. [18]

Ces méthodes sont principalement basées sur l'utilisation d'heuristiques et de méta heuristiques, qui peuvent être spécifiques à un type de problème ou plus générales.

- **Les Heuristiques**

Une heuristique est une approche de calcul qui permet de trouver une solution réalisable dans un temps raisonnable, sans garantie d'optimalité. [19]

L'évaluation d'une heuristique peut se faire selon plusieurs critères, tels que sa complexité en termes d'espace et de temps, sa simplicité et facilité d'implémentation, ainsi que sa flexibilité et sa capacité à générer rapidement des solutions. Parmi les heuristiques fréquemment utilisées, nous notons : [20]

- Les Heuristique de construction : ce sont des méthodes itératives qui construisent pas à pas une solution. Partant d'une solution partielle initialement vide, elles cherchent à étendre à chaque étape la solution partielle de l'étape précédente, et ce processus se répète jusqu'à ce que l'on obtienne une solution complète.

- Les Heuristique d'amélioration Les méthodes d'amélioration se proposent d'améliorer la valeur des solutions déjà existantes, qui sont le plus souvent le résultat d'une méthode constructive.

• Les métaheuristiques

Les métaheuristiques sont des méthodes d'optimisation utilisées pour résoudre des problèmes complexes lorsque les méthodes exactes sont inefficaces. Elles fournissent des solutions réalisables dans un temps de calcul raisonnable, mais sans garantie d'optimalité. [21]

Les métaheuristiques utilisent des algorithmes de recherche locale pour explorer un voisinage de solutions à partir d'une solution initiale. La recherche continue jusqu'à ce qu'aucune solution améliorante ne soit trouvée ou que le temps imparti soit écoulé. Elles sont largement utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes dans différents domaines, On peut citer quelques métaheuristiques telles que : Les Méthode de voisinage, Recuit simulé, Recherche tabou, Colonie de fourmis, algorithmes évolutionnaires. On va exposer par la suite les algorithmes évolutionnaires :

VI.2.1 Les algorithmes évolutionnaires :(AE)

Les AE sont des algorithmes qui effectuent des tâches d'optimisation ou d'apprentissage avec la capacité d'évoluer. Ils présentent trois caractéristiques principales :

- Base de population. Les AE maintiennent un groupe de solutions, appelé population, pour optimiser ou apprendre le problème de manière parallèle. La population est un principe fondamental du processus évolutif.

- Orientation de fitness : Chaque solution dans une population s'appelle un individu. Chaque individu a sa représentation génétique (chromosome), appelée son code, et son évaluation de ses performances, appelée sa valeur de fitness. Les EA préfèrent les individus en meilleure fitness, ce qui constitue le fondement de l'optimisation et de la convergence des algorithmes.

- Conduction des variations : Les individus subiront un certain nombre d'opérations de variation pour imiter les modifications génétiques qui sont fondamentales pour la recherche dans l'espace des solutions. [22]

Les algorithmes génétiques, les stratégies d'évolution et les programmes d'évolution construisent le cœur des algorithmes évolutionnaires.

VI.2.2 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) font partie de la famille des méthodes de recherche dites évolutionnaires qui sont inspirées principalement de la biologie. Le principe de fonctionnement de ces méthodes consiste à faire évoluer une population d'individus, représentant des solutions potentielles au problème traité, à travers un certain nombre d'itérations, dites générations, dans le but d'obtenir des solutions de plus en plus efficaces. La qualité des solutions est améliorée en appliquant les opérateurs génétiques, à chaque génération, sur la population d'individus [23].

Algorithme 1 : Pseudo-code d'un algorithme génétique

```
Entrées :  $N, P_c, P_m$   
 $t \leftarrow 0$   
Initialiser  $P_t$   
Initialiser  $x_{opt}$   
Tant que Critère d'arrêt non satisfait faire  
    Sélectionner  $Q_t$  à partir de  $P_t$   
    Appliquer le croisement et la mutation sur  $Q_t$   
    Etablir  $P_{t+1}$  à partir de  $P_t$  et  $Q_t$   
     $t \leftarrow t + 1$   
    Mettre à jour  $x_{opt}$   
Fin  
Sorties :  $x_{opt}$ 
```

Algo 1: Pseudo-code d'un algorithme génétique

- 3 opérateurs caractérisent les algorithmes génétiques :

1- La phase de sélection indique dans quelles configurations de la population courante on va prélever des morceaux de chromosomes ;

2- La phase de croisement prélève ces morceaux de chromosomes et les recombine pour former les configurations de la population suivante ;

3- La phase de mutation s'applique à la nouvelle population en changeant éventuellement certains gènes de certains chromosomes obtenus à la fin de la phase de croisement.

Une succession des trois opérations de sélection, de croisement et de mutation constitue une génération, et les algorithmes génétiques consistent donc à faire évoluer une population initiale pendant un certain nombre de générations, nombre déterminé par l'utilisateur.[24]

Un nombre considérable de méthodes de résolution multi objectif ont été proposées dans la littérature en utilisant les métaheuristiques. On distingue alors des méthodes développées pour résoudre des problèmes académiques, et d'autres qui sont conçues pour des problèmes spécifiques (NSGA , MOEA, MOSA, PSO...). Dans le cas de notre problème, notre choix s'est orienté vers l'utilisation de la méta-heuristique NSGA2.

Pourquoi NSGA2 ? Nous avons opté pour l'utilisation de la méta-heuristique NSGA-II pour plusieurs raisons parmi eux :

- Efficacité de la séparation non dominée : NSGA-II utilise une méthode de tri basée sur la domination , qui permet de classer efficacement les solutions en différents "fronts" de Pareto.
- Diversité de la population : L'algorithme incorpore un mécanisme de préservation de la diversité en utilisant la mesure de crowding distance.
- Flexibilité et adaptabilité : NSGA-II peut être facilement adapté et étendu pour différents types de problèmes. De plus, c'est une approche rapide qui manipule une population de solutions et utilise un mécanisme explicite de préservation des meilleures solutions appelé l'élitisme.

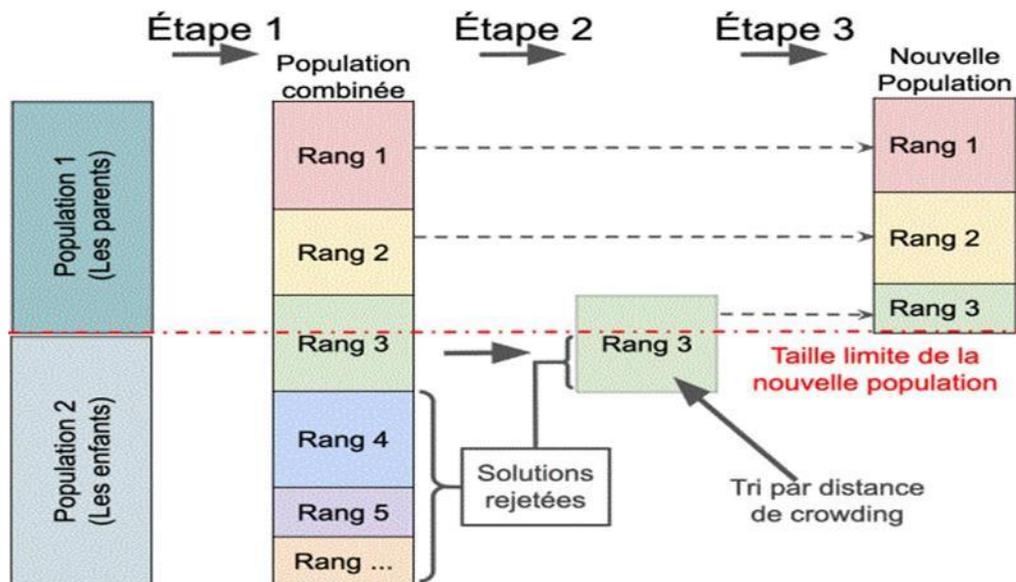


Figure 16: Fonctionnement du NSGA II (exemple 3 fronts admis)

(source :[25])

VI.2.3 L'algorithme génétique de tri par non-dominance NSGA-II

(Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) est un algorithme évolutif multicritères proposé par Deb et al, il apparaît comme l'un des algorithmes de référence pour trouver l'ensemble optimal de Pareto. Il est basé sur les trois caractéristiques suivantes : il utilise le principe de l'élitisme, il favorise les solutions non dominées, et il utilise une variété explicite des solutions, grâce au critère de distance de crowding cette algorithme se distingue par l'emploi de la procédure de ranking et de la distance de crowding:

-Le ranking permet de classer les individus d'une population selon la notion de front cad les individus non dominés reçoivent d'abord le rang 1 et sont retirés temporairement de la population. Ensuite, les individus non dominés de ce qui reste de la population reçoivent le rang 2 avant d'être retirés à leur tour. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que tous les individus se voient attribués un rang

-la distance de crowding permet de comparer les individus de façon à ce que si deux solutions non dominées appartenant au même front, on choisit la solution à la distance de crowding la plus élevée.

Algorithme 2 : Pseudo-code de NSGA-II

```
Entrées :  $N, P_c, P_m$ 
 $t \leftarrow 0$ 
Initialiser  $P_t$ 
Générer  $Q_t$ 
Tant que Critère d'arrêt non satisfait faire
     $R_t \leftarrow P_t \cup Q_t$ 
    Appliquer le ranking sur  $R_t$ 
     $P_{t+1} \leftarrow \emptyset$ 
     $i \leftarrow 1$ 
    Tant que  $|P_{t+1}| < N$  faire
        Inclure dans  $P_{t+1}$  le  $i^{\text{ème}}$  front de  $R_t$ 
         $i \leftarrow i + 1$ 
    Fin
    Si  $|P_{t+1}| > N$  alors
        Retirer de  $P_{t+1}$  les solutions du dernier front qui possèdent les plus petites
        distances de crowding
    Fin
    Générer  $Q_{t+1}$  à partir de  $P_{t+1}$ 
     $t \leftarrow t + 1$ 
Fin
Sorties :  $P_t$ 
```

Algo 2 : Pseudo-code de NSGA-II

VI.2.4 Les opérateurs de variation de l'algorithme NSGA-II

Les opérateurs de variation utilisés sont la sélection par tournoi, le croisement binaire simulé et la mutation polynomiale :

➤ La Sélection par tournoi :

La sélection par tournoi n'utilise que des comparaisons entre les individus et ne nécessite pas un tri de la population, elle possède un paramètre T qui est la taille du tournoi, pour sélectionner un individu on en tire T de la population et on sélectionne d'une manière déterministe (selon la fitness) le meilleur de ces individus. Au cours d'une génération, il y a autant de tournoi que d'individus à sélectionner. Le principe de la sélection par tournoi est le suivant :

On effectue un tirage avec remise de 2 individus de la population (P), et on les fait "combattre". Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité p comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus n fois de manière à obtenir les n individus de (P') qui serviront de parents.

➤ Le croisement binaire simulé (SBX) :

Le croisement binaire simulé est une adaptation du croisement binaire en un seul point avec quelques améliorations pour une utilisation par des algorithmes évolutionnaires codés en réel. Dans le croisement en 1 seul point Chaque chromosome de longueur "l" est divisé en deux segments. La position de chaque chromosome est tirée aléatoirement ensuite les gènes des individus parents sont échangés selon une probabilité de croisement P_c pour former deux nouveaux chromosomes. [22]

A partir de deux parents $p_1(i)$ et $p_2(i)$ le croisement génère deux nouvelles solutions $c_1(i)$ et $c_2(i)$ de la manière suivante :

Etape 1 : générer aléatoirement un nombre uniforme $u \in [0,1]$

Etape 2 : générer un nombre β appelé facteur de dispersion par :

$$\beta = \begin{cases} (2u)^{1/(1+\eta_c)} & \text{si } u < 0.5 \\ (1/2(1-u))^{1/(1+\eta_c)} & \text{sinon} \end{cases}$$

Où η_c désigne l'indice de distribution pour l'opérateur SBX

Etape 3 : générer deux solutions par :

$$\begin{cases} c_1(i) = 0.5[(1+\beta)p_1(i) + (1-\beta)p_2(i)] \\ c_2(i) = 0.5[(1-\beta)p_1(i) + (1+\beta)p_2(i)] \end{cases}$$

La figure di dessous présente un exemple de croisement un point :

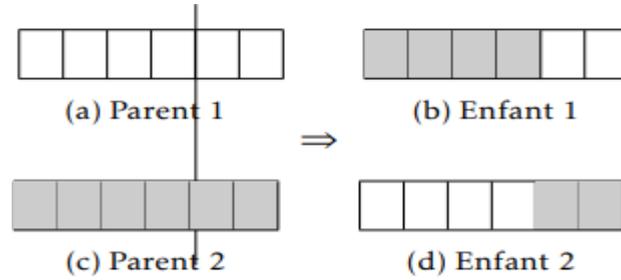


Figure 17: Exemple d'un croisement en 1 point.

➤ **La Mutation polynomiale**

DeB Et agrawal ont proposé un opérateur de mutation polynôme avec un paramètre d'index définis par l'utilisateur n_m basé sur une étude théorique, ils ont conclu que n_m induit un effet d'une perturbation dans la variable, ils ont également constaté que $n_m \in [20,100]$ est suffisant dans la plupart des problèmes qu'ils ont essayé. Dans cette opérateur une distribution de probabilité est utilisé pour perturber une solution dans le voisinage d'un parent, la distribution de probabilité à la fois à gauche et à droite d'une valeur de la variable est ajustée de tel sorte qu'aucun valeur en dehors de la gamme spécifié $[a,b]$ est créé par l'opérateur de mutation une solution père proposé $p \in [a,b]$, p' solution mutée pour une variable particulière est créé pour un nombre aléatoire u dans $[0,1]$ comme suit: [22]

$$p' = \begin{cases} p + \overline{\delta}_L(p - x_i^{(u)}), & \text{si } u \leq 0.5, \\ p + \overline{\delta}_R(x_i^{(u)} - p), & \text{si } u > 0.5. \end{cases}$$

Tel que δL et δR sont des coefficients de variation définit par :

$$\begin{aligned} \overline{\delta}_L &= (2u)^{1/(1+\eta_m)} - 1 & \text{si } u \leq 0.5; \\ \overline{\delta}_R &= 1 - (2(1-u))^{1/(1+\eta_m)} & \text{si } u > 0.5. \end{aligned}$$

Phase de tunning (réglage des paramètres) : Nous allons justifier le choix des paramètres utilisées par chaque opérateur de variation de l'algorithme NSGA-II

• **Sélection par tournoi :**

La taille du tournoi : nous avons choisi ($T = 2$) car, avec une petite taille de tournoi, la sélection devient plus diversifiée.

- **Croisement binaire simulé :**

Probabilité de croisement : C'est la probabilité qu'un croisement soit effectué entre deux solutions parentes, une probabilité plus élevée favorise une exploration plus large de l'espace de recherche généralement $p_c \in [0.6, 1]$, dans notre cas ,on fixe : $p_c=0.6$

Paramètre de distribution (η): Ce paramètre contrôle la distribution des enfants par rapport aux parents lors du croisement. Des valeurs plus élevées de η produiront des enfants plus éloignés des parents, favorisant une exploration plus large de l'espace des solutions. $\eta \in [2, 20]$, dans notre cas, on fixe : $\eta=2$

- **Mutation polynomiale**

Probabilité de mutation : C'est la probabilité qu'une mutation soit appliqué à une solution enfant généralement $p_m \in [0, 0.1]$, Dans notre cas ,on fixe : $p_m=0.1$.Cette valeur a été sélectionnée pour intensifier l'exploration de l'espace des solutions.

Paramètre d'index (η) : il génère un effet d'une perturbation dans la variable généralement $\eta \in [20, 100]$, dans notre cas, on fixe : $\eta=20$ afin d'ajuster la quantité de variation introduite dans les solutions enfants.

VII. Théorie des graphes :

VII.1 Définition

La théorie des graphes, également appelée étude des graphes, est une discipline en mathématiques et en informatique qui se concentre sur l'analyse des graphes. Ces graphes sont des modèles abstraits de réseaux reliant divers objets, constitués de sommets et d'arêtes. Les arêtes peuvent parfois être asymétriques (les graphes sont alors dits orientés) et sont alors appelées flèches ou arcs. [26]

VII.2 Graphes :

Les graphes sont une structure mathématique capable d'exprimer un nombre conséquent de concepts et de problèmes combinatoires. Formellement, un graphe G est un ensemble d'éléments $V(G)$ muni d'une relation binaire $E(G)$ définie sur $V(G)$ tels que $G=(V,E)$, les éléments de $V(G)$ sont appelés sommets ou nœuds ou points et les éléments de $E(G)$ sont appelés arêtes ou arcs.

VII.3 Graphe d'intervalle :

Un graphe d'intervalle est le graphe d'intersection d'un ensemble d'intervalles de la droite réelle. Chaque sommet du graphe d'intervalle représente un intervalle de l'ensemble, et une arête relie deux sommets lorsque les deux intervalles correspondants s'intersectent.

VII.4 Propriétés :

- Un graphe est d'intervalles si, et seulement si, il possède un schéma d'élimination parfait.
- Si G est un graphe d'intervalles alors il n'existe pas de cycle avec plus de 3 arêtes et sans raccourci.
- Les graphes d'intervalles sont des graphes parfaits, le nombre minimum dans leurs coloration appelés nombre chromatique est égale à la taille de leurs plus grandes cliques.
- Un graphe d'intervalles est un graphe cordal (donc un graphe parfait) dont le graphe complémentaire est un graphe de comparabilité.
- Un graphe d'intervalles propre est un graphe d'intervalles qui dispose d'une représentation où aucun intervalle n'est entièrement contenu dans un autre.

Exemple des intervalles de départ des vols imprévus, intervalles de départ des vols programmés initialement et slots libres (demandés de l'aéroport) :

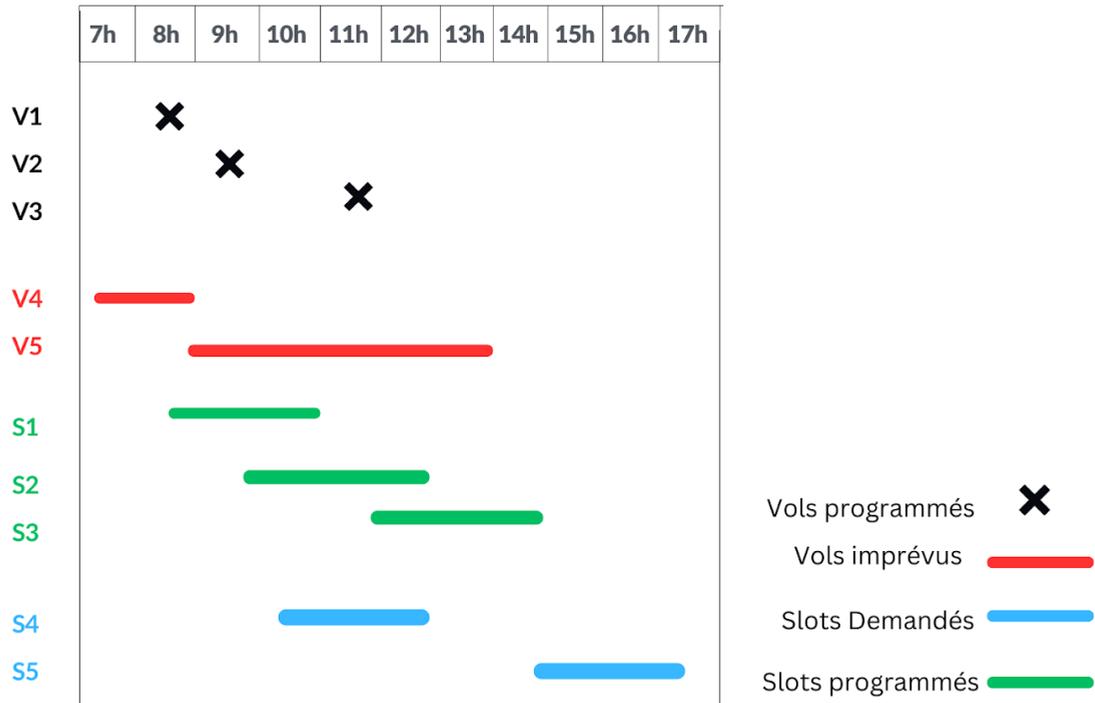


Figure 18: Un graphe d'intervalles

(Source : élaboré par les étudiants)

VIII. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les outils utilisés pour effectuer notre travail et traiter notre problématique, expliquer les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation en général les méthodes appliquées pour ce faire en particulier.

Chapitre 3 : Formulation mathématique et résolution du problème

I. Introduction

Dans ce chapitre, on va commencer par la formulation du modèle mathématique approprié à notre problème. Cela nécessite une compréhension approfondie du contexte, des objectifs et des contraintes de notre projet. Ensuite, nous allons procéder à la préparation des données nécessaires à la résolution de notre problème, notamment les informations relatives au programme de vol et aux tolérances des vols. Par la suite, nous utiliserons les méthodes approchées et les outils de résolution pour trouver des solutions approchées à notre modèle et nous exposons le logiciel construit qui prend en charge l'ensemble des points clés qui ont été expliqués dans les chapitres précédents.

II. Modélisation mathématique du problème :

Le modèle mathématique est formulé pour optimiser le programme de vol de la compagnie TAL en maximisant le nombre de vols imprévus à programmer tout en minimisant les perturbations des vols programmés. Le modèle mathématique permet aussi de représenter les différentes contraintes qu'on doit respecter pour assurer qu'il rapproche à la réflexion de la réalité. Voici comment on a construit le modèle mathématique :

II.1 Notations et définitions

a. Notation des indices :

i : indice des vols

j : indice des périodes dans une journée

k : Indice représentant le temps initialement prévu pour le décollage d'un vol i dans une journée.

n : nombre de vols imprévus à programmer pour le jour $J+1$ qui démarrent d'un même aéroport.

m : nombre de vols déjà programmés pour le jour $J+1$ qui démarrent d'un même aéroport.

b. Notation des ensembles :

I_i : Ensemble des périodes interdites pour le décollage du vol i , $\forall i \in \{1, 2, \dots, n+m\}$;

I : Ensemble des vols $I \in \{1, 2, \dots, n+1, n+m\}$

J : Ensemble des instants dans une journée $J \in \{1, \dots, 1440\}$

c. Notation des paramètres :

Ti: Tolérance maximale d'un vol i donné

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le vol programmé } i \text{ démarre de l'aéroport à l'instant } j \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

d. Définition de variable de décision :

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le vol imprévu ou programmé } i \text{ est programmé à l'instant } j \text{ pour le jour } J + 1 \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

$$\forall i=1,(n+m), \quad j=1,1440$$

e. Définition des Fonctions objectives :

1 / Maximiser le nombre de vols imprévus à programmés :

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{1440} x_{ij} \quad (1)$$

2 / Minimiser les perturbations des vols programmés :

$$\text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{1440} |x_{ij} - y_{ij}| \quad (2)$$

f. Définition des contraintes :

1 / Tous les vols déjà programmés doivent être reprogrammés :

$$\sum_{j=1}^{1440} x_{ij} = 1; \quad \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} \quad (3)$$

2 / tous les vols imprévus sont au plus programmé une fois :

$$\sum_{j=1}^{1440} x_{ij} \leq 1; \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (4)$$

3/ Pour chaque vol i , il y a un ensemble de période I_i interdite pour son décollage :

$$\sum_{j \in I_i} x_{ij} \leq 0 ; \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} \quad (5)$$

4/ On ne doit pas dépasser la Tolérance T_i d'un vol déjà programmé s'il est perturbé :

$$y_{ik} \cdot k \cdot x_{ij} - ky_{ik} \leq T_i ; \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} ; \forall j \geq \sum_{k=1}^{1440} ky_{ik} \quad (6)$$

5 /On ne doit pas programmer un vol déjà programmé par rapport à son instant déjà programmé :

$$x_{ij} = 0 ; \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} ; \forall j < \sum_{k=1}^{1440} ky_{ik} \quad (7)$$

II.2 Hypothèses :

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

- 1/ Pour chaque vol imprévu à programmer, on considère que l'avion et les PN sont disponibles.
- 2/ Le modèle mathématique est fixé pour une journée et pour un seul aéroport de départ.
- 3/ Le temps de préparation d'un vol au départ est fixé à 30 minutes pour les aéronefs de type Q400 et Q200 et à 1 heure pour les aéronefs de type B780.

$$\begin{array}{l}
 \text{(P)} \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Max } Z_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{1440} x_{ij} \\
 \text{Min } Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{1440} |x_{ij} - y_{ij}| \\
 \text{Sc.} \\
 \sum_{j=1}^{1440} x_{ij} = 1 ; \quad \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} \\
 \sum_{j=1}^{1440} x_{ij} \leq 1 ; \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \\
 \sum_{j \in I_i} x_{ij} \leq 0 ; \quad \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} \\
 y_{ik} \cdot k \cdot x_{ij} - ky_{ik} \leq T_i ; \quad \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} ; \forall j \geq \sum_{k=1}^{1440} ky_{ik} \\
 x_{ij} = 0 ; \quad \forall i \in \{n+1, \dots, n+m\} ; \forall j < \sum_{k=1}^{1440} ky_{ik}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Figure 19 : Formulation mathématique du problème

III. Outils de résolution :

III.1 Présentation de Python :

Python est le langage de programmation open source le plus employé par les développeurs. Ce langage est utilisé dans l'analyse des données, résolution des problèmes d'optimisation combinatoire et le développement des logiciels et sites web. Python permet aux développeurs de se concentrer sur ce qu'ils font plutôt que sur la manière dont ils le font. Il offre une syntaxe très simple à comprendre et à utiliser, de cette manière, l'utilisateur ne va pas perdre de temps sur la construction du modèle mais plutôt sur la manière de résolution.[27]



Figure 20: Logo Python
(Source : <https://www.python.org>)

Caractéristiques du langage choisi : Nous avons choisi Python pour développer et résoudre notre problème pour diverses raisons :

- C'est un langage open source, disponible gratuitement et permet de créer, modifier et distribuer des applications sans restriction.
- Il offre une documentation facile à comprendre et disponible pour tous les utilisateurs.
- Il dispose un certain nombre de bibliothèque qui facilite la saisie et la représentation des données, il nécessite moins de codage, de plus, il est portable.

III.1 Présentation de Pyomo :

Pyomo (Python Optimization Modeling Objects) est une collection de packages Python permettant de formuler des modèles d'optimisation combinatoire. Il a été développé par William Hart et Jean-Paul Watson aux Sandia National Laboratories et David Woodruff à l'Université de Californie. Pyomo est un package open source populaire qui est utilisé par une variété d'entreprises, établissements universitaires et des agences gouvernementales, il facilite la modélisation des différents problèmes d'optimisation combinatoire et supporte plusieurs solveurs pour les résoudre. [28]



Figure 21: Logo Pyomo

(Source : <https://www.pyomo.org>)

III.3 Présentation de NumPy

NumPy (Numerical Python) est le paquet fondamental pour le calcul scientifique en Python. Il s'agit d'une bibliothèque Python qui permet de manipuler des matrices ou des tableaux multidimensionnels. [29]

Elle nous a donné la possibilité de manipuler les matrices et utiliser toutes les fonctionnalités mathématiques nécessaires pour résoudre notre problématique.



Figure 22: Logo NumPy

(Source : <https://numpy.org/>)

III.4 Présentation de Tkinter :

Tkinter (de l'anglais Tool kit interface) est un moyen simple de créer des interfaces utilisateur graphiques (GUI) en Python. Il s'agit du seul framework inclus dans la bibliothèque standard de Python. En fait, ce framework Python fonctionne comme une fine couche orientée objet au-dessus de Tk et offre une interface à la boîte à outils Tk. Pour créer des interfaces d'application, la boîte à outils Tk fournit une collection multiplateforme de composants de contrôle graphique, parfois appelés widgets. [30]



Figure 23: Logo Tkinter

(Source : <https://stackoverflow.com/tags/tkinter/info>)

III.5 Présentation de Pandas:

Une bibliothèque écrite permettant la manipulation et l'analyse des données. Elle fournit des structures de données telles que les DataFrames qui permettent de manipuler et d'analyser facilement des données structurées, y compris des opérations telles que le filtrage, le regroupement et la fusion.[31]



Figure 24: Logo Pandas

(Source : <https://pandas.pydata.org/>)

III.6 Présentation de Pillow :

La bibliothèque d'imagerie Python offre diverses fonctionnalités de traitement d'image, de représentation interne efficace et des capacités de traitement des fichiers assez puissantes. Elle peut être utilisée pour différents types d'activités, telles que l'archivage, l'affichage, le traitement de différents formats de fichiers graphiques.[32]



Figure 25: Logo Pillow

(Source: <https://python-pillow.org/>)

III.7 Présentation de DEAP :

DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python) est une bibliothèque Python conçue pour simplifier la programmation d'algorithmes génétiques et d'autres techniques d'optimisation évolutionnaire. Elle offre un ensemble d'outils puissants et flexibles pour créer, manipuler et optimiser des populations d'individus. Fonctionnalités principales de DEAP :

Représentation des individus, opérateurs génétiques : tels que la sélection, le croisement et la mutation et les algorithmes d'évolution [33]



(Source : <https://deap.readthedocs.io/en/master/>)

Figure 26: Logo DEAP

III.8 Présentation de Pycharm :

Pycharm Est un environnement de développement intégrée (IDE) qui regroupe tous les outils requis pour écrire des logiciels. Il comporte notamment un éditeur de texte et un compilateur. Il contient des modules et des packages permettant d'ajouter facilement des fonctionnalités et aidant aussi les développeurs à programmer des logiciels avec Python.[35]



Figure 27: Logo Pycharm

(Source : <https://medium.com/analytics-vidhya/pycharms-top-features>)

III.9 Présentation de LaTeX :

Un système de composition de documents particulièrement apprécié dans les milieux académiques et scientifiques pour sa capacité à créer des documents dont la mise en page est automatiquement réalisée selon les normes typographiques. Il est fréquemment utilisé pour la rédaction de thèses, d'articles de recherche et de documents techniques. Une caractéristique distinctive de LaTeX est son mode mathématique, qui simplifie la composition de formules complexes.[36]



Figure 28: Logo Latex

(Source : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LaTeX_logo.svg)

IV. La résolution du problème :

Pour résoudre notre problème, nous avons initialement tenté d'utiliser des solveurs de programmation non linéaire. Cependant, en raison de la complexité et de la grande taille de notre problème, nous avons opté pour NSGA2 comme méthode approchée de résolution.

En utilisant le langage de programmation Python, nous avons développé un code permettant de résoudre notre problème. Tout d'abord, nous avons implémenté une heuristique pour initialiser la population, ensuite nous avons appliqué les instructions de la méta-heuristique NSGA-II pour générer les solutions possibles.

1/ Initialisation de la population :

L'initialisation de la population se fait par le biais d'une heuristique constructive. Cette heuristique fonctionne en demandant des slots de la part de l'aéroport pour l'ensemble des vols. Si des vols imprévus surviennent, ils sont intégrés dans les créneaux existants. Dans le cas où les créneaux sont insuffisants pour accueillir ces derniers, l'heuristique consiste à perturber les vols déjà programmés afin de les accommoder.

Un pseudo code est une façon de décrire un algorithme de façon simplifiée avec un langage naturel sans l'utilisation d'un langage de programmation, nous allons utiliser cette notion pour décrire l'heuristique d'initialisation de la population :

Algorithm 1: Initialisation de la population

Input: Liste des vols programmés VP , Liste des vols imprévus VI ,
Liste des slots libres SL
Output: Population initiale P

```
 $P \leftarrow$  liste vide;  
for  $V_i$  in  $VI$  do  
   $slot\_trouve \leftarrow$  faux;  
  for slot in  $SL$  do  
    if intervalle de départ de  $V_i$  est compatible avec intervalle de slot then  
       $V_i.heure\_depart \leftarrow$  choisir_heure_depart( $V_i$ , slot);  
       $P.append(VP + [V_i]);$   
       $slot\_trouve \leftarrow$  vrai;  
      break;  
    end  
  end  
end  
if non  $slot\_trouve$  then  
  for  $V_p$  in  $VP$  do  
    if  $V_p.type\_avion ==$  "ATR" then  
      |  $nouvelle\_heure\_depart \leftarrow V_p.heure\_depart + 30$  minutes;  
    end  
    else if  $V_p.type\_avion ==$  "Boeing737" then  
      |  $nouvelle\_heure\_depart \leftarrow V_p.heure\_depart + 60$  minutes;  
    end  
    if nouvelle_heure_depart est dans l'intervalle de  $V_p.slot\_programme$  then  
      |  $solution \leftarrow$  copie_solution_actuelle( $VP$ );  
      |  $solution[V_p].heure\_depart \leftarrow nouvelle\_heure\_depart$ ;  
      |  $solution[V_i].heure\_depart \leftarrow nouvelle\_heure\_depart$ ;  
      |  $P.append(solution)$ ;  
    end  
  end  
end  
end  
return  $P$ ;
```

Algo 3 :Pseudo-code de l'initialisation de la population

(Source : rédigé par l'étudiant sur LaTeX)

Notations :

VP : Liste des Vols programmés, V_p : un Vol programmé, SL : Slots libres, VI : liste des Vols imprévus, V_i : un vol imprévu, ATR : Avion de transport régional (petit avion) , Boeing 737 : Grand porteur , P : Population.

Objectifs :

1. Intégrer chaque vol imprévu (j) dans le planning des vols programmés.
2. Minimiser les perturbations aux vols programmés.
3. Respecter les contraintes de temps de préparation pour chaque type d'avion.

V. Présentation du logiciel :

Nous allons présenter dans ce qui suit notre logiciel construit en utilisant le langage de programmation Python, l'implémentation des données et les résultats obtenus.

«OPT-Flight » ou «Flight-Opt » est un logiciel destiné à la branche exploitation sol de la compagnie aérienne «TAL», afin de planifier ou d'optimiser son programme de vol en cas de vols imprévus. La planification suggérée par ce logiciel est basée sur l'approche de résolution présentée dans le chapitre précédent. Dans le but de :

- Minimiser les perturbations des vols programmés.
- Maximiser le nombre de vols imprévus à programmés.
- Optimiser le programme des vols total.

V.1 Un logiciel :

Un ensemble de programmes, de procédures et de routines associés à l'exploitation d'un système informatique. Il comprend des instructions et des données structurées qui permettent d'exécuter des tâches spécifiques sur un ordinateur ou tout autre appareil électronique programmable. Les logiciels peuvent être classés en différentes catégories, telles que les logiciels applicatifs (destinés à accomplir des tâches spécifiques pour l'utilisateur final, comme les traitements de texte ou les jeux), les logiciels systèmes (comme les systèmes d'exploitation, qui gèrent les ressources matérielles et logicielles de l'ordinateur) et les logiciels de développement (qui fournissent des outils aux programmeurs pour créer d'autres logiciels, comme les environnements de développement intégré, ou IDE). En résumé, un logiciel est l'intelligence qui permet aux matériels informatiques de fonctionner et d'exécuter des tâches utiles.

V.2 Fonctionnement de logiciel :

Nous avons pu développer un outil d'aide à la décision capable de proposer une planification optimisée et réalisable en fonction de divers critères.

Le fonctionnement de ce logiciel repose sur l'importation d'un fichier Excel contenant toutes les données relatives aux vols prévus et imprévus, ainsi qu'aux créneaux (slots) programmés et imprévus pour une journée donnée. Une fois le fichier importé, le programme exécute une optimisation et génère un nouveau programme de vol qui maximise le nombre de vols imprévus à programmés et minimise les perturbations des vols déjà programmés.

V.2.1 Fenêtre d'accueil :

Après le lancement du logiciel, une fenêtre d'accueil va apparaître, elle contient un fond correspondant à notre thème et un bouton « **commencer** » pour le démarrage du logiciel.

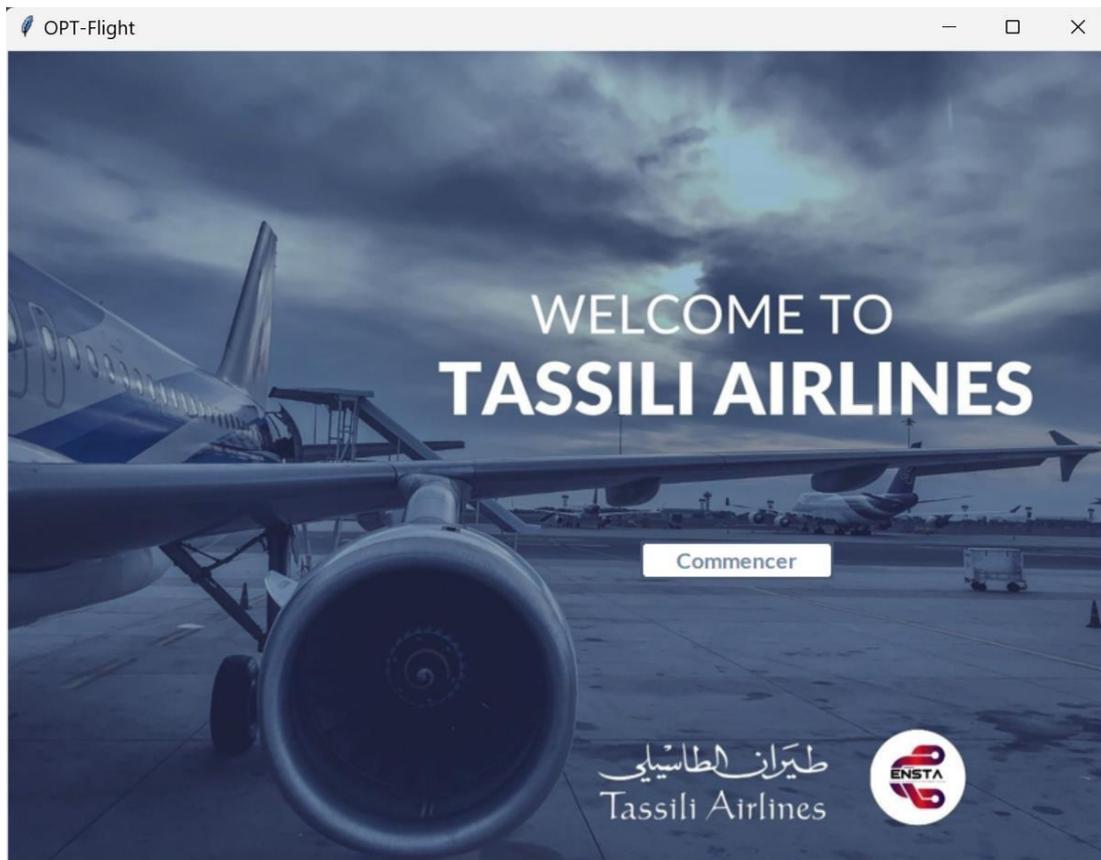


Figure 29: Fenêtre d'accueil

(Source : élaboré par les étudiants)

V.2.2 Fenêtre d'identification :

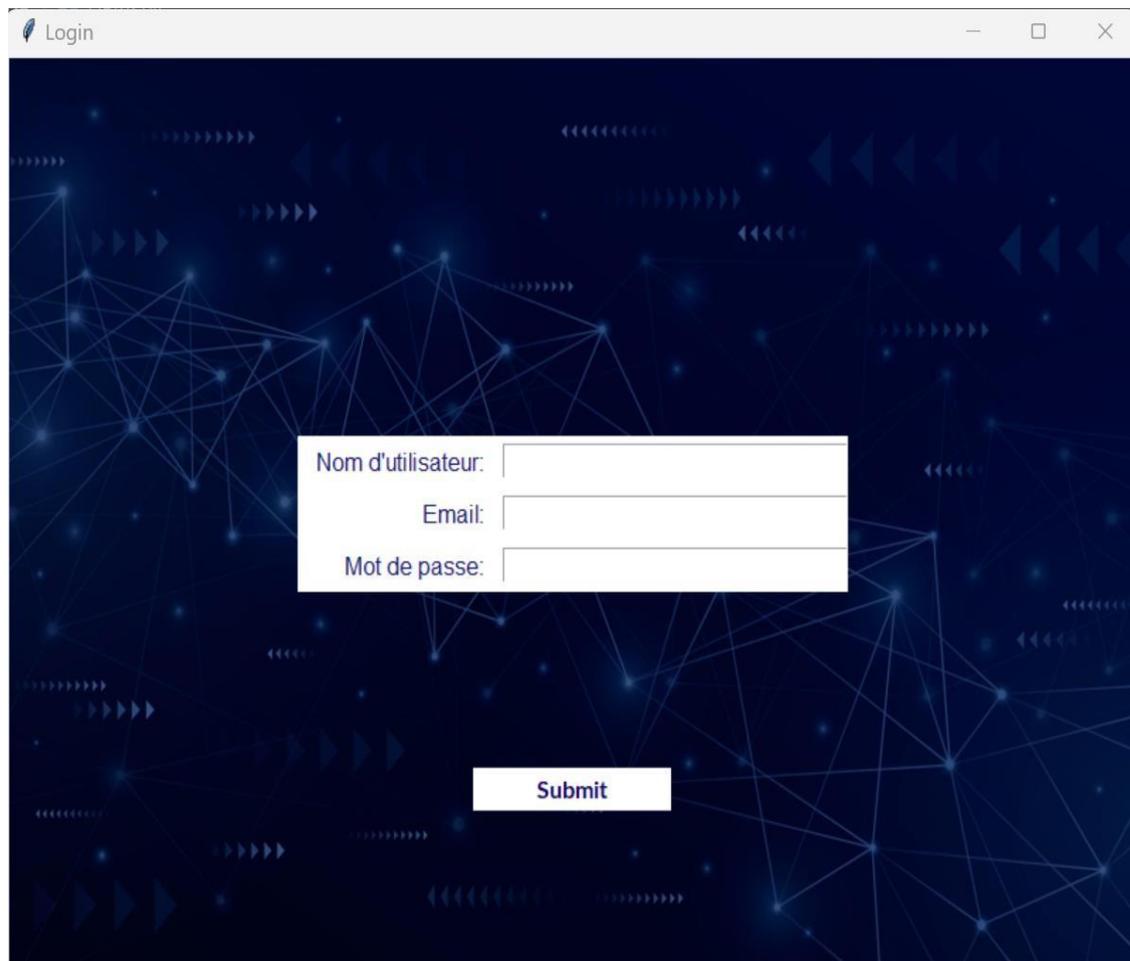


Figure 30: Fenêtre pour utilisateur

(Source : élaboré par les étudiants)

L'utilisateur doit entrer ses données (nom, email, et mot de passe) pour des raisons de sécurité et traçabilité. Si l'utilisateur ne dispose pas d'un mot de passe, il ne pourra pas y accéder. Une fois qu'il clique sur "submit" il passe à une 3eme fenêtre.

V.2.3 Fenêtre d'opérations :

En cliquant sur le bouton « commencer » on aperçoit deux boutons :

« Return » qui permet de retourner à la fenêtre précédente et « chercher » qui permet de saisir le fichier Excel qui contient les informations nécessaires pour le fonctionnement du logiciel.

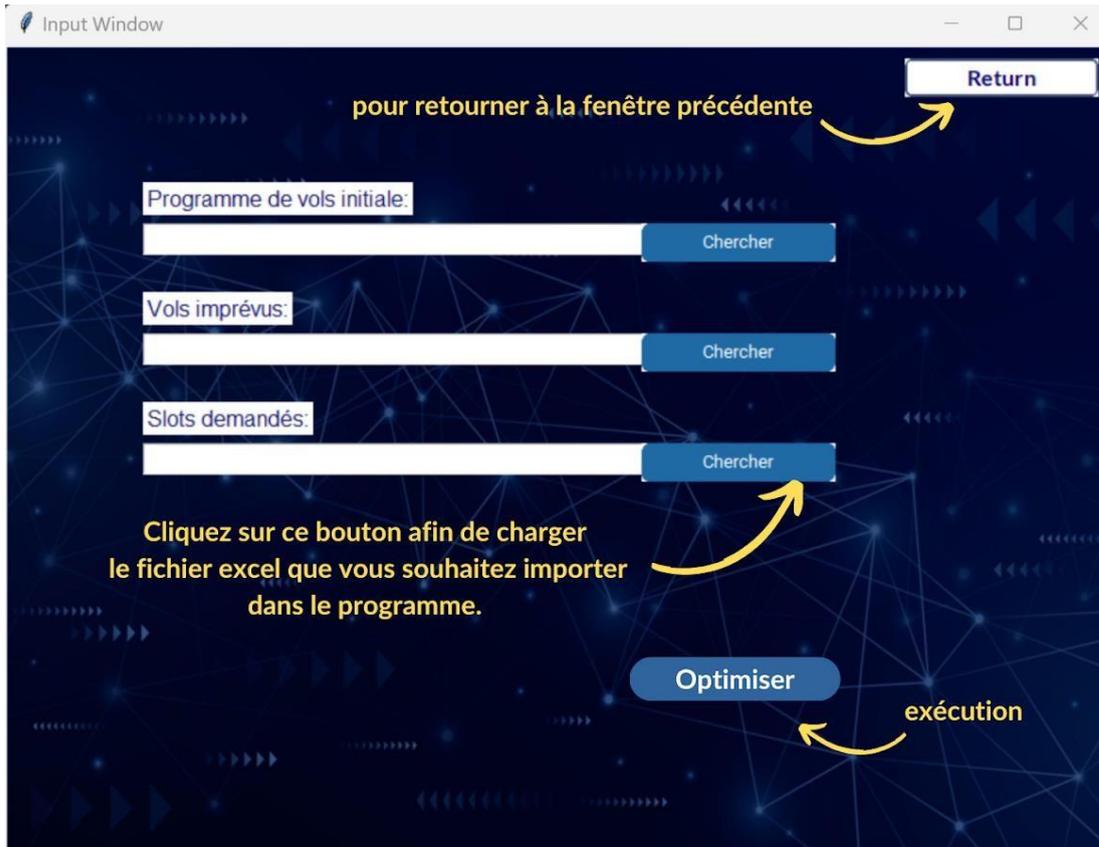


Figure 31: Fenêtre d'opération

(Source : élaboré par les étudiants)

Les fichiers Excel (.xlsx) sous forme suivante :

ID	Intervalle.Départ	Avion	Periode interdite
10001	[1030-1140]	B738	[(0,959) , (1081 ,1439)]
10002	[1080-1220]	B738	[(0, 999) , (1101, 1439)]
10003	[1095-1170]	B738	[(0, 1094) , (1216,1439)]
10004	[1140-1280]	B738	[(0,1139) , (1261, 1439)]
10005	[960,1005]	Q400	[(0,959),(1125,1439)]
10006	[1080,122]	B738	[(0,1097),(1340,1439)]
10007	[960,1080]	B738	[(0,1064),(1066,1439)]
10008	[1000,1080]	B738	[(0,1074),(1076,1439)]
10009	[1140,1260]	Q400	[0,1139),(1380,1439)]
10010	[480,690]	B738	[(0,479),(810,1439)]
10011	[480,645]	B738	[(0,479),(765,1439)]

Figure 32: Fichier Excel des vols imprévus

(Source : élaboré par les étudiants)

Chapitre 3 : Formulation mathématique et résolution du problème

Vol	ID	Instant	Avion	Intervalle de départ
ALG - HME	1	310	B738	[250, 505]
ALG - HRM	2	480	Q400	[450, 675]
ALG - CDG	3	495	B738	[435, 825]
ALG - HME	4	495	B738	[435, 690]
ALG - HME	5	525	B738	[465, 720]
ALG - AZR	6	550	B738	[490, 780]
ALG - DAEN	7	705	Q400	[675, 925]
ALG - CZL	8	780	B738	[720, 945]
ALG - ORN	9	945	B738	[885, 1125]
ALG - CDG	10	955	B738	[895, 1285]
ALG - IAM	11	960	Q200	[930, 1245]
ALG - BJA	12	960	Q400	[930, 1125]
ALG - CDG	13	1000	B738	[940, 1330]
ALG - HME	19	450	B738	[390,645]
ALG - HME	20	480	B738	[420,675]
ALG - TMR	21	480	Q400	[450, 785]
ALG - BLJ	22	505	B738	[445,675]
ALG - ORN	23	510	B738	[450,690]
ALG - HME	24	570	B738	[510,765]
ALG - HME	25	680	B738	[620,875]
ALG - AZR	26	840	Q400	[810,1090]
ALG - CZL	27	930	B738	[870,1105]
ALG - BLJ	28	1020	B738	[960,1190]
ALG - HME	29	1080	B738	[1020,1275]
ALG - SSH	30	1140	B738	[1080,135]
ALG - CBH	31	1140	Q400	[1110,1380]
ALG - TMR	32	1140	B738	[1080,1405]

Figure 33: Fichier Excel des vols programmé

(Source : élaboré par les étudiants)

V.2.3.1 Importation des données :

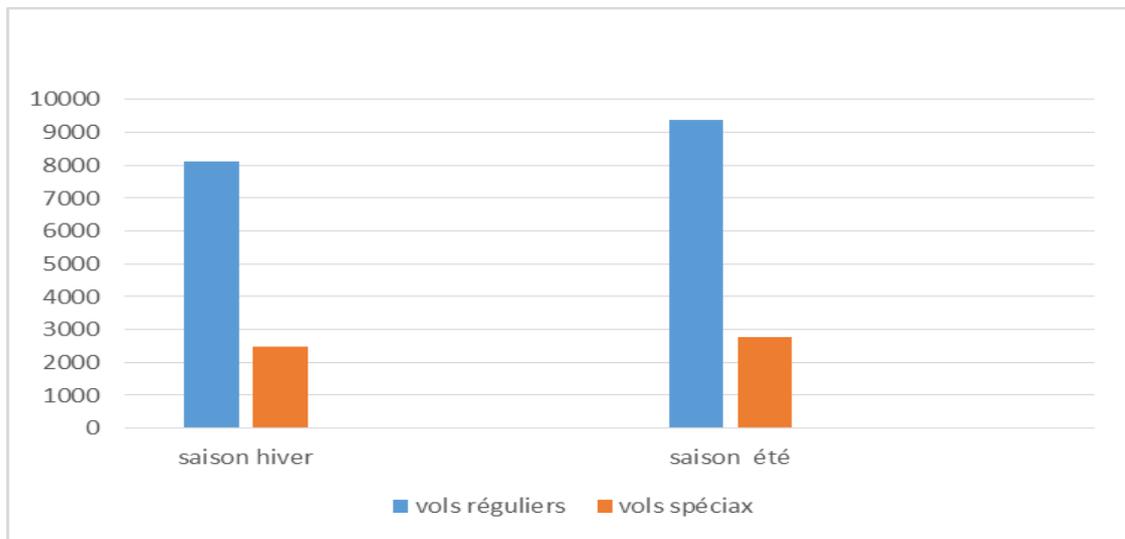


Figure 34 : Graphique des vols par saison de la compagnie Tassili Airlines durant l'année 2023

(Source : élaboré par les étudiants)

Selon l'IATA, l'association à laquelle TAL est membre, le programme de vol de la compagnie est structuré en deux saisons distinctes été et hiver, cette division permet la planification des horaires de vol en fonction des variations saisonniers de la demande et des conditions météorologiques. D'après le graphe ci-dessus, on remarque que la saison estivale connaît une forte affluence des vols spéciaux (imprévus) par rapport à la saison hivernale.

Lors de l'importation des données, Nous avons récupéré le programme de vol mensuelle de la compagnie du mois d'août précédent étant données qu'il représente le mois le plus chargé.

Le fichier Excel avait la forme suivante :

Tassili Airlines			DEPARTURES / ARRIVALS BY AIRPORT						
Lun., 11 mars 2024			FROM 01/08/2023 to 31/08/2023, in Local times						
DATE	DEP-ARR	FLIGHT	AC	CHAR	REG	TP	FC	PAX	
			TYPE					Tot	JIS
mar 1ao02023	ALG - TIN	1880	738		7T-VCT	P	32	0	0
	SSH - ALG	5515	738		7T-VCE	M	36	142	1
	TIN - ALG	1883	738		7T-VCA	C	32	119	0
	TIN - ALG	1881	738		7T-VCT	C	32	113	0
	ALG - HME	1100	738		7T-VCF	C	01	0	0
	HME - ALG	1803	738		7T-VCD	C	22	127	0
	DAEF - DAEN	1210	DH4		7T-VCL	C	06	0	1
	HME - TEE	1114	738		7T-VCF	C	01	125	0
	IAM - ELU	1342	DH4		7T-VCO	C	07	73	1
	HRM - OSF	1504	DH2		7T-VCS	C	09	27	1
	ALG - HRM	1518	DH4		7T-VCM	C	08	30	1
	DAEN - TGR	1412	DH2		7T-VCR	C	05	19	1
	ALG - CDG	AH1000	738		7T-VCA	J	26	0	0
	ALG - HME	1120	738		7T-VCE	C	01	153	0
	DAEN - ALG	1401	DH4		7T-VCL	C	04	43	1
	IAM - HME	1967	738		7T-VCC	C	45	151	0
	IAM - ORN	1325	738		7T-VCB	C	03	136	0
	ALG - HME	1124	738		7T-VCT	C	01	86	0
	TEE - HME	1115	738		7T-VCF	C	01	52	0
	ALG - AZR	1990	738		7T-VCD	C	43	106	0
	HRM - CZL	1518	DH4		7T-VCM	C	08	54	0
	TGR - TEE	1412	DH2		7T-VCR	C	05	5	0
	ELU - LOO	1342	DH4		7T-VCO	C	07	69	0
	OSF - HRM	1505	DH2		7T-VCS	C	09	15	0
	HME - CZL	1130	738		7T-VCE	C	01	141	0
	HME - CZL	1967	738		7T-VCC	C	45	62	0

Figure 35 : Programme de vols

(Source : Tassili Airlines)

On a converti les instants de départ des vols en utilisant la règle suivante :

$$00h00 = 1, 00h01 = 2, 01h00 = 60, 02h00 = 120... \text{ etc.}$$

On a sélectionné les vols dont l'aéroport de départ est Alger (ALG) pour le premier jour de ce mois du fait que notre modèle d'optimisation est fixé pour une journée et pour un seul aéroport de départ. Les données dont nous aurons besoin concernant les slots :

Slots = $S1 \cup S2$ tel que :

$S1$: l'ensemble des slots déjà programmés et :

$S1 = [\text{heure de dé part} - \text{temps de préparation}, \text{heure d'arrivée} + \text{tolérance}]$.

$S2 =$ l'ensemble des slots obtenues après une demande de la part de l'aéroport.

VI. Adaptation de l'algorithme génétique au problème :

Population : L'ensemble de toutes les solutions considérées à chaque génération de l'algorithme.

Individu : chaque solution ou individu est un vecteur de taille $n+m$ tel que $n+m$ est le nombre total de vols.

Chromosome : un chromosome est une séquence ordonnée de gènes qui, ensemble, représentent une solution complète au problème.

Gène : un gène représente l'instant de la journée auquel un vol (imprévu ou programmé) est planifié.

Bits : chaque bit de ce vecteur indique si le vol i est programmé à l'instant j .

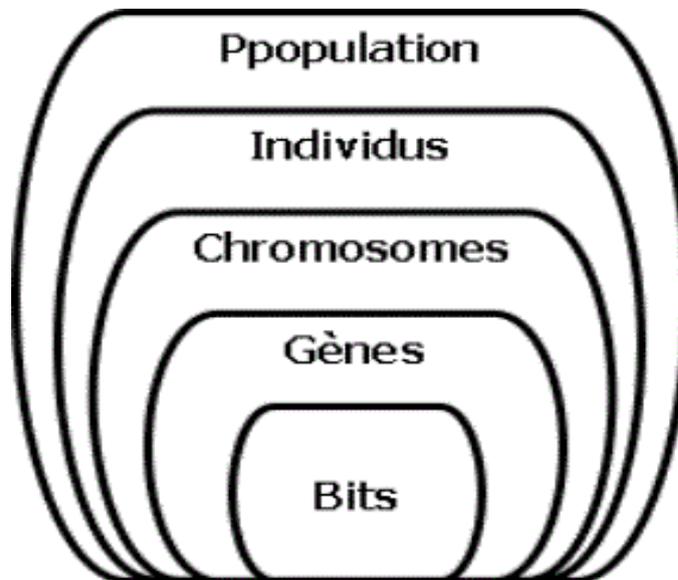


Figure 36: Les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétique

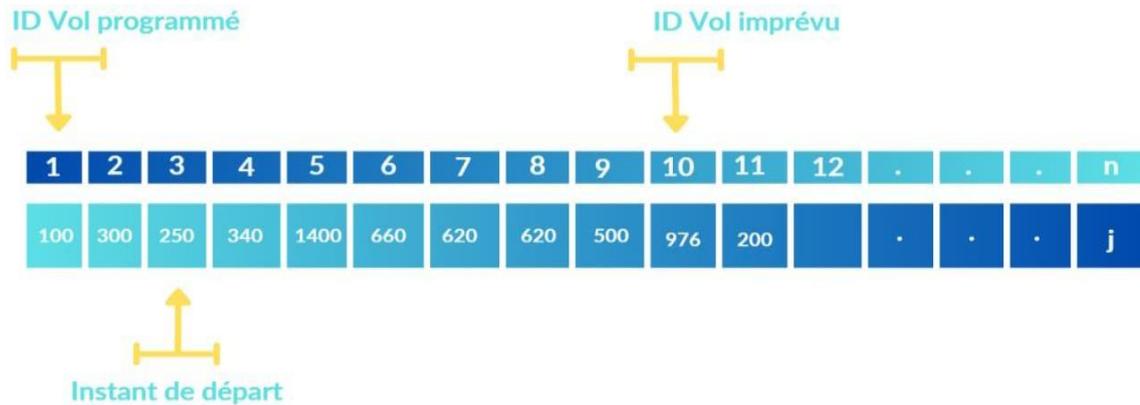


Figure 37: Exemple de codification des chromosomes

(Source : élaboré par les étudiants)

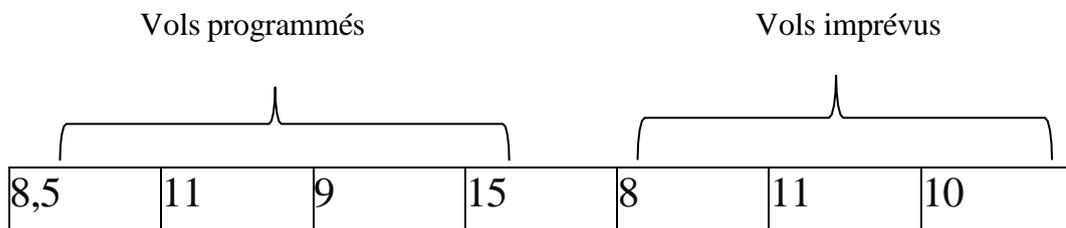
VII. Adaptation de l'algorithme NSGA 2 au problème :

VII.1 La première étape : Initialisation

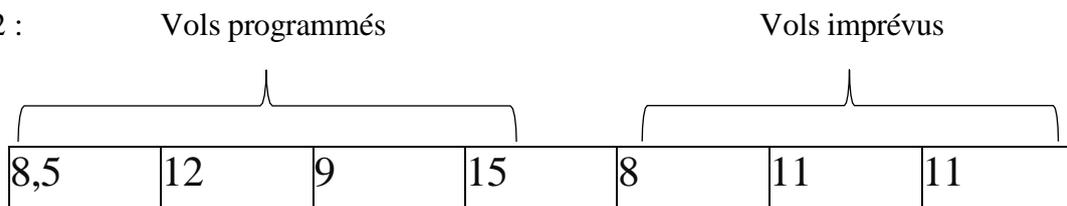
Cette étape consiste à générer toutes les solutions possibles d'affectation des nouveaux créneaux aux vols déjà programmés et à inclure les nouveaux vols avec un minimum de perturbations possible (en utilisant l'heuristique présenté dans la page 45).

Exemple illustratif : l'exemple suivant montre l'initialisation des solutions candidates qui correspond à l'ensemble des solutions potentielles de notre processus d'optimisation.

S1 :



S2 :



VII.2 La deuxième étape : Exécution de l'algorithme NSGA-II

L'algorithme NSGA-II est utilisé pour optimiser les solutions générées lors de l'initialisation. Il se déroule en plusieurs étapes :

❖ **Evaluation de la population :**

Algorithm 1: Évaluation de la population dans NSGA-II

Entrées: P de taille N , n , m , x_{ij} et y_{ij}

Sortie : P avec les valeurs $Z1$ et $Z2$

```

1 for chaque individu  $p$  dans  $P$  do
2   | Calculer  $Z1(p) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{1440} x_{ij} \cdot p[i, j]$ 
3   | Calculer  $Z2(p) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{1440} |x_{ij} - y_{ij}| \cdot p[i, j]$ 
4   | Stocker  $Z1(p)$  et  $Z2(p)$  comme attributs de l'individu  $p$ 
5 end

```

Algo 4 :Pseudo-code de l'évaluation de la population

❖ **Tri non dominé (Non-dominated Sorting) :**

Les solutions sont classées en fronts de Pareto basés sur leur domination. Les solutions du premier front ne sont dominées par aucune autre, celles du second front sont dominées par celles du premier front, et ainsi de suite. Prenant 5 solutions de notre population initiale pour un exemple illustratif ;

Tableau 4: 5 solutions d'une population initiale

Solution	Z1	Z2
Sol1	20	8
Sol2	18	7
Sol3	22	9
Sol4	19	6
Sol5	21	7

On commence par l'attribution des rangs, pour chaque fonction objective on doit trier la population en ordre décroissant pour Z1 (max) et en ordre croissant pour Z2(min). Ensuite nous attribuons des rangs en fonction de l'ordre dans lequel les solutions apparaissent après le tri.

- Tri selon Z1 : Sol3, Sol5, Sol4, Sol1, Sol2
- Tri selon Z2 : Sol4, Sol2, Sol5, Sol1, Sol3

Tableau 5: Attribution des rangs

Solution	Rang Z1	Rang Z2
Sol1	4	5
Sol2	5	2
Sol3	1	4
Sol4	3	1
Sol5	2	2

❖ **Calcul de Distance de Crowding :**

Formule de distance_crowding = $|\text{rang Z1} - \text{rang Z2}|$

Tableau 6: Calcul de distance de crowding pour les 5 solutions

Solution	Distance de crowding
Sol1	$ 4-5 =1$
Sol2	$ 5-2 =3$
Sol3	$ 1-4 =3$
Sol4	$ 3-1 =2$
Sol5	$ 2-2 =0$

A la fin de ces étapes, chaque solution de la population aura un rang attribué et une distance de crowding calculée. Ces informations sont essentielles pour les prochaines étapes de sélection.

- ❖ **Sélection** : Les solutions sont sélectionnées pour former une nouvelle population

Algorithm 1: Sélection des parents par tournoi

Input: population de taille N , taille_tournoi T
Output: parents sélectionnés

```
1 parents ← [];  
2  $N$  ← taille de la population;  
3 while longueur(parents) <  $N$  do  
4   | candidats_tournoi ← échantillon aléatoire de  $P$  de taille  $T$ ;  
5   | meilleur_candidat ← None;  
6   | for candidat dans candidats_tournoi do  
7     | if meilleur_candidat = None ou  
       | (EvaluerZ1(candidat) < EvaluerZ1(meilleur_candidat))  
       | then  
8       | | meilleur_candidat ← candidat;  
9       | end  
10      | else if EvaluerZ1(candidat) = EvaluerZ1(meilleur_candidat)  
        | then  
11        | | if EvaluerZ2(candidat) > EvaluerZ2(meilleur_candidat)  
          | | then  
12          | | | meilleur_candidat ← candidat;  
13          | | end  
14          | end  
15      | end  
16      | Ajouter meilleur_candidat à parents;  
17 end  
18 return parents;
```

Algo 5: Pseudo-code de la Sélection des parents par tournoi

Prenant 5 solutions déjà évaluées de notre population initiale pour un exemple illustratif ou nous allons utiliser un tournoi de taille = 2 pour sélectionner les parents.

Sol 1 : $Z1 = 3, Z2 = 12$

Sol 2 : $Z1 = 4, Z2 = 10$

Sol 3 : $Z1 = 5, Z2 = 9$

Sol 4 : $Z1 = 3, Z2 = 11$

Sol5 : $Z1 = 4, Z2 = 8$

Tournoi 1 : Sélection de 2 candidats aléatoires

- Candidat 1 : (Sol 1 : $Z1 = 3, Z2 = 12$) - Candidat 2 : (Sol 3 : $Z1 = 5, Z2 = 9$)

Comparaison basée sur la dominance :

- Sol 1 domine Sol 3 car $Z1(3 < 5)$ et $Z2(12 > 9)$, et donc le gagnant du tournoi est Sol3.

Tournoi 2 : Sélection de 2 autres candidats aléatoires

- Candidat 1 : (Sol 2 : Z1 = 4, Z2 = 10) - Candidat 2 : (Sol 5 : Z1 = 4, Z2 = 8)

Comparaison basée sur la dominance :

- Sol 5 a une meilleure Z2 ($8 < 10$), et donc le gagnant du tournoi est Sol5.

Les solutions gagnantes des tournois seront utilisées comme parents pour la prochaine génération :

- Parent 1 : (Sol 3 : Z1 = 5, Z2 = 9) - Parent 2 : (Sol5 : Z1 = 4, Z2 = 8)

❖ Croisement et mutation :

Les opérations de croisement et de mutation sont appliquées à la population sélectionnée pour créer une nouvelle génération de solutions. Ces opérations introduisent de la variation et explorent de nouvelles régions de l'espace de solutions.

Algorithm 1: Croisement SBX

Require: $P1, P2, Pc = 0.6, \eta_c = 2$

Output : $Y1, Y2$

```
1 Y1 ← copie de P1;
2 Y2 ← copie de P2;
3 for chaque variable  $i$  dans P1 et P2 do
4    $x1, x2 \leftarrow \min(P1[i], P2[i]), \max(P1[i], P2[i]);$ 
5    $\beta \leftarrow 1.0 + (2.0 \cdot (x1 - 0.0) / (x2 - x1));$ 
6    $\alpha \leftarrow 2.0 - (\beta \cdot (\eta_c + 1));$ 
7    $rand \leftarrow \text{random}();$ 
8   if  $rand \leq 1.0 - \alpha$  then
9      $\beta_q \leftarrow (rand \cdot \alpha)^{\frac{1.0}{\eta_c + 1}};$ 
10  end
11  else
12     $\beta_q \leftarrow (1.0 / (2.0 - rand \cdot \alpha))^{\frac{1.0}{\eta_c + 1}};$ 
13  end
14   $c1 \leftarrow 0.5 \cdot ((x1 + x2) - \beta_q \cdot (x2 - x1));$ 
15   $c2 \leftarrow 0.5 \cdot ((x1 + x2) + \beta_q \cdot (x2 - x1));$ 
16   $Y1[i] \leftarrow \min(\max(c1, 0.0), 1.0);$ 
17   $Y2[i] \leftarrow \min(\max(c2, 0.0), 1.0);$ 
18 end
19 return  $Y1, Y2;$ 
```

Algo 6 :Pseudo-code de Croisement SBX

Voici un exemple croisement à appliquer sur 2 parents P1 et P2, qui génère 2 nouveaux enfants Y1 et Y2. On commence par la normalisation des parents :

P1	100	375	466	250	490
P2	210	784	371	660	620

Formule de Normalisation = $\frac{P[i]-\min(P)}{\max(P)-\min(P)}$

P1 = [0.0, 0.599, 0.729, 0.306, 1.0] et **P2** = [0.0, 1.0, 0.241, 0.715, 0.672]

On applique l'algorithme :

Prenant la 1^{ère} variable (i=1), on procède de manière similaire pour les autres variables i :

On a $x_1, x_2 \leftarrow \min(0.559, 1.0), \max(0.559, 1.0)$

Beta = $1.0 + (2.0 \times (0.559 - 0.0) / (1.0 - 0.559)) = 2.09$

Alpha = $2.0 - (2.09 \times (2+1)) = -3.18$

Supposons rand = 0.4 il faut que soit $\leq 1.0 - \text{Alpha}$, Après les calculs on aura :

Y1 = [0.0, 0.684, 0.729, 0.306, 1.0]

Y2 = [0.0, 0.875, 0.241, 0.715, 0.672]

Après conversion :

Y1 = [100 , 376, 463, 251, 490]

Y2 = [210, 770, 336, 663, 657]

Algorithm 1 Mutation polynomiale

Require: $Y_1, Y_2, P_m = 20, n_m = 20$

Ensure: Y'_1, Y'_2

- 1: Pour chaque enfant Y obtenus après le croisement SBX
 - 2: choisir un paramètre de mutation $n_m = 20$
 - 3: **for** chaque dimension (instant de départ de chaque vol) **do**
 - 4: Générer une perturbation aléatoire δ selon une distribution normale centrée en zéro et d'écart type $n_m = 20$
 - 5: Appliquer la mutation $Y'_i = Y_i + \delta$
 - 6: Assurer que la nouvelle valeur générée reste dans les limites permises pour les instants de départ des vols
 - 7: **end for**
 - 8: **return** Y'_1, Y'_2
-

Algo 7:Pseudo-code de la Mutation polynomiale

Pour la mutation, il s'agit d'une perturbation des instants des enfants Y1 et Y2, continuant avec le même exemple : on a fixé le paramètre de mutation a 20 et probabilité a 0.1.

Pour Y1[1] , on calcule la perturbation Delta $\delta = (u/Pm)^{1/(1+\eta m)-1}$

Et on applique la mutation $Y1 \leftarrow Y1[1] + \delta$, et on fait la même chose pour Y2.

Les autre variables i de Y1 et Y2 sont mutées de manière similaire, voici le résultat après calculs :

Y1 =[0.0, 0.896, 0.735, 0.309, 1.0]

Y2 = [0.0, 0.900, 0.260, 0.720, 0.672]

❖ Formation de la nouvelle population :

La nouvelle génération de solutions est formée en combinant la population actuelle et la nouvelle population générée, suivie d'une nouvelle évaluation et tri non dominé.

❖ **Sélection pour la nouvelle génération :**

Algorithm 1 Sélection des individus pour la nouvelle génération

Require: P1, P2: Les parents sélectionnés

Require: Y1, Y2: Les enfants générés après croisement et mutation

Ensure: new_population

- 1: **Combine** P1, P2, Y1, Y2 pour former une population combinée
 - 2: combined_population ← [P1, P2, Y1, Y2]
 - 3: **Trier** combined_population selon Z1 (décroissant) et Z2 (croissant) pour attribuer les rangs
 - 4: **Calculer** les distances de crowding
 - 5: **Sélectionner** les meilleurs individus
 - 6: **Retourner** new_population
-

Algo 8 :Pseudo-code de Sélection des individus pour la nouvelle génération

VII.3La troisième étape : Génération du fichier final

Enfin, le programme génère un fichier Excel contenant le nouveau programme de vol. Ce fichier inclut toutes les informations nécessaires pour la mise en œuvre du plan de vol, y compris les horaires des vols et les créneaux affectés :

	A	B	C	D	E	F
	ID Vol	Heure de Départ	Avion	ID Vol.imprévu	Heure de Départ	Avion
1	1	08:00	B737	24	09:00	B737
2	2	09:30	Q400	25	10:45	Q400
3	3	11:15	B737	26	12:30	B737
4	4	13:00	Q200	27	14:15	Q200
5	5	14:45	Q400	28	16:00	B737
6	6	16:30	Q400	29	17:45	Q400
7	7	18:15	B737	30	19:30	B737
8	8	20:00	Q400			
9	9	21:45	B737			
10	10	23:30	Q200			
11	11	01:15	B737			
12	12	03:00	Q400			
13	13	04:45	B737			
14	14	06:30	Q200			
15	15	08:15	B737			
16	16	10:00	Q400			
17	17	11:45	B737			
18	18	13:30	B737			
19	19	15:15	B737			
20	20	17:00	Q400			
21	21	18:45	B737			
22	22	20:30	Q200			
23	23	22:15	B737			

Figure 38 : Output Flight-Opt

(Source : élaboré par les étudiants)

Constat :

Les vols de 1 jusqu'à 23 se sont des vols déjà programmés, les vols : **3, 6, 7, 17 et 18** ont été perturbés (indiqués en gras) pour libérer de l'espace afin d'intégrer les vols imprévus au programme initiale.

Les vols de 24 jusqu'à 30 ce sont des vols imprévus, ils ont été efficacement intégrés avec des heures de départs.

VIII. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exploité notre modèle mathématique pour développer le logiciel, réorganiser nos données, par la suite nous avons cité les outils utilisés pour exécuter notre programme.

Enfin, on a fait un constat sur les résultats obtenus après l'exécution par rapport aux objectifs ciblés pour répondre à la problématique.

Chapitre 4 : Implémentation, Résultats Et Recommandations

I. Introduction

Le présent chapitre se concentre sur l'implémentation des méthodes et l'interprétation des résultats obtenus ainsi que les perspectives attendues suite à ce travail. Nous commencerons par analyser les résultats obtenus issue de la méthode de résolution présentée dans le chapitre précédent. Ensuite, nous ferons le point sur notre problématique initiale et nous réaliserons une étude comparative entre notre solution proposée et la solution de l'entreprise. Enfin, nous proposerons des recommandations pour la compagnie.

II. Implémentation :

II.1 La déclaration sur python et la Construction du modèle par Pyomo:

La modélisation constitue un processus essentiel qui permet de formuler une représentation simplifiée d'un système ou d'un modèle donnée. Pour pouvoir créer l'interface graphique, manipuler les données et effectuer les calculs numériques, on doit faire appel aux bibliothèques suivantes :

```
1 import tkinter as tk
2 from tkinter import messagebox
3 from customtkinter import CTKButton
4 import pandas as pd
5 import numpy as np
```

Et pour manipuler les données, il est nécessaire de lire les fichiers Excel et charger leurs contenus dans un Data frame Pandas, Les 3 fichiers Excel en question représentent les vols imprévus, Vols programmés, et Slots demandés.

```
1 import pandas as pd
2
3 # Chemins des fichiers Excel
4 file_path_vp = r'C:\Users\SURFACE\Desktop\input vol\V.P.xlsx'
5 file_path_vi = r'C:\Users\SURFACE\Desktop\input vol\V.I.xlsx'
6 file_path_sd = r'C:\Users\SURFACE\Desktop\input vol\S.D.xlsx'
7
8 # Charger les fichiers Excel
9 try:
10     df_vp = pd.read_excel(file_path_vp)
11     df_vi = pd.read_excel(file_path_vi)
12     df_sd = pd.read_excel(file_path_sd)
13
```

Data sur les fichiers Excel :

ID	Intervalle.Départ	Avion	Periode interdite
10001	[1030-1140]	B738	[(0,959) , (1081 ,1439)]
10002	[1080-1220]	B738	[(0, 999) , (1101, 1439)]
10003	[1095-1170]	B738	[(0, 1094) , (1216,1439)]
10004	[1140-1280]	B738	[(0,1139) , (1261, 1439)]
10005	[960,1005]	Q400	[(0,959),(1125,1439)]
10006	[1080,122]	B738	[(0,1097),(1340,1439)]
10007	[960,1080]	B738	[(0,1064),(1066,1439)]
10008	[1000,1080]	B738	[(0,1074),(1076,1439)]
10009	[1140,1260]	Q400	[0,1139),(1380,1439)]
10010	[480,690]	B738	[(0,479),(810,1439)]
10011	[480,645]	B738	[(0,479),(765,1439)]

Figure 39 : Fichier Excel des vols imprévus.

Vol	ID	Instant	Avion	Intervalle de départ
ALG - HME	1	310	B738	[250, 505]
ALG - HRM	2	480	Q400	[450, 675]
ALG - CDG	3	495	B738	[435, 825]
ALG - HME	4	495	B738	[435, 690]
ALG - HME	5	525	B738	[465, 720]
ALG - AZR	6	550	B738	[490, 780]
ALG - DAEN	7	705	Q400	[675, 925]
ALG - CZL	8	780	B738	[720, 945]
ALG - ORN	9	945	B738	[885, 1125]
ALG - CDG	10	955	B738	[895, 1285]
ALG - IAM	11	960	Q200	[930, 1245]
ALG - BJA	12	960	Q400	[930, 1125]
ALG - CDG	13	1000	B738	[940, 1330]
ALG - HME	19	450	B738	[390,645]
ALG - HME	20	480	B738	[420,675]
ALG - TMR	21	480	Q400	[450, 785]
ALG - BLJ	22	505	B738	[445,675]
ALG - ORN	23	510	B738	[450,690]
ALG - HME	24	570	B738	[510,765]
ALG - HME	25	680	B738	[620,875]
ALG - AZR	26	840	Q400	[810,1090]
ALG - CZL	27	930	B738	[870,1105]
ALG - BLJ	28	1020	B738	[960,1190]
ALG - HME	29	1080	B738	[1020,1275]
ALG - SSH	30	1140	B738	[1080,135]
ALG - CBH	31	1140	Q400	[1110,1380]
ALG - TMR	32	1140	B738	[1080,1405]

Figure 40 :Fichier Excel des vols programmés

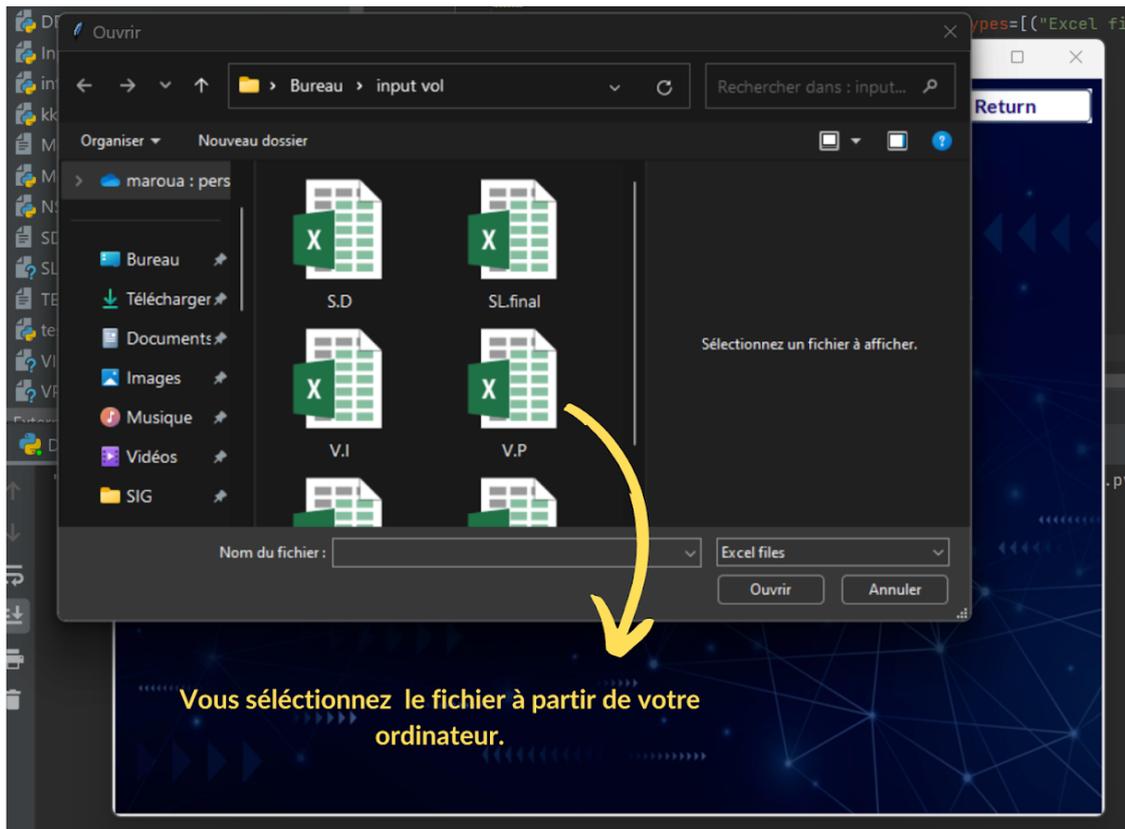


Figure 41: L'étape de sélection des fichiers Excel (.xlsx).

Algorithm 1: Transformation des données

```

input : programme_vols
output: Matrice  $Y$ 

// Obtenir les instants de départ uniques
1 initialiser instants_depart  $\leftarrow$  Liste vide;
2 foreach vol dans programme_vols do
3   | if vol.instant_depart  $\notin$  instants_depart then
4   |   | Ajouter vol.instant_depart à instants_depart;
5   | end
6 end

// Trier les instants de départ uniques
7 Trier instants_depart par ordre croissant;

// Créer la matrice  $Y$ 
8  $Y \leftarrow$  Matrice de dimensions  $m \times (s + 1)$  initialisée à 0;
9  $Y[:, 0] \leftarrow$  Identifiants des vols dans programme_vols;
10  $m \leftarrow$  Nombre d'instant de départ uniques dans instants_depart;
11 foreach vol dans programme_vols do
12   |  $j \leftarrow$  Index de vol.instant_depart dans instants_depart;
13   |  $i \leftarrow$  Index du vol dans programme_vols;
14   |  $Y[i, j] \leftarrow 1$ ;
15 end

```

Algo 9 :Pseudo-code de transformation des données

id_vol	07:45	08:00	09:45	10:00	...	15:30	16:15	16:45	17:00	18:30
1	0	0	0	1	...	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	...	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
6	0	1	0	0	...	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	...	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	...	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	...	0	1	0	0	0
12	0	0	0	0	...	0	0	0	0	1
13	1	0	0	0	...	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	...	0	0	0	1	0
17	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	...	0	0	1	0	0

Figure 42:Exemple de transformation des données sur Pycharm

(Source : élaboré par les étudiants)

Ci-dessous la modélisation de notre problème sous Pyomo :

```
1 from pyomo.environ import *
2
3 model = ConcreteModel()
4
5 model.I = RangeSet(1, n)
6 model.J = RangeSet(1, 1440)
7 model.m = Param(initialize=m)
8 model.n = Param(initialize=n)
9
10 model.T = Param(model.I, within=NonNegativeReals)
11 model.y = Param(model.I, model.J, within=Binary)
12
13 model.x = Var(model.I, model.J, within=Binary)
14
15 def contrainte_vols_programmes(model, i):
16     if i <= m:
17         return sum(model.x[i, j] for j in model.J) == 1
18     return Constraint.Skip
19
20 model.Constraint1 = Constraint(model.I, rule=
    ↪ contrainte_vols_programmes)
21
22 def contrainte_vols_non_programmes(model, i):
23     if i > m:
24         return sum(model.x[i, j] for j in model.J) <= 1
25     return Constraint.Skip
```

```
26
27 model.Contrainte2 = Constraint(model.I, rule=
    ↪ contrainte_vols_non_programmes)
28
29 def contrainte_periodes_interdites(model, i):
30     return sum(model.x[i, j] for j in model.Ii[i]) == 0
31
32 model.Contrainte3 = Constraint(model.I, rule=
    ↪ contrainte_periodes_interdites)
33
34 def contrainte_tolerance(model, i):
35     if i <= m:
36         return sum((j - k) * model.x[i, j] for j in model.J
    ↪ for k in model.J if model.y[i, k]) <= model.T[
    ↪ i]
37     return Constraint.Skip
38
39 model.Contrainte4 = Constraint(model.I, rule=
    ↪ contrainte_tolerance)
40
41 def contrainte_pas_de_reprogrammation_avant_temps_programme(
    ↪ model, i):
42     if i <= m:
```

```
43         return sum(model.x[i, j] for j in model.J if j < k)
    ↪ == 0
44     return Constraint.Skip
45
46 model.Contrainte5 = Constraint(model.I, rule=
    ↪ contrainte_pas_de_reprogrammation_avant_temps_programme
    ↪ )
47
48 def objectif_maximiser_vols_non_programmes(model):
49     return sum(model.x[i, j] for i in model.I for j in model
    ↪ .J)
50
51 model.Obj1 = Objective(rule=
    ↪ objectif_maximiser_vols_non_programmes, sense=maximize
    ↪ )
52
53 def objectif_minimiser_perturbations(model):
54     return sum(abs(model.x[i, j] - model.y[i, j]) for i in
    ↪ model.I for j in model.J)
55
56 model.Obj2 = Objective(rule=objectif_minimiser_perturbations
    ↪ , sense=minimize)
```

Pour pouvoir modéliser un problème (programme) mathématique sur Pyomo, on doit bien Respecter les étapes suivantes :

(a) Comme première étape on devrait faire appel à la bibliothèque de pyomo et créer un modèle qui va contenir les éléments du modèle mathématique.

(b) Déclarer les variables en utilisant la fonction Pyomo Var et ses attribuent. Les variables peuvent avoir plusieurs indices qui sont à leurs tours indexé à d'autres ensembles. Les directives optionnelles que peut prendre une variable sont les suivants : bounds = Fonction qui donne une paire de bornes (inférieure, supérieure) pour la variable. initialize = Une fonction qui donne une valeur de départ pour la variable, ceci est particulièrement important pour les modèles non linéaires. within = (synonyme de domaine).

(c) Définir les paramètres représentant les données requises pour réaliser l'optimisation. Dans certains contextes, le terme "données" est utilisé à la place de "paramètres".

(d) Formuler les contraintes : les équations, les inégalités, ou autres relations mathématiques. Les contraintes sont essentielles dans le modèle car elles permettent de définir le problème et de le résoudre.

(e) Déclarer les ensembles, et spécifier les fonctions objectives qui reflètent les buts du problème modélisé sous forme mathématique.

II.2 Implémentation du NSGA-II dans la bibliothèque DEAP :

L'implémentation de l'algorithme NSGA-II dans la bibliothèque DEAP nécessite plusieurs étapes clés et depuis l'importation des composants essentiels de la bibliothèque DEAP, tels que les structures de base pour créer des individus et des populations, ainsi que des outils et algorithmes pour la manipulation et l'optimisation., jusqu'à la mise en place des opérateurs génétique et des mécanismes de sélection tels que le tri non dominé et la distance de crowding.

```
1 import numpy as np
2 from deap import base, creator, tools, algorithms
3
4 T = 2h # Tol rance
5 n = 23 # Nbre tot de vols
6 m = 7 # Nbre de VI
7 N = 50 # Taille de P
8 Pc = 0.6 # Probabilit de croisement
9 Pm = 0.1 # Probabilit de mutation
10
11 def init_population(toolbox, n):
12     return toolbox.population(n)
13
14 def evaluate(individual):
15     return fitness1, fitness2
16
17 def fast_non_dominated_sort(population):
18     return front
19
20 def crowding_distance_assignment(front, objectives):
21     return front
22
23 def tournament_selection(population, k):
24     return selected
25
26 def simulated_binary_crossover(ind1, ind2, beta=2.0):
27     return child1, child2
28
29 def polynomial_mutation(individual, eta=20, Pm=0.1):
30     return individual
31
32 def evaluate_population(population):
33     return population
```

III. Analyse des résultats :

III.1 Evaluation des fonctions objectives :

On a simulé pour une journée de vols afin de voir l'optimalité à petite échelle. Le même principe s'applique à une simulation de plusieurs journées avec des petits changements de paramétrage.

Chapitre 4 : Implémentation, Résultats Et Recommandations

	A	B	C	D	E	F
1	ID Vol	Heure de Départ	Avion	ID Vol.imprévu	Heure de Départ	Avion
2	1	08:00	B737	24	09:00	B737
3	2	09:30	Q400	25	10:45	Q400
4	3	11:15	B737	26	12:30	B737
5	4	13:00	Q200	27	14:15	Q200
6	5	14:45	Q400	28	16:00	B737
7	6	16:30	Q400	29	17:45	Q400
8	7	18:15	B737	30	19:30	B737
9	8	20:00	Q400			
10	9	21:45	B737			
11	10	23:30	Q200			
12	11	01:15	B737			
13	12	03:00	Q400			
14	13	04:45	B737			
15	14	06:30	Q200			
16	15	08:15	B737			
17	16	10:00	Q400			
18	17	11:45	B737			
19	18	13:30	B737			
20	19	15:15	B737			
21	20	17:00	Q400			
22	21	18:45	B737			
23	22	20:30	Q200			
24	23	22:15	B737			

Au départ, il y avait 23 vols prévus pour la journée au départ de l'aéroport d'Alger. Chaque vol avait un horaire de départ dans le programme initial des vols. Après l'ajout d'une nouvelle liste des vols imprévus, une nouvelle planification a été établie. L'une des fonctions objectives de notre modèle mathématique est de **maximiser le nombre de vols imprévus à programmés**.

Ci-dessous, des graves d'intervalles de cette journée :

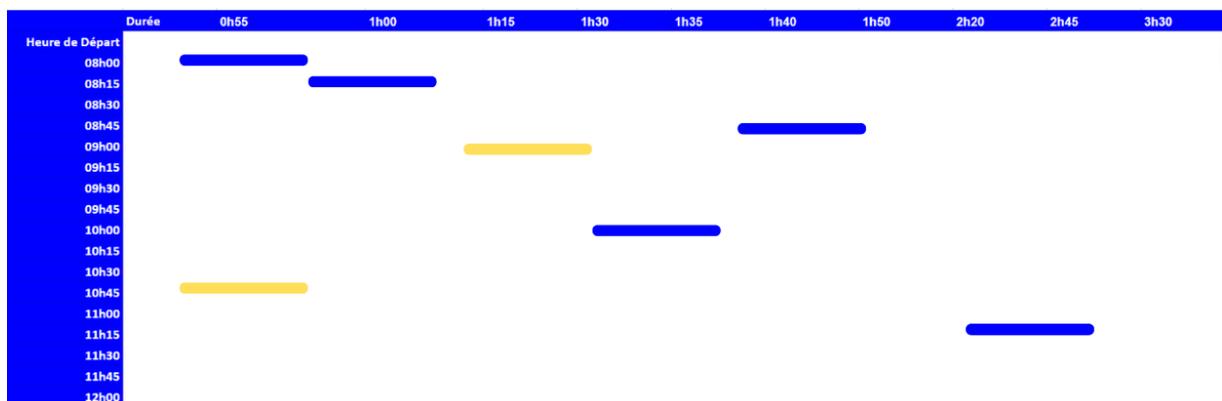


Figure 43: Vols /Matin

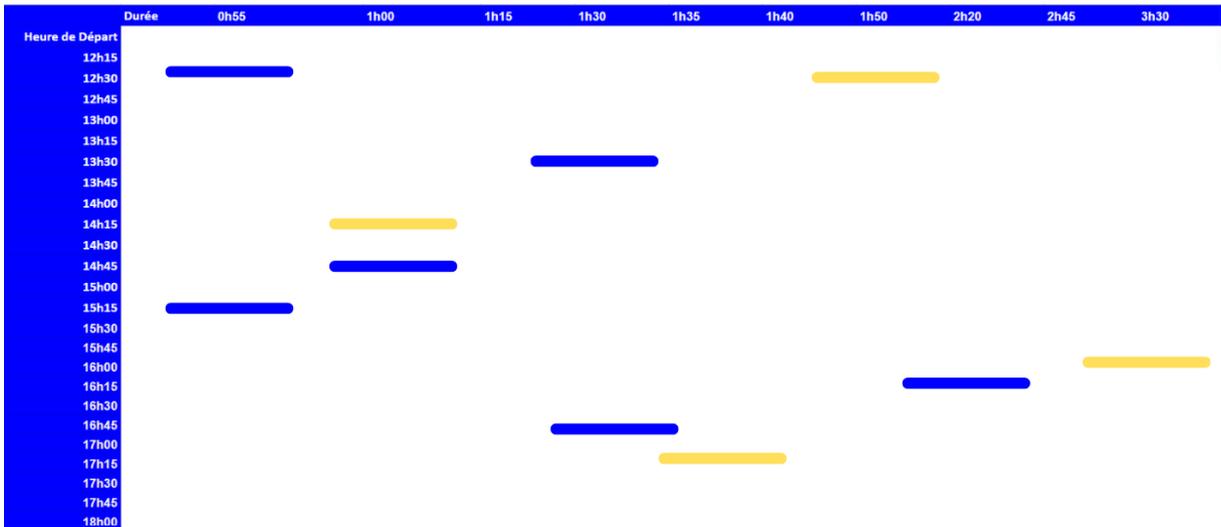


Figure 44: Vols /après-midi

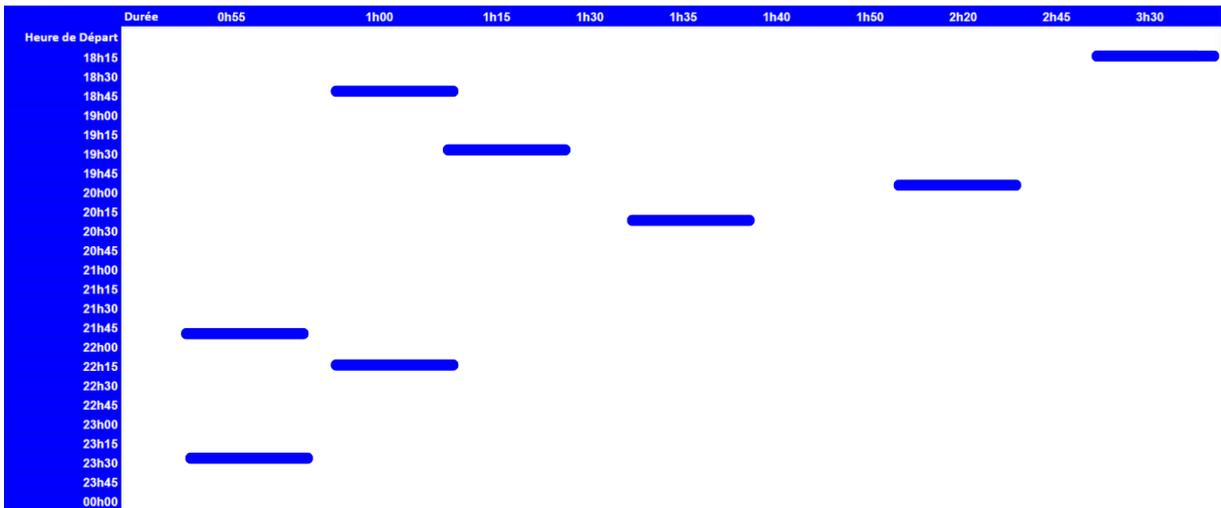


Figure 45: Vols /soir

Ces 3 graphiques illustrent les vols en fonction de leurs heures de départ et durée de vol. Le code des couleurs est le suivant : le bleu représente les vols programmés et le jaune représente les vols imprévus, on remarque que certain vol part à la même heure, qu'il n'y a pas de vols imprévus programmer pour le soir, et qu'il y a une concentration plus importante de vols l'après-midi.

Ci-dessous, un graphique qui illustre la différence entre le nombre de vols avant et après l'intégration des nouveaux vols programmés.

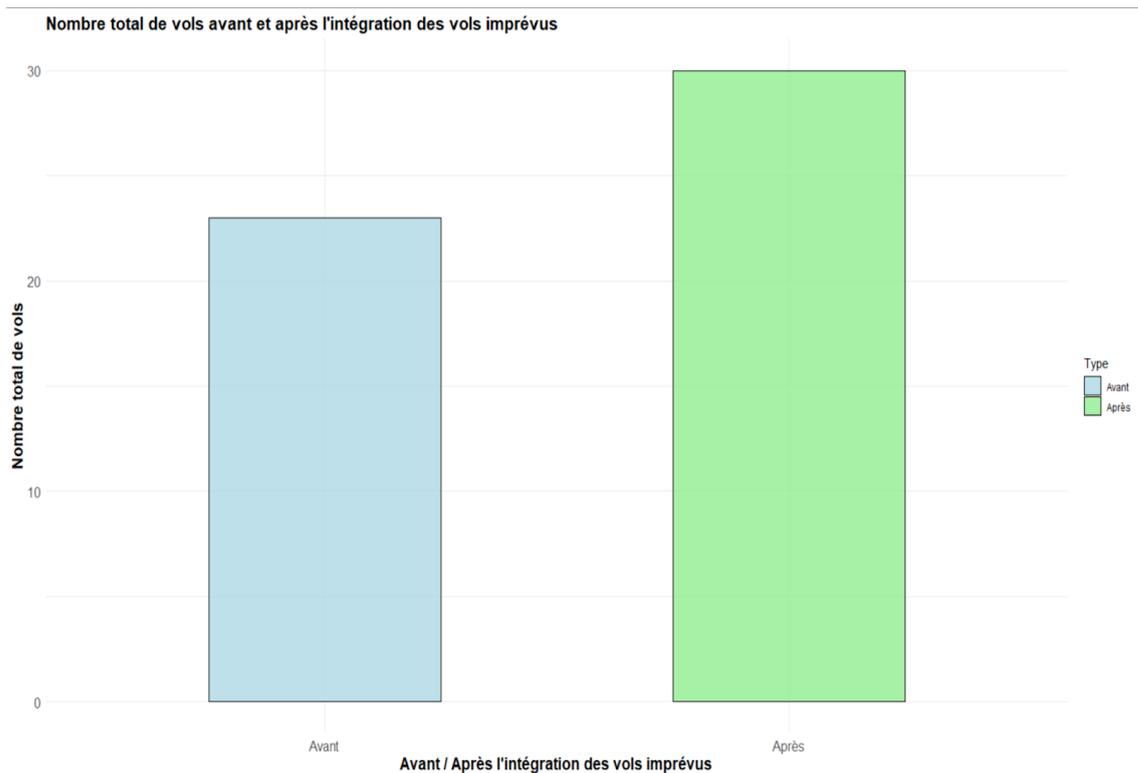


Figure 46 :Nombre de vols avant et après l'intégration des vols imprévus

(Source : élaboré par les étudiants)

On remarque une augmentation de 7 nouveaux vols intégrés au programme initial dans la même journée, ce qui révèle une récupération très bénéfique pour la compagnie aérienne.

Ce résultat démontre la capacité de la compagnie à s'adapter rapidement aux changements et à saisir les opportunités pour répondre efficacement à la demande croissante au marché aérien.

Par rapport à la 2eme fonction objective, qui consiste à minimiser les perturbations au niveau du programme de vol initial. On remarque dans ce diagramme en secteur que la proportion de vols perturbés est de 21.7% qui représente 5 vols, est très minimal par rapport au proportion de vols non perturbés qui représente 78.3% (18 vols) de la totalité des vols déjà programmés qui ont gardé leurs heure de départ initial.

Proportion de Vols Perturbés vs Non Perturbés

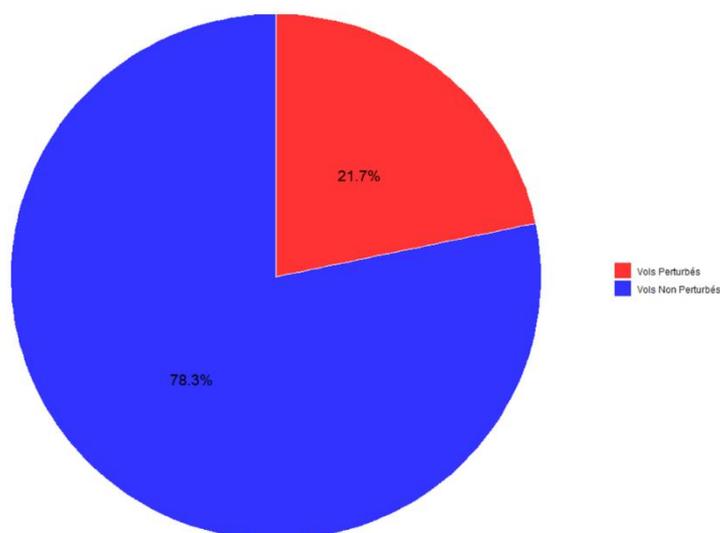


Figure 47:Proportion de vols perturbés VS non perturbés

(Source : élaboré par les étudiants)

Des contraintes ont été mises en place afin de minimiser les perturbations, comme les périodes interdites, la priorité au slots libres, et la compatibilité des intervalles de départ.

Il est essentiel de minimiser les perturbations non seulement pour maintenir l'efficacité opérationnelle de Tassili mais aussi pour éviter les changements importants dans les horaires de départ et garantir une expérience plus stable et prévisible pour les passagers

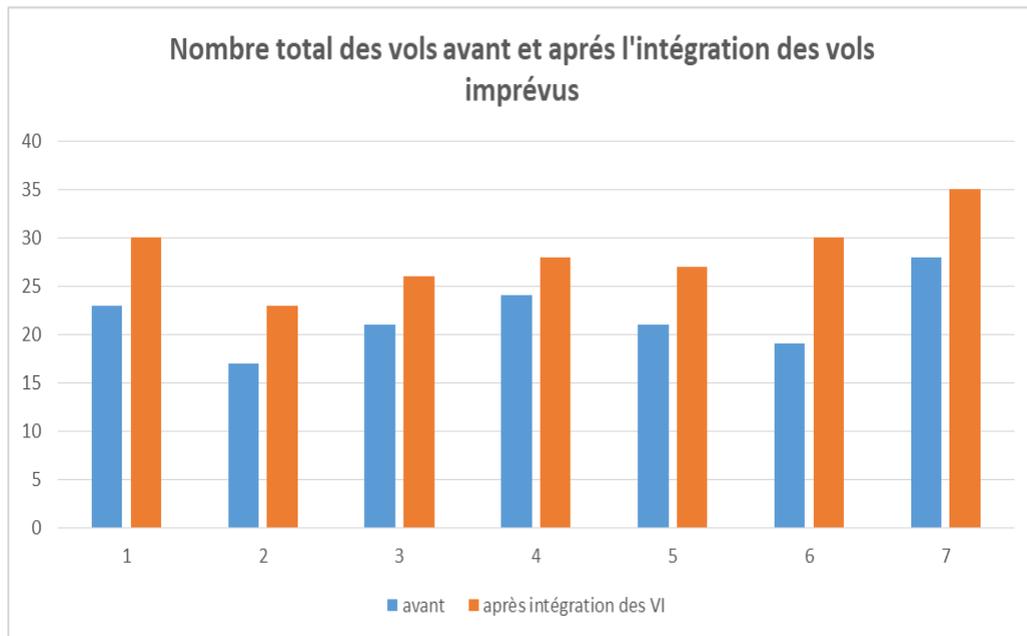


Figure 48 : Comparaison entre le nombre de vol avant et après l'intégration des vols imprévus pour une semaine donnée

D'après la figure ci-dessus, on observe une augmentation quotidienne du nombre de vols programmés. Cela indique que le modèle mathématique a intégré efficacement les vols imprévus, atteignant ainsi l'objectif de maximiser le nombre total de vols.

On constate ainsi que sur une semaine, cette augmentation quotidienne se cumule maximisant ainsi le nombre total de vols hebdomadaires notamment les vols programmées ce qui contribue à atteindre la deuxième objectif qui consiste à minimiser les perturbations ou les changements du programme initiale ce qui est certainement avantageux pour la compagnie.

IV. Comparaison entre la Compagnie VS Flight-Opt :

Afin d'analyser les distinctions entre la solution logicielle qu'on propose et celle actuellement en place au sein de l'entreprise, nous avons élaboré un tableau comparatif basé sur plusieurs critères, mettant en évidence l'optimalité de notre solution.

Tableau 7: Comparaison entre la solution de l'entreprise et la solution proposée

(Source: élaboré par les étudiants)

Critères	Gestion de Tassili Airlines	Flight-OPt
Programmation des Vols	Programmation des vols imprévus pour J+1, J+2, voir J+3	Programmation des vols imprévus le jour même (j)
Gestion des perturbations	Annulation fréquentes des vols	Minimisation des perturbations en réaffectant les vols prévus
Mode de gestion	Manuelle	Digital
Cout	plus élevé	solution rentable
Efficacité	être humain	informatique

Dans le tableau ci-dessus, nous avons analysé divers critères pour évaluer les différences entre la solution logicielle actuellement en place chez Tassili Airlines et celle que nous proposons, Flight-OPt, Voici une interprétation selon chaque critère choisit :

1.Programmation des Vols :

La gestion actuelle de la compagnie prend un à trois jours ou parfois plus pour réorganiser les vols imprévus, ce qui cause des désagréments pour les passagers et une baisse de satisfaction client. En revanche, la solution Flight-OPt permet de programmer les vols imprévus le jour même, améliorant ainsi la réactivité, la flexibilité et la satisfaction des clients en minimisant les impacts négatifs des imprévus.

2.Gestion des perturbations :

La gestion dans la compagnie entraîne souvent l'annulation des vols en cas de perturbations. Par contre, le logiciel Flight-OPt minimise les perturbations en réaffectant et en optimisant les vols, réduisant ainsi les annulations et améliorant la fiabilité des services.

3. Mode de Gestion :

La gestion actuelle des opérations dans la compagnie est manuelle, entraînant des erreurs humaines et des délais dans la prise de décision. Néanmoins, Flight-OPt digitalise la gestion, automatise les processus et améliore l'efficacité opérationnelle.

4. Cout :

Dans la compagnie, les coûts sont élevés en raison de la gestion manuelle et des annulations fréquentes qui entraînent des dépenses supplémentaires. Par contre, Flight-OPt est une solution rentable, réduisant les coûts grâce à l'automatisation et à l'optimisation des opérations, permettant ainsi une diminution des perturbations.

5. Efficacité :

Chez Tassili Airlines, l'efficacité dépend de l'être humain, ce qui peut entraîner des variations de performance dues aux erreurs humaines et aux capacités individuelles. En revanche, Flight- OPt repose sur des systèmes informatiques automatisés qui assurent une performance rapide et plus précise.

V. Avantages du logiciel OPT-flight :

Dans le but d'atteindre les objectifs fixés dans ce travail, nous avons constaté la nécessité de développer un outil d'aide à la décision efficace et rapide en utilisant le langage de programmation python dont l'interface garantit une facilité aux utilisateurs.

Notre solution se caractérise par son optimalité, sa performance et son caractère économiquement avantageux garantissant ainsi une réduction significative des coûts pour la compagnie. En effet, notre solution proposée qui consiste à intégrer les vols imprévus dans les créneaux horaires des vols programmés, sinon utiliser les slots demandés ou perturber les vols programmé afin d'ajouter ces vols imprévus est plus rentable pour la compagnie en terme de coût puisque, lorsque des circonstances imprévues surviennent et perturbent le plan de vol, il est préférable de trouver des solutions alternatives pour maintenir le vol en opération plutôt que d'annuler le vol et de causer des désagréments tant pour les passager que pour la compagnie aérienne.

En fait, la compagnie aérienne paie des prestations à l'aéroport pour maintenir ses vols. Ces prestations peuvent inclure des frais d'utilisation des installations aéroportuaires telles que les

pistes, les passerelles, les frais relatifs à l'obtention, la location ou le maintien des slots horaires et les frais liés aux services de bus pour le transport terrestre des passagers à l'aéroport.

De plus, notre solution proposée offre de nombreux avantages, elle contribue à :

- Accroître la satisfaction des clients : En perturbant un vol plutôt que de l'annuler, sont plus susceptibles d'être satisfaits car ils peuvent toujours arriver à leur destination, même avec un léger changement de plan.
- Maintien de la ponctualité : la compagnie aérienne peut maintenir sa réputation de ponctualité en veillant à ce que les vols continuent de fonctionner selon un horaire aussi proche que possible de l'original.
- Gestion proactive des imprévus : En optant pour la perturbation plutôt que l'annulation, la compagnie aérienne démontre sa capacité à gérer efficacement les situations imprévues et à prendre des mesures pour minimiser les perturbations pour ses passagers.

Compagnie VS Flight-OPt :



Figure 49: Logo de TAL VS logo de logiciel Flight-Opt

(Source : élaboré par les étudiants)

VI. Recommandations

Notre solution a été développée pour répondre aux défis de la gestion empirique et de la planification et l'intégration de maximum des vols imprévus tout en minimisant les perturbations des vols programmés.

Voici nos recommandations pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la satisfaction des clients de Tassili Airlines :

On recommande vivement à Tassili d'adapter notre Système d'aide à la décision Flight OPT, qui permet d'intégrer les vols imprévus dans le programme initial pour qu'il soit programmé le

jour j, tout en perturbant le moins possibles des vols déjà programmés.

Pour une coordination et une planification plus efficaces, nous recommandons de lier le système de gestion des informations aériennes (AIMS) avec Flight-Opt.

Car Tassili utilise L'AIMS pour le suivi des vols et l'affectation des PN et non pas la l'intégration des vols imprévus. Cette liaison va permettre la synchronisation en temps réel et la réduction des tâches manuelles.

Une autre particularité qu'on recommande la compagnie à appliquer, c'est la création de l'historique de chaque planification, de cette façon elle pourra être utilisée comme référence pour les vols réguliers hebdomadaires. Cela permet aussi une bonne analyse des performances passées et d'identifier les domaines nécessitant des améliorations. Cela permet aussi d'avoir une traçabilité complète de toutes les affectations.

On recommande le développement et la mise en place d'une application mobile dédiée pour améliorer la communication avec les passagers. L'application doit garantir des notifications en temps réel afin d'informer les passagers des retards, changement de porte d'embarquement, elle permet au passagers de suivre l'état de leurs vols et d'obtenir des mises à jour instantanées. Avec une partie pour le support et feedback.



Figure 50:Prototype Application mobile

(Source : élaboré par les étudiants)

De plus, d'autres perspectives ont présenté ci-dessous :

- Amélioration de l'algorithme NSGA-II : les paramètres utilisés dans cet algorithme peuvent être optimisés afin d'améliorer la performance et la convergence des résultats obtenus.
- Utilisation d'autres métaheuristiques : nous proposons de concevoir des algorithmes hybrides pour résoudre notre problème tel que les algorithmes génétiques combinés avec les méthodes de recherches locales.
- Étude et exploration : nous proposons d'examiner notre problème simultanément avec d'autres. Bien que cela augmente la complexité mais il permettra d'obtenir des résultats plus proches de la réalité.
- Définir d'autres contraintes à prendre en compte dans le modèle afin d'obtenir des résultats plus réalistes tels que les contraintes de capacités aéroportuaires.
- Dans la perspective de ce travail, notre solution vise à assister les décideurs dans l'élaboration de programmes, plutôt que de prendre des décisions finales à leur place.

VII. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus au cours de cette étude. Nous avons commencé par analyser les résultats obtenus en évaluant les fonctions objectives de notre problème. Ensuite, nous avons construit un tableau permettant de comparer notre solution proposée avec celle de l'entreprise. Enfin, nous avons exploité l'ensemble des résultats pour réaliser une analyse approfondie et formuler des recommandations en faveur de la compagnie aérienne Tassili Airlines.

Conclusion générale

La compagnie aérienne « Tassili Airlines » assure le transport aérien à l'échelle nationale et internationale. De ce fait, elle connaît de plus en plus de défis pour répondre à la demande croissante de ses passagers et optimiser ses opérations, où la recherche opérationnelle bénéficie d'une opportunité de s'intégrer facilement.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la compagnie aérienne Tassili Airlines, ensuite, nous avons déterminé ses problèmes liés à la gestion des irrégularités.

Le deuxième chapitre met la lumière sur les notions d'optimisation multi objectif ainsi que sur l'approche de résolution de ce type de problème, et les méthodes utilisées pour ce faire.

D'après notre connaissance du domaine et nos prérequis pour certains outils informatiques, dans le dernier chapitre, Nous avons pu concrétiser notre modélisation en utilisant les différentes technologies que nous disposons afin de proposer la meilleure solution possible.

En outre, nous avons réalisé une transition significative de la théorie à la pratique, nous avons mis en œuvre un algorithme métaheuristique en utilisant comme outil principal d'optimisation Python et en exploitant divers outils et bibliothèques afin de résoudre notre problème.

Ainsi dire que cette étude a atteint en grande partie son objectif fixé au départ, espérant que ça encouragera la compagnie à changer sa méthode de gestion et basculer vers des solutions basées sur les outils mathématiques et informatiques ainsi que les techniques opérationnelles.

Finalement, on peut dire que ce projet nous a permis d'aborder les problèmes réels des Compagnies de transport aérien, tout en enrichissant nos connaissances théoriques dans le domaine de la recherche opérationnelle. Comme il nous a donné la chance de nous familiariser avec le monde professionnel.

Bibliographie

Annexes

- [1] Site officiel de Tassili Airlines : <https://www.tassiliairlines.dz/> .(accessed : 02.05.24)
- [2] Tassili Airlines. (2009). MANEX A de Tassili Airlines (GÉNÉRALITÉS ET FONDEMENTS). (EDITION 2, révision 37, 2023).
- [3] Consulting, F., & Rakas, J. (2014). Defining and measuring aircraft delay and airport capacity thresholds. *Dans Transportation Research Board eBooks*.
<https://doi.org/10.17226/22428>
- [4] Cook, G. N., & Billig, B. G. (2017). *Airline Operations and Management: A Management Textbook*. Routledge.
- [5] Guest. (s. d.). INTRODUCTION à LA RECHERCHE OPÉRATIONNELLE-PDFCOFFEE.COM. pdfcoffee.com. <https://pdfcoffee.com/introduction-a-la-recherche-operationnelle-pdf-free.html>
- [6] Modèles de Recherche Opérationnelle. (2010).
<http://www.slashbin.net/ro/intro/modeles.pdf>
- [7] Polycopié du cours " Recherche opérationnelle " RO. (s. d.). https://elearn.univ-tlemcen.dz/pluginfile.php/169479/mod_resource/content/0/COURS%20RO%20SARI%20TRIQUI%20LUMIA%20FINAL.pdf
- [8] Complex Systems AI. (s.d.) Optimisation combinatoire. Récupéré le 21 mai 2024 de <https://complex-systems-ai.com/cours-lessons-theory/optimisation-combinatoire/>
- [9] Atmani, B., Guenounou, W. (2012). Optimisation des paramètres du Contrôleur PID par Algorithme Génétique Multi-objectifs (Doctoral dissertation, Université abderrahmane mira béjaia).
- [10] Gräbener, T. (2010). Calcul d'itinéraire multimodal et multiobjectif en milieu urbain (Doctoral dissertation, Université des Sciences Sociales-Toulouse I).
- [11] Saadi, L. (2007). Optimisation Multiobjectifs par Programmation Génétique(Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [12] M,Badjara , Approches exactes et approchés pour le problème du stable multiobjectif, Mémoire de Magister, université des sciences de la technologie Houari Boumedién, 2013.
- [13] Yann Collette, Patrick Siarry ; Optimisation Multiobjectif ; Septembre 2002 ; Edition Eyrolles, 75240 Paris Cedex 05, France.

- [14] Guest. (s. d.). INTRODUCTION à LA RECHERCHE OPÉRATIONNELLE - PDFCOFFEE.COM. pdfcoffee.com Récupéré sur <https://pdfcoffee.com/introduction-a-la-recherche-operationnelle-pdf-free.html>
- [15] Ramzi Ben Mhenni, Sébastien Bourguignon, Marcel Mongeau, Jordan Ninin, and Hervé Carfantan. Algorithme branch-and-bound pour l'optimisation exacte en norme l0. In XXVIIème Colloque francophone de traitement du signal et des images (GRETSI 2019), 2019.
- [16] Bouzgarrou, M. E. (1998). Parallélisation de la méthode du " Branch and Cut" pour résoudre le problème du voyageur de commerce(Thèse de doctorat). Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [17] Duharcourt, P. (1969). Introduction à la programmation dynamique. Revue économique, 182–234.
- [18] Maqrot, S. (2019). Méthodes d'optimisation combinatoire en programmation mathématique : Application à la conception des systèmes de verger-maraîcher (thèse de doctorat). Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- [19] Romanycia , M. H. J., & Pelletier, F. J. (1985). What is a heuristic? Computational intelligence, 1(1),47–58.
- [20] Taillard, E. (2002). Principes d'implémentation des métaheuristiques. Optimisation approchée en recherche opérationnelle, (pp. 57–79).
- [21] Fatiha, T. (2006). Résolution du problème de l'emploi du temps : proposition d'un algorithme évolutionnaire multiobjectif. Université Mentouri-Constantine.
- [22] Yu, X., & Gen, M.(2010). Introduction to Evolutionary Algorithms. Springer-Verlag London Limited.
- [23] GOLDBERG, D.E. (Ed). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Boston : Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989. 432 p. ISBN978-0201157673.
- [24] I. Charon, A. Germa, O. Hudry, Méthodes d'Optimisation Combinatoire ; 1996.
- [25] B Derbel & A Liefoghe: contribution à l'optimisation multi-objectif à base de décomposition (thèse de doctorat),Université de Lille ,2021.

Bibliographie

- [26] Gastineau,N (2014). Partitionnement, recouvrement et colorabilité dans les graphes (thèse de doctorat, Université de Bourgogne,France).
- [27] Python documentation .url : <https://www.python.org/> (accessed : 23.05.2024).
- [28] Pyomo documentation. url: <https://www.pyomo.org/>. (accessed : 23.05.2024).
- [29] Numpy documentation. url: <https://www.numpy.org/> (accessed : 23.05.2024) .
- [30] Tkinter documentation. url: <https://docs.python.org/fr/3/library/tkinter.html> .
(accessed : 23.05.2024).
- [31] Pandas documentation. url: <https://pandas.pydata.org/>. (accessed : 23.05.2024).
- [32] Pillow documentation. url : <https://python-pillow.org/> . (accessed : 23.05.2024).
- [33] DEAP documentation. url : <https://deap.readthedocs.io/en/master/>.
(accessed : 23.05.2024).
- [35] Pycharm documentation .url : <https://datascientest.com/pycharm-tout-savoir>
(accessed : 23.05.2024).
- [36] Latex documentation. url : <https://www.latex-project.org/> .(accessed : 23.05.2024)

Annexes

[1] *Septième Boeing 737/800 NG de la compagnie TAL*



[2] Questionnaire d'évaluation des perturbations des vols et leurs impacts sur les employés de Sonatrach



Formulaire d'évaluation des perturbations des vols de Tassili Airlines et leurs impact sur les employés de Sonatrach

Bonjour et Aidkoum mubarak 🌙!

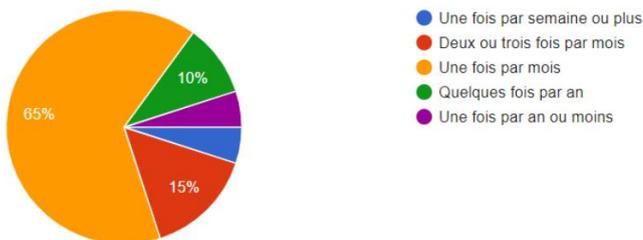
Nous vous remercions de prendre le temps de remplir ce formulaire d'évaluation concernant vos expériences de voyage avec Tassili Airlines. Votre retour d'expérience est précieux pour nous aider à améliorer nos services et à mieux répondre à vos besoins lors de vos déplacements professionnels.

Email *

Votre réponse

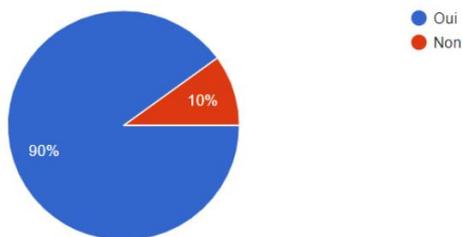
À quelle fréquence prenez-vous l'avion ?

[Copier](#)



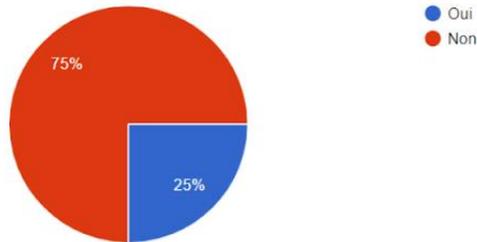
Avez-vous rencontré un report de vol lors de vos voyages avec Tassili Airlines ?

[Copier](#)



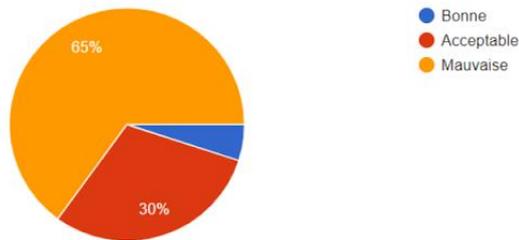
Êtes-vous satisfait du traitement des retards et annulations par la compagnie Tassili Airlines ?

[Copier](#)



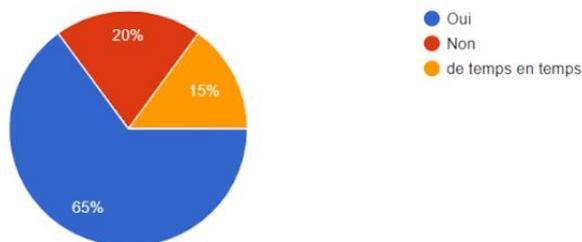
Comment évaluez-vous la communication de la compagnie Tassili Airlines avec ces clients en cas de perturbation du vols?

[Copier](#)



Les annulations ont-ils eu un impact sur votre productivité ou vos activités professionnelles ?

[Copier](#)



Avez-vous d'autres commentaires ou suggestions pour améliorer la gestion des vols avec Tassili Airlines ?

sommes fatigués psychologiquement et physiquement, et d'autre part je veux parler d'autre chose, c'est-à-dire que lorsque le vol est retardé jusqu'à 14 heures, le déjeuner doit être servi dans l'avion, car la plupart des travailleurs attendent d'arriver à Hassi Messaoud à 16 heures pour le déjeuner. Merci

Respectez simplement les horaires des vols et merci

ملخص

يتضمن مشروعنا للسنة النهائية تنفيذ أداة دعم اتخاذ القرار لصالح شركة الطيران طاسيلي للطيران. ستعمل هذه الأداة على حل مشكلتنا، التي هي مشكلة تحسين متعددة. تحسين جدول رحلاتهم وتقليل الاضطرابات الناجمة عن مختلف المخالفات ولغة البرمجة بايثون للتشفير. اخترنا استخدام طرق حل مناسبة تعتمد على ميتا-هيوريستيك NSGA-II. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أثبتت فعالية النهج المستخدم من حيث جودة الحلول وسرعة التقارب.

الكلمات المفتاحية:

النقل الجوي، بحوث العمليات، أداة دعم اتخاذ القرار، تحسين متعدد الاهداف، ميتا-هيوريستيك، خوارزمية NSGA-II

Résumé

Notre projet de fin d'étude consiste à mettre en œuvre un outil d'aide à la décision au profit de la compagnie aérienne Tassili Airlines, Ce dernier va permettre d'optimiser son programme de vol et de minimiser les perturbations engendrées par les différentes irrégularités. Afin de résoudre notre problème qui est un problème d'optimisation multi-objectif nous avons opté pour l'utilisation des méthodes de résolution adaptées basée sur l'emploi de la méta- heuristique de NSGA-II et le langage de programmation "python" pour le codage.

Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de l'approche exploitée en termes de qualité de solutions obtenues et de vitesse de convergence.

Mots clés :

Optimisation multi objectif, méta-heuristique, l'algorithme de NSGA2, irrégularités, transport aérien, Recherche opérationnelle, outil d'aide à la décision.

Abstract

Our final year project involves implementing a decision support tool for the benefit of Tassili Airlines. This tool will optimize their flight schedule and minimize disruptions caused by various irregularities. To solve our problem, which is a multi-objective optimization problem, we opted to use suitable solving methods based on the NSGA-II metaheuristic and the Python programming language for coding. The results obtained demonstrated the effectiveness of the employed approach in terms of solution quality and convergence speed.

Keywords:

Multi-objective optimization, metaheuristic, NSGA-II algorithm, irregularities, air transport, operations research, decision support tool.

