

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel  
Spécialité : Management Industriel et Logistique

Présenté par :

SID-LAKHDAR Mokhtar Nizar  
HELLOU Dounia

Thème

**Equilibrage de charges de travail pour  
la compagnie aérienne algérienne**

Soutenu publiquement, le 30/09/2020, devant le jury composé de :

M. Zaki SARI	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
M. Mehdi SOUIER	MCA	ESM. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. Fouad MALIKI	MCB	ESSA. Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
M. Mohamed BENNEKROUF	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Mme. Siham KOULOUGHLI	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019/2020

## **DEDICACE I :**

*Je dédie tout d'abord ce travail à tous mes enseignants(tes) que j'ai rencontrés dans ma vie de l'école Dar El Hadith à l'ESSA Tlemcen en passant par l'école primaire ABADJI Mahmoud, CEM El Habbak et le Lycée d'Abou-Tachefine et qui m'ont tant appris et qui m'ont donné envie d'être comme eux c'est-à-dire un transmetteur de savoir et porteur de flambeau guidant la voie de les générations futures vers le meilleur d'elle-même.*

*A ma famille et mes amis(es), pour leur amour et soutien inconditionnels.*

*A mon père Ahmed Zoheir qui a fait de moi l'homme que je suis maintenant.*

*Mokhtar Nizar SID-LAKHDAR*

## **DEDICACE II :**

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon cher et dynamique professeur Fouad MALIKI*

*Un remerciement particulier pour tous vos efforts fournis. Vous avez toujours été présent.*

*Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond  
Respect.*

*A mon enseignant de l'école primaire BELKACEM Mouafak*

*Pour l'éducation qu'il m'a prodigué.*

*Que Dieu le protège et lui offre la chance et le bonheur.*

*A tous mes enseignants que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou  
de l'enseignement supérieur.*

*A l'homme mon précieux offre du dieu qui doit ma vie ma réussite et tout mon  
respect*

*Mon cher père*

*Mohammed Khatib*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et*

*Nuit pour mon éducation et mon bien être.*

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation  
et ma formation.*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a apparié aucun effort pour me rendre heureuse mon adorable mère*

*BELHADJINE Souad*

*Ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.*

*Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour  
Exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as  
Cessé de me donner depuis ma naissance.*

*A mes très chères seours, Sarah, Imane, Meriem, Amal*

*A mes beaux-frères Omar et Ahmed*

*A mes nièces Sirine et Tesnime*

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

*Une dédicace toute particulière à ma super promotion un par un*

*Ces 3 ans ont été riches en belles émotions sur*

*Beaucoup de plans, j'en garde des souvenirs impérissables.*

*Puisse dieu vous donne sante, bonheur, courage et surtout réussite.*

*MERCI à vous !!!*

*Dounia HELLOU*

## *Remerciements*

Tout d'abord, nous tenons à remercier nos encadreurs M. Mehdi SOUIER et M. Fouad MALIKI pour leur aide malgré les temps difficiles dus au coronavirus.

Ensuite, nous tenons à remercier M. Zaki SARI d'avoir accepté d'être notre examinateur ainsi que les membres du jury composés de M. Mohamed BENNEKROUF et Mme. Siham KOULOUGHLI pour leur présence afin d'évaluer notre travail.

Aussi, nous tenons à remercier le personnel de l'aéroport international de Tlemcen Messali El Hadj pour leur renseignements ainsi que l'agence Air Algérie de Tlemcen de nous avoir fourni les détails de leur plans de vol nécessaires à notre recherche.

D'ailleurs, nous tenons vivement à remercier nos ami(e)s de la filière génie industriel pour leur soutien.

Enfin, nous tenons chaleureusement à remercier nos familles pour leur soutien inconditionnel ainsi que nos parents qui ont toujours été là pour nous du début jusqu'à la fin et à qui on doit ce que nous sommes.

## Table des matières :

Introduction générale: .....	1
Chapitre I: Le transport aérien .....	2
I.1 Introduction.....	3
I.2 Le transport aérien .....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 Avantages et inconvénients du transport aérien .....	3
I.2.2.1 Avantages.....	3
I.2.2.2 Inconvénients .....	4
I.2.3 Quelques définitions en relation avec le transport aérien.....	5
I.2.3.1 Un vol .....	5
I.2.3.2 Les phases de vols .....	5
I.2.3.3 Un passager.....	6
I.2.3.4 Un avion.....	6
I.2.3.5 Un équipage .....	6
I.2.3.6 Un aéroport .....	6
I.2.3.7 Un retard .....	6
I.2.3.8 Un aéronef.....	7
I.2.3.9 Un aéroport .....	7
I.2.3.10 Un secteur aérien : .....	7
I.2.3.11 Un espace aérien .....	8
I.2.3.12 Un Plan de vol (PLN) .....	9
I.2.4 Les compagnies aériennes .....	10
I.2.4.1 Définition .....	10

I.2.4.2	Les plus grandes compagnies aériennes en Europe (2019).....	10
I.2.4.3	Les plus grandes compagnies aériennes en Asie (2016) .....	12
I.2.4.4	Les meilleures compagnies aériennes en Africaines en 2018 .....	13
I.2.4.5	Les meilleures compagnies aériennes dans le monde .....	13
I.2.5	Les organismes du transport aérien .....	14
I.2.5.1	L'OACI.....	14
I.2.5.2	L'IATA .....	14
I.2.5.3	L'AACO .....	15
I.2.5.4	L'ATAF .....	15
I.2.5.5	L'AFRAA .....	16
I.2.5.6	La Fondation pour la sécurité des vols .....	16
I.2.6	Le trafic aérien .....	16
I.2.6.1	Définition du trafic aérien.....	16
I.2.6.2	La gestion du trafic aérien .....	17
I.2.6.3	Le service de la circulation aérienne .....	17
I.2.6.4	Gestion des flux du trafic aérien.....	17
I.2.6.5	La gestion de l'espace aérien.....	18
I.2.6.6	L'évolution du trafic aérien .....	18
I.2.6.7	L'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella .....	21
I.3	Statistiques sur le trafic aérien .....	24
I.4	Le temps de service des équipages .....	25
I.5	Impact du Covid-19 sur le secteur aérien .....	26
I.6	Conclusion : .....	29
Chapitre II: Généralités sur l'Optimisation .....		30
1	Introduction.....	31

II.1	Définition .....	31
II.2	Minimisation .....	31
II.3	Maximisation .....	31
II.4	Domaines d'application .....	32
II.5	Méthodes de Résolution.....	33
II.5.1	Méthodes analytiques.....	33
II.5.2	Méthodes graphiques .....	33
1.1	Méthodes numériques :.....	33
II.6	Heuristique :.....	33
II.7	Méthode de séparation et évaluation .....	34
II.8	Les Métaheuristiques .....	34
II.8.1	Recuit Simulé .....	35
II.8.2	Colonie de Fourmis.....	36
II.8.3	Recherche Tabou.....	37
II.8.4	Algorithmes Génétiques.....	38
II.9	Conclusion .....	40
Chapitre III: Problématique abordée.....		41
III.1	Introduction.....	42
III.2	Description de la problématique .....	42
III.3	Hypothèses .....	42
III.4	Modèle mathématique.....	43
III.5	Saisie des données .....	45
III.6	Approche de résolution .....	45
III.6.1	Codage.....	49
III.6.2	Algorithme .....	49

III.6.3	Génération des voisins .....	50
III.6.4	Paramètres de l'algorithme .....	50
III.7	Programmation, résultats et interprétation.....	51
III.7.1	Définition de Pycharm .....	51
III.7.2	Résultats .....	51
III.7.3	Interprétation .....	53
III.8	Conclusion : .....	53
	Conclusion générale.....	54

## Liste des tableaux :

<b>Tableau I.1.</b> Les meilleures compagnies aériennes d'Europe en 2019.....	10
<b>Tableau I.2.</b> Les meilleures compagnies aériennes d'Asie en 2016.....	12
<b>Tableau I.3.</b> Les meilleures compagnies aériennes d'Afrique en 2018.....	13
<b>Tableau I.4.</b> Les meilleures compagnies aériennes dans le monde en 2019.....	14
<b>Tableau I.5.</b> Evolution du trafic de 2013 à 2019.....	24
<b>Tableau I.6.</b> Impact du COVID-19 sur le transport aérien de mi-mars à fin mai 2020 .....	28
<b>Tableau III.1.</b> Planning des vols internationaux de la compagnie aérienne Air Algérie à l'aéroport d'Oran en heures.....	46
<b>Tableau III.2.</b> Les horaires de départ et d'arrivée des vols aller-retour en heures. ....	47
<b>Tableau III.3.</b> La durée totale en heures des vols aller-retour de chaque vol i durant les jours de semaine. ....	48

## Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Aérodrome de spa – la Sauvenière.....	8
<b>Figure I.2.</b> Exemple d'un plan de vol .....	9
<b>Figure I.3.</b> L'évolution du nombre de passagers dans le monde. ....	19
<b>Figure I.5.</b> Un avion de type Boeing 737-600 d'Air Algérie. ....	22
<b>Figure I.6.</b> Un avion de type Boeing 737-700 d'Air Algérie. ....	22
<b>Figure I.4.</b> Un avion de type ATR 72 d'Air Algérie. ....	22
<b>Figure I.7.</b> Un avion de type Boeing 737-800 d'Air Algérie. ....	23
<b>Figure I.8.</b> Un avion de type Airbus 330-200 d'Air Algérie. ....	23
<b>Figure I.9.</b> Un avion de type Hercule L 100-30 d'Air Algérie.....	23
<b>Figure I.10.</b> Aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella.....	24

# *Introduction générale:*

---

Dans un aéroport où il y a peu nombre de vols comme l'aéroport international de Tlemcen, il est facile pour les compagnies aériennes de planifier et d'organiser les vols en y affectant les bons équipages et les bons avions et en équilibrant les charges entre ces deux derniers. Mais pour un aéroport avec un nombre important de vols comme l'aéroport d'Oran ou d'Alger, la gestion des vols devient plus complexe à résoudre et peut engendrer un déséquilibre entre les temps de service des équipages et les temps de vols pour les avions. Donc ce que nous allons faire dans ce mémoire c'est d'équilibrer les charges entre chaque équipage et chaque avion avec un nombre important de vols. Nous allons prendre pour étude de cas la compagnie aérienne d'Air Algérie à l'aéroport international Ahmed Ben Bella d'Oran.

Ce mémoire est composé de trois chapitres fondamentaux. Dans le premier chapitre, nous allons parler des statistiques sur le trafic aérien, de normes concernant le temps de travail des équipages et de l'impact de la pandémie du COVID-19 sur le transport aérien.

Dans le deuxième chapitre, nous allons voir ce qu'est l'optimisation et comment un problème d'optimisation est formulé, ses domaines d'application, ce que sont les heuristiques comme le Branch and Bound et les métaheuristiques les plus connues qui sont le recuit simulé, les colonies de fourmis, la recherche tabou et les algorithmes génétiques.

Dans le troisième chapitre, nous allons aborder la problématique de notre mémoire en y formulant les hypothèses, le modélisant mathématiquement, le résolvant et en interprétant les résultats obtenus pour enfin tirer les conclusions de notre travail.

# *Chapitre I: Le transport aérien*

## **I.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques notions sur le transport aérien afin de familiariser nos lecteurs avec le domaine de notre recherche et que notre mémoire soit compréhensible de tous, nous allons aussi voir des statistiques qui concernent notre travail ainsi que l'impact de la COVID-19 sur le secteur aérien afin que nos lecteurs puissent avoir une idée sur le trafic aérien dans le monde.

Il faut savoir que depuis la création de l'avion par les frères Wright en 1902 et la libéralisation du trafic aérien en 1944 [1] c'est-à-dire l'autorisation donnée à un état de transporter des passagers depuis ou vers un autre état, le secteur aérien a connu un formidable essor et il prend aujourd'hui une importance économique et industrielle majeure. En plus, le trafic aérien croît plus que les autres modes de transport en matière de nombre de passagers qui double tous les 10 ans en passant de 262 millions en 1989 à 998 millions en 2010, Du coup une augmentation de passagers implique forcément plus d'avions ce qui rend la gestion du trafic aérien un peu plus complexe. [2]

## **I.2 Le transport aérien**

### **I.2.1 Définition**

Le transport aérien est l'activité de transport de passagers ou de fret (marchandise) effectuée dans les airs. [2]

### **I.2.2 Avantages et inconvénients du transport aérien**

Au cours des dernières décennies, la popularité du transport aérien a augmenté et ce pour un certain nombre de raisons notamment la commodité et la sécurité. Voici quelques-uns des facteurs positifs et négatifs impliquant le transport aérien. [3]

#### **I.2.2.1 Avantages**

##### ❖ Rapidité

Se déplacer dans les airs est beaucoup plus rapide que d'utiliser d'autres moyens de transport, s'il existe, bien sûr, une ligne aérienne entre l'endroit où vous êtes et l'endroit où vous désirez aller. Conduire aux États-Unis, par exemple, entre les villes (New York, Denver, Chicago, Los Angeles etc.) ou les états (Massachusetts, Floride, Texas, Californie etc.) pourrait vous prendre des heures

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

voire des jours alors que vous pourriez parcourir cette distance en quelques heures en empruntant le chemin des airs afin de profiter de bonnes et longues vacances vu qu'on passe moins de temps à voyager.

### ❖ Longues distances

Si la destination que vous souhaitez aller est lointaine, vous trouverez qu'il est difficile de voyager par tout autre mode que le transport aérien. Voyager dans les airs vers n'importe quelle destination dans le monde est possible. Certes, le vol vers des destinations éloignées prend plus de temps mais ils sont encore plus courts que le temps pris si vous deviez compter sur les modes de transport alternatifs.

### ❖ Sécurité

D'après Immolidays, L'un des modes de voyage le plus sûr de toutes les formes de voyage disponibles est le transport aérien. Chaque année, vous trouverez un grand nombre d'accidents mortels se produisent à cause du voyage en voiture. De même, il n'y a pas de pénurie d'accidents ferroviaires. Les catastrophes liées au transport aérien se produisent, mais elles se produisent beaucoup moins fréquemment. La prise de décision sur le mode de déplacement a été très facile pour beaucoup de gens qui considèrent la sécurité comme le principal facteur d'opter pour la mouche.

### **I.2.2.2 Inconvénients**

#### ❖ La pollution

L'inconvénient majeur du transport aérien est la pollution causée par ce dernier. En effet, l'émission de gaz à effet de serre par les avions dans notre atmosphère entraîne des effets comme le réchauffement planétaire. Beaucoup de gens sont désireux de minimiser l'effet du réchauffement climatique sur la planète et ils trouvent cela un revers majeur. De nombreuses compagnies aériennes deviennent plus respectueuses de l'environnement pour prévenir les effets du réchauffement climatique. Cela peut inclure les rehausser leurs avions avec un dispositif appelé Winglet qui améliore l'efficacité du carburant. En outre, la plupart des compagnies aériennes ont modernisé leurs avions pour des avions plus éco-énergétiques en dépensant beaucoup d'argent, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.

### ❖ Coût élevé

Un inconvénient majeur dans le voyage par avion est son coût. Il est souvent beaucoup moins cher d'alimenter la voiture et de conduire à l'endroit où vous devez aller au lieu de voler. Il existe des moyens de contourner ce problème en profitant de la remise Voyage aérien. Le principal facteur décisif pour voler ou conduire est le type d'accord que vous pouvez obtenir pour le billet d'avion.

### ❖ Peur de voler

Il y a un certain nombre de personnes qui ne veulent pas voler. C'est principalement en raison du fait qu'ils étaient sur un vol qui a connu des turbulences extrêmes ou un autre type d'autre événement et cela a été assez terrifiant.

## **I.2.3 Quelques définitions en relation avec le transport aérien**

### **I.2.3.1 Un vol**

Un vol est un processus où l'avion décolle d'un aéroport donné à une heure donnée et suit une route prédéfinie à une vitesse fixée pour atterrir sur un autre aéroport.

### **I.2.3.2 Les phases de vols**

#### **I.2.3.2.1 Le roulage**

Le roulage c'est la phase précédant le décollage et suivant l'atterrissage pendant laquelle l'aéronef se déplace au sol c'est-à-dire de l'endroit où il est stationné vers la piste en utilisant son propulseur.

#### **I.2.3.2.2 Le décollage**

Le décollage, pour un aéronef ou pour quelconque engin spatial, est l'action de quitter le sol et, par extension, la phase transitoire pendant laquelle il réunit les conditions nécessaires pour entamer son vol dans les conditions optimales de performances et de sécurité.

#### **I.2.3.2.3 La croisière**

La croisière est la phase du vol située entre le décollage et l'atterrissage où l'aéronef se stabilise et atteint sa vitesse de croisière qui est la vitesse maximale, elle inclut la montée vers l'altitude de croisière et la descente en vue de l'atterrissage.

### **I.2.3.2.4 L'atterrissage**

L'atterrissage est la phase finale du vol, à l'issue de la procédure d'approche, et pendant laquelle l'aéronef se pose sur la piste.

### **I.2.3.3 Un passager**

Un passager est une personne utilisant un moyen de transport pour se déplacer d'une ville à une autre sans pour autant contribuer à son bon fonctionnement. [4]

### **I.2.3.4 Un avion**

Un avion est un véhicule conçu pour être supporté par l'air et pour transporter des passagers ou du fret d'un aéroport à un autre. [5]

### **I.2.3.5 Un équipage**

Un équipage est un ensemble de personnes embarquées, qui assurent la manœuvre de l'appareil et le service aux passagers. Les membres de l'équipage sont divisés en deux catégories, la première est le Personnel Navigant Technique (PNT) formé d'un Commandant de Bord, d'un Officier Pilote de Ligne ou Copilote et un Officier Mécanicien Navigant, la seconde est le Personnel Navigant Commercial (PNC) comprenant le Chef de Cabine Principal et des Hôtesse et Stewards. [6]

### **I.2.3.6 Un aéroport**

Un aéroport est l'ensemble des bâtiments et des installations qui servent au traitement des passagers ou du fret aérien situés sur un aérodrome. Le bâtiment principal est, généralement, l'aérogare par où transitent les passagers (ou le fret) entre les moyens de transport au sol et les avions.

### **I.2.3.7 Un retard**

Il faut savoir qu'il y a plusieurs définitions du mot retard, pour notre travail, le retard est la différence entre l'heure du départ prévu marquée dans votre billet d'avion et l'heure réelle affichée dans votre montre ou dans un écran où on affiche les vols dans un aéroport. [7]

Le groupe d'assurance APRIL International nous informe que selon un rapport de l'Observatoire des retards du trafic aérien, les compagnies sont responsables de 31 % des retards de plus de 15 minutes. Car sur un marché toujours plus concurrentiel, elles attendent leurs clients au-delà du délai normal (15 minutes avant le décollage), ou annoncent un horaire de départ incompatible avec leur

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

autorisation de décoller et c'est ainsi que certains avions quittent la passerelle d'embarquement à l'heure prévue et stationnent une demi-heure en bout de piste. Aussi, les problèmes d'enchaînement des rotations représentent 27 % des retards. En effet, les avions font des allers retours. À chaque aéroport, il faut évacuer les passagers, nettoyer l'avion, faire le plein, vider et remplir la soute, faire monter les nouveaux passagers, donc un retard au premier décollage de l'appareil produit un effet boule de neige, les temps de rotation étant calculés au plus juste. De plus, chaque avion est vérifié avant le décollage et peut faire l'objet de réparations mineures. D'autre part, les nouvelles normes de sécurité dans les aéroports et la densité du trafic aérien ne représentent respectivement que 12 et 11 % des retards, essentiellement concentrés aux périodes de grands départs, la météo ne cause quant à elle que 5 % des retards et enfin les passagers sont responsables de 14 % des retards : arrivées à la dernière minute pour l'enregistrement, retards pour cause de visite prolongée au duty-free, oublis de bagage dans l'aérogare provoquant une alerte... les motifs ne manquent pas ! En conséquence 27 % des vols ont connu un retard de plus de 15 minutes en 2011. [8]

### **I.2.3.8 Un aéronef**

Un aéronef est n'importe quel moyen de transport capable de s'élever et de se déplacer dans l'atmosphère terrestre. Dans notre mémoire, l'aéronef désigne un avion.

### **I.2.3.9 Un aérodrome**

Un aérodrome est une surface destinée à être utilisée pour l'arrivée, le départ des aéronefs et pour leurs évolutions au sol. Accessoirement, l'aérodrome peut disposer d'installations destinées au garage, à la mise en œuvre et à la maintenance des aéronefs. Le site est souvent le lieu d'implantation d'associations ou d'entreprises ayant des activités liées à l'aéronautique. Le contrôle local du trafic aérien, s'il existe, est assuré à partir d'une tour de contrôle. Les services de contrôle régionaux y sont souvent Co localisés. [9]

### **I.2.3.10 Un secteur aérien :**

Un secteur aérien est une portion de l'espace aérien dans laquelle un poste de contrôle aérien gère les flux d'avions entrants et sortants. [10]



**Figure I.1.** Aérodrome de spa – la Sauvenière.

### **I.2.3.11 Un espace aérien**

Un espace aérien est organisé pour fournir une sécurité optimale à tous les aéronefs qui y évoluent. L'espace aérien est divisé en zones contrôlées et en zones non contrôlées. [11]

#### **I.2.3.11.1 Un espace aérien contrôlé**

Un espace aérien contrôlé est un espace dans lequel le service du contrôle (l'espacement entre aéronefs) est assuré. [11]

#### **I.2.3.11.2 Un espace aérien non contrôlé**

Un espace aérien non contrôlé est un espace dans lequel tout aéronef assure lui-même l'évitement des autres aéronefs, le respect de la hauteur de survol du sol et des habitations et des minima météorologiques. [11]

Le service du contrôle permet entre autres d'éviter les collisions entre les aéronefs.

## Chapitre I : Notions sur le vol

### I.2.3.12 Un Plan de vol (PLN)

Un plan de vol (Flight Plan en anglais) est constitué de renseignements spécifiques au sujet d'un vol donné, ou partie d'un vol, communiqué aux organismes des services de la circulation aérienne (D'après (BENEJEAN, 2013) les informations concernent le numéro de vol, l'immatriculation de l'avion, l'origine, la destination, le nombre de passagers etc.). [12] .Il permet d'initier le dialogue avec les contrôleurs de la navigation et, en cas d'accident, de fournir des informations destinées aux sauveteurs. Il contient des renseignements sur l'identité et les caractéristiques de l'aéronef, le nombre de personnes à bord, la description de la trajectoire, etc.

L'obligation de dépôt d'un plan de vol varie suivant les pays. Il est généralement obligatoire pour tout vol non local ou effectué hors des conditions de vol en visibilité. [13]

The image shows a standard ICAO flight plan form (FPL) with the following fields and values:

- 3 TYPE DE MESSAGE/Message type:** (FPL)
- 7 IDENTIFICATION DE L'AERONEF/Aircraft identification:** F TEST
- 8 REGLE DE VOL/Flight rules:** V
- TYPE DE VOL/Type of flight:** G
- 9 NOMBRE/Number:** (blank)
- TYPE D'AERONEF/Type of aircraft:** DR30
- CAT DE TURBULENCE DE SILLAGE/Wake turbulence cat.:** L
- 10 EQUIPEMENT/Equipment:** DFGLOV / C
- 13 AERODROME DE DEPART/Departure aerodrome:** LFHA
- HEURE/Time:** 1430
- 15 VITESSE/ cruising speed:** N0090
- NIVEAU/Level:** VFR
- ROUTE/Road:** DCT CFA DCT NEV DCT CLM
- 4853N00233E 4855N00228E**
- 16 AERODROME DE DESTINATION/ Destination aerodrome:** LFPB
- DUREE TOTALE ESTIMEE/Total est. dur.:** 0247
- AERODROMES DE DEGAGEMENT/alt. aerodromes:** LFPT
- 18 RENSEIGNEMENTS DIVERS/Other information:** EET/LFFF0038
- 19 AUTONOMIE/Endurance:** E / 0624
- PERSONNES A BORD/Persons on board:** P / TBN
- EQUIPEMENT DE SURVIE/Survival equipment:** Polar, Desert, Maritime, Jungle (all checked)
- GILETS DE SAUVETAGE/Jackets:** Light, Fluo, UHF, VHF (all checked)
- CANOTS/Dinghies:** (checked)
- NOMBRE/Number:** (checked)
- CAPACITE/Capacity:** (checked)
- COULEUR/Color:** A / WHITE AND BLUE
- REMARQUES/Remarks:** N / CELL PHONE +33 6 07 XX XX XX
- PILOTS COMMANDANT DE BORD/Pilot in command:** C / FRANCOIS FOUCHET

Figure I.2. Exemple d'un plan de vol

### **I.2.4 Les compagnies aériennes**

#### **I.2.4.1 Définition**

Une compagnie aérienne ou un transporteur aérien est une entreprise de transport de passagers ou de fret dans les airs. Les compagnies aériennes louent ou achètent leurs avions afin d'offrir leur service et peuvent former des partenariats ou des alliances pour des bénéfices mutuels. [14]

#### **I.2.4.2 Les plus grandes compagnies aériennes en Europe (2019)**

Le secteur du transport aérien a connu une croissance exponentielle et les compagnies aériennes ont vu le nombre de leurs passagers augmenter de façon spectaculaire donc voici dans le tableau ci-dessous le classement effectué par le site vol-retardé.fr de 8 grandes compagnies aériennes en Europe. Elles sont classées selon le nombre total de passagers transportés. [15]

**Tableau I.1.** Les meilleures compagnies aériennes d'Europe en 2019

## Chapitre I : Notions sur le vol

La compagnie	Le classement	Le pays	Le nombre de passagers	Le nombre d'avions	Vols à l'heure	
Ryanair	1 <sup>ère</sup> place	Irlande	152 millions	442	87.2%	
Groupe Lufthansa	2 <sup>ème</sup> place	Allemagne	145 millions	760	Eurowings	92,6%
					Air Dolomiti	88,1%
					Brussels Airlines	86,7%
					Edelweiss Air	86,7%
					Edelweiss Air	86,5%
					Austrian Airlines	84,4%
					Swiss	80,8%
IAG	3 <sup>ème</sup> place	Royaume-Uni	118 millions	589	AerLingus	91,6%
					Iberia	89%
					Level	87,4%
					Vueling	86,6%
					British Airways	83,6%
EasyJet	4 <sup>ème</sup> place	Royaume-Uni	96.1 millions	332	84.5%	
Air France-KLM	5 <sup>ème</sup> place	France – pays bas	87.6 millions	546	Air France	81.5%
					KLM	89.7%
Turkish – Airlines	6 <sup>ème</sup> place	Turquie	74.2 millions	346	84.4%	
Groupe Aeroloft	7 <sup>ème</sup> place	Russie	60.7 millions	247	88.1%	
Wizz air		Hongrie	39.6 millions	110	84.6%	

### I.2.4.3 Les plus grandes compagnies aériennes en Asie (2016)

Voici, selon le site de recherche Ripley Believes, le classement des meilleurs compagnies aériennes en Asie de l'année 2016 [16]:

**Tableau I.2.** Les meilleures compagnies aériennes d'Asie en 2016

<b>Rang</b>	<b>Compagnie aérienne</b>	<b>Passagers transportés (millions)</b>
1	Air China	96.5
2	Air Asia	60.1
3	Emirates Airlines	56
4	All Nippon Airways	47.3
5	IndiGo	41.3
6	Japan Airlines	40.6
7	Garuda Indonesia	34.9
8	Cathay Pacific	34.3
9	Lion Air	33.2
10	Hainan Airlines	31.7
11	Qatar Airways	30
12	Jet Airways	26.5
13	Air India	25.4
14	Singapore Airlines	22.8
15	Vietnam Airlines	20.6
16	Cebu Pacific	19.1

## Chapitre I : Notions sur le vol

---

17	Airways Ethihad	18.5
18	Thai Airways International	14.7
19	Chine Airlines	14.7
20	Philippines Airlines	13.4

### I.2.4.4 Les meilleures compagnies aériennes en Africaines en 2018

Voici selon le site d'information marocain Afrique le 360, le classement des meilleures compagnies en Afrique en 2018 [17] :

**Tableau I.3.** Les meilleures compagnies aériennes d'Afrique en 2018

Classement	La compagnie
1	Ethiopian Airlines
2	South African Airways
3	Air Mauritius
4	Air Seychelles
5	Kenya Airways
6	Royal Air Maroc
7	Mango
8	Fastjet
9	Kulula
10	TAAG Angola Airlines

### I.2.4.5 Les meilleures compagnies aériennes dans le monde

Voici d'après le site de statistiques Statista.com, le classement de meilleures compagnies aériennes dans le monde de l'année 2019 [18] :

**Tableau I.4.** Les meilleures compagnies aériennes dans le monde en 2019.

<b>Le classement</b>	<b>La compagnie</b>	<b>passagers-kilomètres payants</b>
1	American	199.6
2	Delta	186.4
3	Southwest	157.8
4	United	148.1
5	Ryanair	130.3
6	Lufthansa	130
7	China Southern	126.3
8	China Eastern	110.8
9	IAG	104.8
10	Air China	101.6

### **I.2.5 Les organismes du transport aérien**

#### **I.2.5.1 L'OACI**

L'OACI, ou bien l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (en anglais ICAO ou International Civil Aviation Organization), est une branche de l'Organisation des Nations Unies (l'ONU) spécialisée dans le transport aérien international, créée en 1944 par la convention de Chicago, son siège est à Montréal au Canada et possède 7 bureaux régionaux à Bangkok, Dakar, Le Caire, Lima, Mexico, Nairobi et Paris et compte à nos jours 185 états membres. Cette organisation a pour rôle d'élaborer des normes permettant l'uniformisation du transport aéronautique international. [19]

#### **I.2.5.2 L'IATA**

L'IATA qui est l'International Air Transport Association (Association Internationale des Transporteurs Aériens en français), est une organisation commerciale créée en 1945 à Cuba, siégée à

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

Montréal et rassemble de nombreuses compagnies aériennes volontaires partout dans le monde qui représentent 94% du trafic aérien mondial.

Selon le site d'informations en ligne Logistique Conseil, l'IATA défend les intérêts des compagnies aériennes mondiales en luttant contre les éventuelles réglementations ou charges inadaptées. Elle œuvre pour la simplification des procédures et l'amélioration des services destinés aux passagers et au fret aérien ; l'homologation des tarifs de transport aérien pour équilibrer le jeu de la concurrence et joue également un rôle important dans la gestion des problèmes liés à l'environnement. En effet, elle est sensible aux sujets concernant les nuisances sonores, ainsi que les sujets traitant de la pollution issue de la combustion des carburants, par exemple.

L'IATA est à l'origine de règlements internes qui bien sûr sont compatibles avec ceux de l'OACI, et qui constituent des références globalement reconnues par les transporteurs. Par exemple, la plupart des aéroports et des compagnies aériennes du monde sont désormais identifiées par des codes IATA uniques qui servent de standards lors d'échanges d'informations entre acteurs du marché aérien. Ce type de standards simplifie justement ces échanges d'informations et facilite le développement du billet électronique.

Cependant, rien n'est commun entre l'OACI et l'IATA, selon le même site d'informations l'IATA est une association libre de transporteurs aériens dont ils sont les membres tandis que l'OACI est une organisation intergouvernementale officielle à caractère obligatoire qui regroupe des états. [19]

### **I.2.5.3 L'AACO**

Créée en 1965 dans le cadre de la Ligue des Etats Arabes. L'Arab Air Carriers Organization, l'AACO ou l'Association des transporteurs aériens arabes est l'association régionale des compagnies aériennes des pays membres de la Ligue arabe. [19]

### **I.2.5.4 L'ATAF**

Créée en 1950 dans le cadre de l'Union Française puis devenue l'Association des Transporteurs Aériens de la zone Franc ou ATAF après l'indépendance des pays africains. Elle a compté 17 compagnies membres en 2009 qui sont selon Logistique Conseil : Air Algérie, Air Austral, Air Burkina, Air France, Air Ivoire, Airlinair, Air Madagascar, Air Mali, Air Mauritius, Air Sénégal International, Air Seychelles, Britair, CCM Airlines, Middle East Airlines, Royal Air Maroc et Tunisair. C'est un organisme de concertation multilatérale qui agit stratégiquement à la mise en place

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

des transferts de technologie et d'information entre les compagnies membres lors de séminaires thématiques : sûreté, sécurité aérienne, e-commerce, répression des fraudes, etc. Et plus généralement à la coopération Nord/Sud, à l'établissement d'un dialogue efficace avec les compagnies du continent africain, des îles lointaines et des compagnies européennes et du Moyen Orient. [19]

### **I.2.5.5 L'AFRAA**

L'AFRAA ou African Airlines Association (en français l'Association des Compagnies Aériennes Africaines) est une organisation régionale à but non lucratif, créée en avril 1968 à Accra en Ghana, elle compte 40 membres en 2009. Cette association vise, selon Logistique Conseil, à accélérer la réalisation de l'intégration économique et sociale des pays africains à travers :

- Le développement sûr, fiable, économique et efficace des services de transport aérien à destination, en provenance, à l'intérieur et à travers l'Afrique et l'étude des problèmes qui y sont associés ;
- L'animation des échanges et de la coopération technique entre entreprises africaines de transport aérien ;
- La défense des points de vue des compagnies aériennes membres sur les questions et les problèmes d'intérêt commun ;
- La garantie d'un service qui apporte une valeur ajoutée à l'efficacité, l'efficacité, la fiabilité et la sécurité des compagnies aériennes membres. [19]

### **I.2.5.6 La Fondation pour la sécurité des vols**

La Fondation pour la sécurité des vols ou en anglais le Flight Safety Foundation (FSF) est une organisation internationale indépendante à but non lucratif concernant la recherche, l'éducation, le plaidoyer et les communications dans le domaine de la sécurité aérienne. Fondée en 1947, elle rassemble des professionnels de l'aviation et compte 1200 membres dans plus de 75 pays et vise à anticiper, identifier et analyser les problèmes mondiaux de la sécurité aérienne et fixer les priorités et diffuse les informations sur la sécurité en identifiant les menaces et recommandant des solutions pratiques en apportant une perspective internationale aux problèmes de l'aviation pour ses membres, les médias et le public voyageur. [20]

## **I.2.6 Le trafic aérien**

### **I.2.6.1 Définition du trafic aérien**

Le trafic aérien est constitué des règles, systèmes et processus qui, réglementés par diverses organisations internationales, permettent le développement des vols et de voyager d'une destination à l'autre dans le monde entier. Tout comme il existe des règles de circulation et des panneaux qui réglementent le trafic des voitures, camions et autres véhicules sur les routes, le trafic aérien est également soumis à des règles différentes. Alors que le contrôle de chaque route dépend de la ville ou du pays dans lequel elle est située, le trafic aérien est organisé au niveau international, compte tenu de ses caractéristiques particulières. Bref, c'est la circulation des avions dans un espace aérien. [21]

### **I.2.6.2 La gestion du trafic aérien**

D'après la vision de l'auteur Jamal ANNAMMAS, La Gestion du trafic aérien (en anglais Air Traffic Management ou ATM) est l'ensemble des activités menées pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic aérien. Apparue dans les régions du monde au trafic le plus dense afin de gérer les problèmes de congestion du trafic, la gestion du trafic aérien inclut les services de la circulation aérienne, la gestion des flux de trafic et des capacités, et la gestion de l'espace aérien. [22]

### **I.2.6.3 Le service de la circulation aérienne**

Les services de la circulation aérienne, autrement appelés services de la CA ou services ATS (Air Traffic Services) désignent l'ensemble des services assurés par un organisme de la circulation aérienne afin de participer à la sécurité des vols. Ils sont au nombre de trois :

- ❖ **Le service de contrôle** : instauré pour empêcher les collisions entre aéronefs et accélérer et ordonner la circulation dans les airs.
- ❖ **Le service d'information de vol** : dont le but est de fournir aux aéronefs tous les avis et renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace des vols.
- ❖ **Le service d'alerte** : qui a pour but d'alerter les organismes appropriés lorsque des aéronefs ont besoin de l'aide des organismes de recherche et de sauvetage, et de prêter à ces organismes le concours nécessaire. [23]

### **I.2.6.4 Gestion des flux du trafic aérien**

La gestion des flux de trafic aérien (en anglais Air Traffic Flow Management, universellement abrégé en ATFM, ou parfois : Air Traffic Flow and Capacité Management (ATFCM)), ou régulation du trafic aérien, est la partie de la gestion du trafic aérien qui vise à éviter la saturation des aéroports et

des secteurs de contrôle. Pour cela le trafic est régulé, c'est-à-dire que les vols doivent être annoncés à l'avance et que leur heure de décollage est fixée par un organisme de régulation. Cette opération a pour effet de retarder certains décollages, mais diminue le risque d'attente en vol et donc améliore globalement la ponctualité. [24]

### **I.2.6.5 La gestion de l'espace aérien**

La gestion de l'espace aérien (Air Space Management ou ASM) est la composante de la gestion du trafic aérien (ATM) qui assure la compatibilité des différentes activités aériennes.

Parmi les différentes activités aériennes, il y a essentiellement deux types de circulation aérienne, la Circulation Aérienne Générale (CAG) et la Circulation Aérienne Militaire (CAM). [25]

### **I.2.6.6 L'évolution du trafic aérien**

#### **I.2.6.6.1 Dans le monde**

##### **I.2.6.6.1.1 La flotte mondiale d'avions de ligne**

Selon le magazine français Capital, la flotte mondiale d'avions passagers va plus que doubler pour atteindre 48 000 appareils en 20 ans avec une croissance du trafic aérien affichant, un solide pourcentage de 4,4 % par an et entraînant un besoin de 37 390 avions passagers et cargo neufs, selon les nouvelles prévisions globales de marché 2018-2037 d'Airbus. Sur les 37 390 avions neufs nécessaires, 26 540 répondront aux besoins de croissance et 10 850 viendront remplacer les anciens appareils moins efficaces en termes de consommation de carburant. Du fait que la flotte mondiale va plus que doubler pour atteindre 48 000 appareils, 540 000 nouveaux pilotes seront nécessaires. [26]

##### **I.2.6.6.1.2 L'évolution du nombre de passagers dans le monde**

Le trafic aérien mondial ne cesse de croître dit l'entreprise Sia Partners, il est passé de quelques millions de passagers en 1950 à 4.3 milliards en 2018, la barre du milliard de passagers ayant été franchie en 1990. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI ou ICAO en anglais qui est *The International Civil Aviation Organization*) estime que le nombre de passagers aériens atteindra les 6 milliards d'ici 2030. Cette augmentation effrénée du trafic remet en cause les modèles logistiques et d'infrastructures actuelles des aéroports. Ceux-ci doivent s'adapter rapidement et durablement et voici ci-dessous une figure qui contient les statistiques mondiales de

## Chapitre I : Notions sur le vol

l'aviation civile établi par l'OACI qui montre l'évolution du nombre de passagers depuis 1970 jusqu'à 2018. [27]

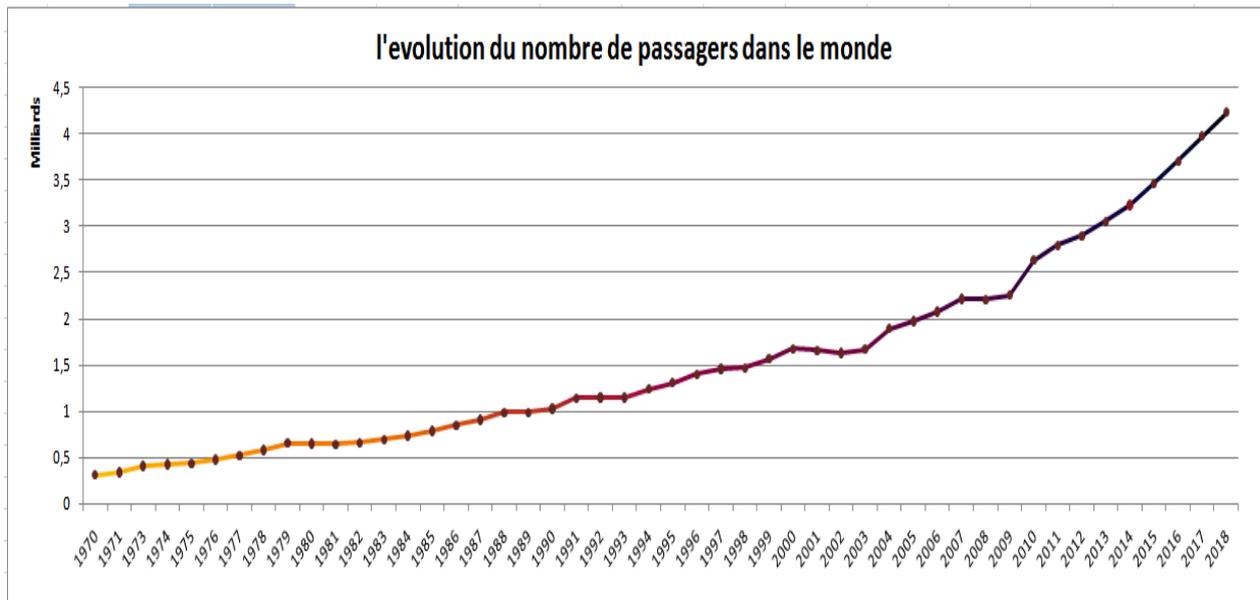


Figure I.3. L'évolution du nombre de passagers dans le monde.

### I.2.6.6.2 En Algérie

#### I.2.6.6.2.1 Air Algérie

La compagnie aérienne Air Algérie, est une compagnie nationale algérienne. Créée en 1947 quand fut constituée la Compagnie générale de transport (CGT), dont le réseau était principalement orienté vers la France. Elle opère depuis l'aéroport d'Alger - Houari-Boumediene des vols vers 28 pays en Europe, en Afrique, en Asie, en Amérique du Nord et au Moyen-Orient. Elle dessert également 32 destinations sur le territoire algérien. Elle est membre de l'Association internationale du transport aérien (L'IATA) et son code IATA est AH et possède la certification IOSA, de l'Arab Air Carriers Organization (AACO) et de



## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

l'Association des compagnies aériennes africaines (AFRAA).

Selon les dernières statistiques de Wikipédia, Air Algérie couvre un réseau de 96 400 km et transporte chaque année plus de 6,5 millions de passagers et près de 20 000 tonnes de fret en 2018, ce qui fait d'Air Algérie la 4e compagnie africaine derrière Ethiopian Airlines, EgyptAir et Royal Air Maroc mais devant South African Airways ou Kenya Airways.

Le réseau international est de 45 villes desservies dans 30 pays en Europe, Moyen-Orient, Asie, Afrique et Amérique - est adossé à un réseau intérieur reliant 31 villes. Air Algérie a produit près de 5 milliards de sièges-kilomètres offerts (SKO) et a réalisé 3,3 milliards de passagers-kilomètres transportés (PKT). Le groupe possède 40 agences en Algérie et 27 agences à l'international. En 2010, Air Algérie a transporté 3,5 millions de passagers ce qui fait que le nombre de passagers a presque doublé en 8 ans.

A l'international pour le marché français (le principal marché pour Air Algérie) en 2019 elle a transporté 2 884 584 passagers (+8,1% par rapport à 2018) et 16 037 tonnes de cargo. Air Algérie possède 66% de part de marché ce qui fait d'elle le plus gros transporteur entre la France et l'Algérie devant Air France, Transavia ou ASL Airlines France.

La compagnie opère trois lignes long-courrier vers Montréal, Pékin et Dubaï en Airbus A330-200. Elle propose sur ses vols long-courrier une classe économique, une classe affaires et depuis 2015 une classe premium économique. [28]

### **I.2.6.6.2.2 L'évolution du nombre de passagers en Algérie**

Le dernier bilan de l'Etablissement de Gestion de Services Aéroportuaires d'Alger (EGSA Alger) sur le trafic global des aéroports, le nombre de passagers enregistré en 2017 a atteint 1802344 soit une évolution de 3% par rapport à 2016 où le nombre de passagers avait atteint 1753434 alors qu'il était en 2015 près de 1663371 passagers. [28]

### **I.2.6.6.2.3 La flotte aérienne algérienne**

L'université de Batna rapporte qu'en raison de la grande superficie et de la distance entre la périphérie de l'Algérie et l'expansion de la zone désertique. Le transport aérien a pris une importance particulière dans notre pays. La flotte aérienne est composée de 63 avions, pour la plupart des Boeing et des

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

Airbus, qui sont des avions modernes. Air Algérie garantit chaque année le transport de 3,6 millions de passagers et environ 30 000 tonnes de fret. L'Algérie compte 157 aéroports, dont 12 aéroports internationaux, les autres étant internes, régionaux ou privés, les plus importants étant l'aéroport international Houari Boumediene d'Alger et l'aéroport international Ahmed Ben Bella d'Oran. [29] Sachant qu'Air Algérie possède 56 appareils d'âge moyen de 11 ans répondant aux normes de sécurité internationales qui sont:

- 15 ATR 72 de capacité de 66 passagers chacun.
- 5 Boeing 737-600 (B736) de capacité de 101 passagers chacun.
- 2 Boeing 737-700 (B737) de capacité de 112 passagers chacun.
- 25 Boeing 737-800 (B738) de capacité allant de 148 à 162 passagers chacun.
- 8 Airbus 330-202 (A332) de capacité de 263 passagers chacun.
- 1 Hercule L 100-30 de capacité de 20 tonnes. [30] (voir les figures de I.4 à I.9)

### **I.2.6.7 L'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella**

Anciennement connu sous le nom d'aéroport d'Oran Es Sénia et renommé le 16 avril 2012 par le président BOUTEFLIKA en hommage au premier président de la République Ahmed BEN BELLA décédé 5 jours plus tôt, l'aéroport d'Oran (code IATA : ORN, code OACI : DAOO) est un aéroport international algérien situé dans la commune d'Es Sénia à 12 km au sud de la ville d'Oran et c'est le deuxième aéroport d'Algérie après l'aéroport Houari Boumediene à Alger. Elle accueille chaque année deux compagnies nationales (Air Algérie et Tassili Airlines) et 10 compagnies aériennes étrangères de six pays différents (France, Espagne, Italie, Belgique, Tunisie et Turquie) et dessert plus de 30 destinations dans dix pays. [31]



**Figure I.6.** Un avion de type ATR 72 d'Air Algérie.



**Figure I.6.** Un avion de type Boeing 737-600 d'Air Algérie.



**Figure I.6.** Un avion de type Boeing 737-700 d'Air Algérie.



**Figure I.9.** Un avion de type Boeing 737-800 d'Air Algérie.



**Figure I.9.** Un avion de type Airbus 330-200 d'Air Algérie.



**Figure I.9.** Un avion de type Hercule L 100-30 d'Air Algérie.



**Figure I.10.** Aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella

**Tableau I.5.** Evolution du trafic de 2013 à 2019

Année	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Trafic	1 428 100	1 780 500	1 675 930	1 851 910	1 938 373	2 562 487	2 582 659
Evolution	▲+19,8 %	▲+24,7 %	▼-5,9 %	▲+10,5 %	▲+4,5 %	▲+32.2%	▲+0,79%

### I.3 Statistiques sur le trafic aérien

Ces dernières années, le trafic aérien a connu une croissance inégalée, selon le média en ligne The Conversation, en 2018 plus de 4.3 milliards de passagers ont pris l'une des 1300 compagnies aériennes dans le monde et ce nombre double tous les 15 ans, la même année 24000 avions

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

commerciaux (transportant des passagers) ont parcouru le monde en réalisant plus de 38 millions de vols vers l'un des 3500 aéroports commerciaux ce qui veut dire qu'à chaque battement de cœur, un avion décolle de l'aéroport soit une fréquence de 72 vols par minute.

Aussi en 2000, l'Amérique du Nord représentait à elle seule 40 % du trafic alors que l'Europe en représentait 26 % et l'Asie 22 %. Près de 20 ans plus tard, l'Asie domine le marché avec près de 36 % du trafic mondial, suivie par l'Europe avec 26 % et l'Amérique du Nord avec 24 %. Ceci est dû à d'importantes disparités géographiques. Si le transport aérien croît en moyenne de 6 % par an, les écarts régionaux demeurent considérables : sa croissance annuelle est de l'ordre de 8 à 10 % dans les pays asiatiques ou du Moyen-Orient, mais de 3 à 4 % « seulement » en Europe ou aux États-Unis. [2]

En matière de rentabilité économique les compagnies de transport aérien engrangent, en moyenne un bénéfice par passager de 8,53 euros pour les compagnies du golfe persique, 7,33 euros aux États-Unis, 5,59 euros pour les compagnies européennes et 3,76 euros pour les compagnies de la zone Asie-Pacifique (données IATA pour l'année 2014), le transport aérien contribue donc à la mondialisation de l'économie en facilitant les échanges à grande distance.

En revanche, il nuit à l'environnement globalement avec l'augmentation de l'effet de serre par les émissions des avions et localement avec les nuisances sonores et visuelles provoquées par la rotation de ces derniers qui contribuent aussi à la pollution de l'air, du fait de la croissance rapide du trafic aérien, les mesures prises par l'industrie du transport aérien sont insuffisantes pour compenser l'accroissement des nuisances. En 2018, les avions ont laissé 918 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dans le ciel. Les vols en partance des États-Unis sont responsables d'un quart de ces rejets et en Europe, la pollution carbonée due au trafic aérien a augmenté de 26,3 % entre 2014 et 2019. [32]

### **I.4 Le temps de service des équipages**

Selon la Fondation pour la Sécurité des vols (FSF), une journée de service pour les équipages ne doit pas dépasser les 14 heures, lorsque 12 heures ont été dépassées, elle doit être suivie d'une période de repos de 10 heures. Les équipages en rotation arrivant à la suite d'un voyage de nuit ou d'un voyage avec plus de quatre heures de décalage horaire ne devront pas être affectés à un temps de service de vol avant que la période de repos de 12 heures n'ait été respectée. Des programmes de

## Chapitre I : Notions sur le vol

---

la gestion des fatigues conformes aux normes réglementaires peuvent être utilisés à la place des limites indiquées ci-dessus, lorsqu'ils ont été passés en revue et approuvés par un expert en aéronautique compétent en la matière. [33]

**Tableau I.6 :** Limite d'heures de vol

Pilote seul	Deux pilotes
8 heures de vol par jour	10 heures de vol par jour
40 heures de vol pour chaque période de 7 jours consécutifs	45 heures de vol pour chaque période de 7 jours consécutifs
100 heures de vol pour chaque période de 28 jours consécutifs	120 heures de vol pour chaque période de 28 jours consécutifs
1 000 heures de vol pour chaque période de 365 jours consécutifs	1 200 heures de vol pour chaque période de 365 jours consécutifs

### I.5 Impact du Covid-19 sur le secteur aérien

Selon le journal Le Monde, la crise sanitaire liée à la pandémie du coronavirus a eu un impact financier majeur sur les compagnies du secteur. Fin 2020, leur manque à gagner devrait avoisiner 371 milliards de dollars (328 milliards d'euros). Un repli de 61 % par rapport à 2019. Ce sont les transports européens, sud-américains, africains et moyen-orientaux qui auront été les plus touchés, avec des baisses « *de la demande passagers* » de 56 % à 59 % selon les zones. Cet été, les compagnies seront loin d'avoir recouvré toutes leurs forces. Le « *trafic ne devrait pas excéder 40 % de leurs capacités* », signale ASC, à l'image d'Air France, qui ne devrait assurer que 35 % à 40 % de ses vols contre 3 % à 5 % aujourd'hui. [34] Selon ses dernières statistiques, le trafic aérien reprendra son cours normal d'ici début 2024. [35]

Entre fin janvier et mi-mars 2020, plus de 185 000 vols ont été annulés à cause de cette pandémie, affirme le magazine Atalayar selon un rapport effectué par l'Association internationale du transport aérien (IATA), cela a entraîné des pertes de l'ordre de 103 milliards d'euros pour les compagnies aériennes.

## *Chapitre I : Notions sur le vol*

---

Selon Brian Pearce, économiste en chef de l'IATA, l'industrie aérienne est confrontée à « une baisse de 4,7 % de la demande mondiale », ce qui mettra fin à la croissance de 4,1 % prévue par l'IATA pour 2020. L'analyse actuelle de l'IATA estime que les compagnies aériennes les plus touchées seront les opérateurs des régions Asie, Pacifique et Europe, qui connaîtront une baisse de la demande de l'ordre de 13 % et une contraction du trafic de 8,2 % d'ici 2020.

D'autre part, le site d'actualité aéronautique et spatiale Air et Cosmos rapporte que selon les dernières prévisions de l'IATA (Association de l'Aviation Civile Internationale), l'ensemble des compagnies aériennes européennes pourrait perdre 23.1 milliards de dollars en 2020, avec 6 à 7 millions d'emplois liés au secteur aéronautique menacés.

L'IATA précise qu'un rétablissement accéléré en Europe est vital si on veut éviter ce pire scénario. Cela peut être réalisé par une action gouvernementale dans deux domaines prioritaires : un redécollage coordonné des voyages aériens avec l'ouverture des frontières (incluant l'élimination des procédures de quarantaine) et les règles opérationnelles fondées sur le corps de mesures sanitaires par l'OACI (Organisation de l'Aviation civile internationale), l'EASA (Agence européenne de sécurité aérienne) et l'ECDC (Centre européen de prévention et de contrôle des maladies), et le maintien d'une aide financière et réglementaire, en particulier par le biais d'aides financières directes, la prolongation de la suspension de la règle 80/20 sur l'utilisation des créneaux horaires et le report des taxes et charges. [36]

Aussi, le média marocain le 360 Afrique affirme que selon les dernières données de l'Association africaine des compagnies aériennes (AFRAA), partant des pertes enregistrées du début de l'année et des projections sur le reste de l'exercice en cours. Les transporteurs aériens africains pourraient accuser une perte de chiffre d'affaires estimée à 8.1 milliards de dollars en 2020, les plus grandes compagnies en seront les plus affectées comme Ethiopian Airlines, South African Airways, Egyptair, Royal Air Maroc, Kenya Airways, Air Algérie, Air Maurice et Tunisair. Cela est dû au fait de la fermeture des frontières durant cette période de pandémie qui a cloué au sol 95% de la flotte totale des compagnies aériennes africaines. [37]

## Chapitre I : Notions sur le vol

---

Autre point important, selon un article de l'Atlas Magazine Air France-KLM fait part d'une perte nette de 1,8 milliard EUR au cours des trois premiers mois de 2020.

**Tableau I.6 .** Impact du COVID-19 sur le transport aérien de mi-mars à fin mai 2020

Régions	Volume de transport en recul	Estimation des pertes potentielles en milliards USD
Asie-Pacifique	-37%	88
Amérique du Nord	-27%	50
Europe	-46%	76
Moyen-Orient	-39%	19
Afrique	-32%	4
Amérique du Sud	-41%	15
<b>Total marché</b>	<b>-38%</b>	<b>252</b>

Selon le même magazine, La reprise des vols intérieurs et internationaux s'accompagne de nouvelles mesures de prévention censées endiguer la propagation du Covid-19 à l'intérieur des avions. Ces mesures concernent en particulier la réduction du nombre de passagers et le protocole de distanciation sociale imposé par les autorités à bord des appareils.

L'ensemble des dispositifs de prévention entraîne des frais supplémentaires qui alourdissent les coûts opérationnels et les pertes accumulées par le secteur aviation.

Pour rassurer les voyageurs et éviter une nouvelle vague de contamination, les compagnies aériennes devront dès la reprise des vols réduire de 32% à 59% le nombre de sièges proposé à l'échelle mondiale.

Cette réduction de capacité se traduit pour les compagnies aériennes par une baisse de 1 825 à 3 208 millions de passagers et une perte de revenus de 238 à 418 milliards USD.

L'impact réel du COVID-19 dépend en fait de plusieurs facteurs tels que la durée et l'ampleur de la pandémie, les plans de déconfinement et le degré de confiance des passagers envers les compagnies aériennes.

D'autres facteurs contraignants peuvent aussi affecter le secteur et baisser sa rentabilité. Sont particulièrement appréhendés :

- une hausse de 50 à 100% des prix des billets d'avion,
- la limitation du nombre de bagages en cabine,
- la réduction des capacités des avions,
- l'application des mesures préventives pour désinfecter les appareils ; processus de nettoyage spéciaux, filtres à air plus performants, ...
- le recul du nombre de voyages d'affaires,
- une demande en baisse au cours des trois prochaines années. [38]

### **I.6 Conclusion :**

En somme, nous avons établi toutes les notions et organismes qui ont une relation directe avec le transport aérien, nous avons aussi cité le classement des différentes compagnies dans le monde et dans quelques continents et enfin nous avons parlé du trafic aérien et de son évolution généralement dans le monde et particulièrement en Algérie. Aussi, la pandémie du Covid-19 a eu un effet dévastateur sur le secteur aérien car tous les pays du monde entier ont fermé leurs frontières aériennes et donc les compagnies aériennes ont presque paralysé tous leurs avions.

# *Chapitre II: Généralités sur l'Optimisation*

### 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder quelques notions générales sur le monde de l'optimisation et ce que sont les heuristiques et les métaheuristiques.

#### II.1 Définition

L'optimisation est une branche des mathématiques conçue pour modéliser, analyser et résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes de minimisation ou de maximisation d'une fonction donnée sur un ensemble donné. L'optimisation joue un rôle important en recherche opérationnelle (domaine à la frontière entre l'informatique, les mathématiques et l'économie), dans les mathématiques appliquées (fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie), en analyse et en analyse numérique, en statistique pour l'estimation du maximum de vraisemblance d'une distribution, pour la recherche de stratégies dans le cadre de la théorie des jeux, ou encore en théorie du contrôle et de la commande. [39]

#### II.2 Minimisation

De manière plus formelle, l'optimisation traite les problèmes qui s'expriment de cette manière :

Etant donné une fonction  $f$  définie sur un ensemble  $E$  à valeurs dans l'ensemble des nombres réels il faut trouver un élément  $x^*$  de tel que  $f(x^*) < f(x)$  pour tous les  $x$  dans  $E$ .

On dit que l'on cherche à minimiser la fonction objectif ou la fonction-coût ou tout simplement l'objectif  $f$  sur l'ensemble  $E$  qui est appelé l'ensemble admissible dont les points sont les points admissibles et  $x^*$  est appelé solution du problème d'optimisation (aussi appelé minimum ou minimiseur ou l'optimum). On peut écrire le problème de différentes manières :

$$\inf \{f(x) \mid x \in E\} \text{ ou } \inf f(E)$$

#### II.3 Maximisation

Pour le problème de maximisation, il est traduit de la manière suivante :

$$\sup f(x) = -\inf (-f(x)) \quad \forall x \in E$$

Ce qui signifie qu'un problème de maximisation de  $f$  (à gauche ci-dessus) équivaut à la minimisation de la fonction  $-f$  (à droite ci-dessus) du fait que les solutions optimales sont les mêmes et que les valeurs optimales sont de signes différents.

### II.4 Domaines d'application

En fait ils sont extrêmement variés, on peut citer par exemple: optimisation d'un trajet, d'un prix de vente, d'une réaction chimique, du contrôle aérien, du rendement d'un appareil, du fonctionnement d'un moteur, de la gestion des lignes ferroviaires, du choix des investissements économiques etc. L'optimisation de ces systèmes permet de trouver une configuration idéale, d'obtenir un gain d'effort, de temps, d'argent, d'énergie, de matière première, ou encore de satisfaction.

Les problèmes de la dynamique des solides indéformables (surtout la dynamique des corps rigides articulés) ont souvent besoin de techniques d'optimisation mathématique, vu qu'on peut voir la dynamique des corps rigides comme résolution d'une équation différentielle ordinaire sur une variété contrainte ; les contraintes sont diverses contraintes géométriques non linéaires telles que « ces deux points doivent toujours coïncider », ou « ce point doit toujours être sur cette courbe ». Aussi, le problème de calculer les forces de contact peut être achevé en résolvant un problème de complémentarité linéaire, qui peut aussi être vu comme un problème d'optimisation quadratique.

Plusieurs problèmes de conception peuvent aussi être exprimés sous forme de problèmes d'optimisation. Cette application est appelée l'optimisation de forme. Un sous-ensemble récent et croissant de ce domaine s'appelle l'Optimisation multidisciplinaire qui, bien qu'utile en plusieurs problèmes, a été particulièrement appliquée aux problèmes d'ingénierie et technologie spatiale.

Un autre domaine qui utilise les techniques d'optimisation est la recherche opérationnelle.

L'optimisation est un des outils centraux de la microéconomie qui est basée sur le principe de la rationalité et de l'optimisation des comportements, le profit pour les entreprises, et l'utilité pour les consommateurs.

En mécanique on distingue trois formes d'optimisation :

## Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation

---

- l'optimisation de taille ou optimisation paramétrique, qui consiste à optimiser des dimensions (longueur, épaisseur, diamètre...) de la structure mécanique ;
- l'optimisation de forme, qui consiste à optimiser l'enveloppe d'une pièce sans changer la topologie, c'est-à-dire sans ajouter de trous dans la pièce ;
- l'optimisation topologique, qui consiste à faire varier la répartition de matière au sein d'un volume de départ donné

Très loin de constituer une liste exhaustive, ces quelques exemples attestent de la variété des formulations et préfigure la diversité des outils mathématiques susceptibles de résoudre ces problèmes. [39]

### II.5 Méthodes de Résolution

Il existe plusieurs méthodes de résolution qu'on peut les regrouper en trois parties :

#### II.5.1 Méthodes analytiques

Ce sont des méthodes qui existent mais sont très peu utilisées car elles sont difficiles à utiliser. [40]

#### II.5.2 Méthodes graphiques

Ce sont des méthodes qui peuvent marcher dans le cas de petites dimensions comme les équations du premier ou second degré.

La méthode graphique la plus connue est la méthode Simplex, cette dernière consiste à modéliser graphiquement les contraintes afin de déterminer la région admissible puis poser  $f(x)=c$  et tracer les courbes de niveau de la fonction objectif  $f$  en variant  $c$  et trouver les points d'intersection entre les courbes de niveaux et la région admissible et les injecter dans la fonction  $f$ . Le point qui donne la valeur optimale de  $f$  est appelé l'optimum. [40]

#### 1.1 Méthodes numériques :

Ce sont des méthodes itératives qu'on peut programmer facilement dans n'importe quel langage informatique (Java, C, Python etc.) et qui donnent des résultats satisfaisants. [40]

### II.6 Heuristique :

Une heuristique, est une méthode de calcul qui fournit rapidement une solution réalisable qui n'est pas nécessairement optimale ou exacte pour un problème d'optimisation difficile. C'est un concept

## ***Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation***

---

utilisé en optimisation combinatoire, en théorie des graphes, en théorie de la complexité des algorithmes et en intelligence artificielle. [41]

### **II.7 Méthode de séparation et évaluation**

Un algorithme par séparation et évaluation ou Branch and Bound en anglais est une méthode générique de résolution de problèmes d'optimisation combinatoire, cet algorithme consiste à séparer le problème en plusieurs sous-problèmes (branch) et de calculer la borne inférieure à chaque sous-problème (bound) en créant un arbre en divisant encore chaque nœud du sous-problème en nouveaux sous-problèmes. La borne inférieure est calculée très généralement en procédant à une relaxation linéaire du problème, c'est-à-dire qu'on considère que nous avons des nombres réels et non pas entiers pour avoir la meilleure valeur possible de la fonction objectif. Et lorsque la borne inférieure de l'un des nœuds, c'est-à-dire l'un des sous-problèmes, est supérieure à la valeur de la fonction objectif sans relaxation dans un autre nœud issu du même parent, cela veut dire qu'on peut l'éliminer car il est certain que tous les sous-problèmes issus de ce nœud ne pourront pas nous donner une meilleure solution.

Cette méthode est très utilisée pour résoudre des problèmes NP-difficiles, c'est-à-dire des problèmes considérés comme difficiles à résoudre efficacement. [42]

### **II.8 Les Métaheuristiques**

Certains problèmes d'optimisation sont sans contraintes et d'autres avec contraintes c'est-à-dire des restrictions ou des limitations qu'on doit respecter. Ces derniers peuvent être résolus en utilisant des méthodes bien précises donnant la solution optimale, d'autres par des heuristiques et d'autres plus difficiles qui peuvent être résolus par des métaheuristiques qui génèrent des solutions satisfaisantes.

Dans notre mémoire, notre modèle est un peu difficile car pour que l'avion puisse décoller à temps il faut réunir plusieurs paramètres comme la présence du Personnel Navigant Technique et des passagers

et de bonnes conditions météorologiques etc. Donc nous allons résoudre notre problème de minimisation des retards en utilisant une métaheuristique.

Il faut savoir qu'il y a plusieurs métaheurstiques pour un seul critère qui est, pour notre mémoire, le retard, mais les plus connues sont : Recuit simulé, Colonie de fourmis, Recherche Tabou et Algorithmes Génétiques.

### II.8.1 Recuit Simulé

La méthode de recuit simulé s'inspire du processus de recuit physique. Ce processus utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un solide cherche un état d'énergie minimale qui correspond à une structure stable du solide. En partant d'une haute température à laquelle le solide est devenu liquide, la phase de refroidissement conduit la matière liquide à retrouver sa forme solide par une diminution progressive de la température. Chaque température est maintenue jusqu'à ce que la matière trouve un équilibre thermodynamique. Quand la température tend vers zéro, seules les transitions d'un état à un état d'énergie plus faible sont possibles.

Les origines du recuit simulé remontent aux expériences réalisées par Metropolis et al. dans les années 50 pour simuler l'évolution d'un tel processus de recuit physique. Metropolis et al. utilisent une méthode stochastique pour générer une suite d'états successifs du système en partant d'un état initial donné. Tout nouvel état est obtenu en faisant subir un déplacement (une perturbation) aléatoire à un atome quelconque. Soit  $\Delta E$  la différence d'énergie occasionnée par une telle perturbation. Le nouvel état est accepté si l'énergie du système diminue ( $\Delta E \leq 0$ ). Sinon, il est accepté avec une probabilité définie par :  $p(\Delta E, T) = \exp(-\Delta E / (C_b \times T))$  où  $T$  est la température du système et  $C_b$  une constante physique connue sous le nom de *constante de Boltzmann*.

A chaque étape, l'acceptation ou non d'un nouvel état dont l'énergie est supérieure à celle de l'état courant est déterminée de manière probabiliste : un réel  $0 \leq \theta < 1$  est tiré aléatoirement et ensuite comparé avec  $p(\Delta E, T)$ . Si  $\theta \leq p(\Delta E, T)$ , alors le nouvel état est accepté pour remplacer l'état courant, sinon, l'état courant est maintenu. Après un grand nombre de perturbations, un tel processus fait évoluer le système vers un état d'équilibre thermodynamique selon la *distribution de Boltzmann* qui est définie par la probabilité de se trouver dans un état d'énergie  $E$  :  $\Pr(E) = c(T) \times \exp(-E / (C_b \times T))$  où  $c(T)$  est un facteur de normalisation.

Le recuit simulé peut être vu comme une version étendue de la méthode de descente. Le processus du

## Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation

---

recuit simulé répète une procédure itérative qui cherche des configurations de coût plus faible tout en acceptant de manière contrôlée des configurations qui dégradent la fonction de coût. A chaque nouvelle itération, un voisin  $s' \in N(s)$  de la configuration courante  $s$  est généré de manière aléatoire. Selon les cas, ce voisin sera soit retenu pour remplacer celle-ci, soit rejeté. Si ce voisin est de performance supérieure ou égale à celle de la configuration courante, *i.e.*,  $f(s') \leq f(s)$ , il est systématiquement retenu. Dans le cas contraire,  $s'$  est accepté avec une probabilité  $p(\Delta f, T)$  qui dépend de deux facteurs : d'une part l'importance de la dégradation  $\Delta f = f(s') - f(s)$  (les dégradations plus faibles sont plus facilement acceptées), d'autre part un paramètre de contrôle  $T$ , la température (une température élevée correspond à une probabilité plus grande d'accepter des dégradations). La température est contrôlée par une fonction décroissante qui définit un schéma de refroidissement. Les deux paramètres de la méthode définissent la longueur des paliers et la fonction permettant de calculer la suite décroissante des températures. En pratique, l'algorithme s'arrête et retourne la meilleure configuration trouvée lorsque aucune configuration voisine n'a été acceptée pendant un certain nombre d'itérations à une température ou lorsque la température atteint la valeur zéro. [43]

### II.8.2 Colonie de Fourmis

La méthode de colonie de fourmis ACO s'inspire du comportement des colonies de fourmis réelles. La méthode se caractérise par la combinaison d'une approche de construction et des mécanismes d'apprentissage fondés sur mémorisation. Le principe de cette méthode est le suivant.

Malgré la vision très limitée de chaque fourmi, une colonie de fourmis parvient à minimiser la longueur du chemin conduisant à une source de nourriture, grâce aux traces chimiques (phéromones) laissées par chacune des fourmis. Un principe analogue a été utilisé pour traiter le problème du voyageur de commerce ainsi que d'autres problèmes d'optimisation. La méthode consiste à réitérer un algorithme de construction (assimilé à l'action d'une fourmi) dans lequel chacun des choix est déterminé en tenant compte à la fois 1) d'un critère glouton, 2) d'une part d'aléatoire et 3) des traces laissées par les fourmis précédentes. Dans le cas du voyageur de commerce, une fourmi qui a emprunté une arête incite les fourmis suivantes à emprunter cette même arête à leur tour. Il faut noter que les colonies de fourmis sont souvent hybridées avec la recherche locale. [43]

### II.8.3 Recherche Tabou

La méthode tabou a été développée par Glover et indépendamment par Hansen. Cette méthode fait appel à un ensemble de règles et de mécanismes généraux pour guider la recherche de manière intelligente au travers de l'espace des solutions.

A l'inverse du recuit simulé qui génère de manière aléatoire une seule solution voisine  $s' \in N(s)$  à chaque itération, tabou examine un échantillonnage de solutions de  $N(s)$  et retient la meilleure  $s'$  même si  $s'$  est plus mauvaise que  $s$ . La recherche tabou ne s'arrête donc pas au premier optimum trouvé. Cependant, cette stratégie peut entraîner des cycles, par exemple un cycle de longueur 2 :  $s \rightarrow s' \rightarrow s \rightarrow s' \dots$ . Pour empêcher ce type de cycle, on mémorise les  $k$  dernières configurations visitées dans une mémoire à court terme et on interdit tout mouvement qui conduit à une de ces configurations. Cette mémoire est appelée la liste tabou, une des composantes essentielles de cette méthode. Elle permet d'éviter tous les cycles de longueur inférieure ou égale à  $k$ . La valeur de  $k$  dépend du problème à résoudre et peut éventuellement évoluer au cours de la recherche.

La mémorisation de configurations entières serait trop coûteuse en temps de calcul et en place mémoire et ne serait sans doute pas la plus efficace. En fait, la liste tabou mémorise des caractéristiques des configurations au lieu de configurations complètes. Plus précisément, lorsqu'un mouvement vient d'être effectué, c'est généralement la caractéristique perdue par la configuration courante qui devient tabou. Par exemple, avec la structure vectorielle de configuration définie précédemment pour les problèmes d'affectation sous contraintes, un type de caractéristique très simple est le couple  $\langle V, v \rangle$ ,  $V$  et  $v$  étant respectivement une variable et une valeur possible pour la variable. Supposons qu'un mouvement qui affecte la valeur  $v$  à la variable  $V$  en remplacement de la valeur  $v_0$  soit effectué, la caractéristique  $\langle V, v_0 \rangle$  est alors mémorisée et interdite pour les  $k$  itérations suivantes. Autrement dit, la variable  $V$  qui vient d'abandonner la valeur  $v_0$  ne pourra pas reprendre cette valeur pendant cette durée. Le résultat est que non seulement la configuration courante ne pourra pas réapparaître lors des  $k$  prochaines itérations, mais que de nombreuses autres configurations seront également interdites.

Lorsque les listes tabou font intervenir des caractéristiques de modifications, les interdictions qu'elles engendrent peuvent s'avérer trop fortes et restreindre l'ensemble des solutions admises à chaque itération d'une manière jugée trop brutale. Un mécanisme particulier, appelé l'aspiration, est mis en place afin de pallier cet inconvénient. Ce mécanisme permet de lever le statut tabou d'une configuration, sans pour autant introduire un risque de cycles dans le processus de recherche. La fonction d'aspiration peut être définie de plusieurs manières. La fonction la plus simple consiste à

## Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation

---

révoquer le statut tabou d'un mouvement si ce dernier permet d'atteindre une solution de qualité supérieure à celle de la meilleure solution trouvée jusqu'alors.

Il existe d'autres techniques intéressantes pour améliorer la puissance de la méthode tabou, en particulier, l'intensification et la diversification. Toutes les deux se basent sur l'utilisation d'une mémoire à long terme et se différencient selon la façon d'exploiter les informations de cette mémoire.

L'intensification se fonde sur l'idée d'apprentissage de propriétés favorables : les propriétés communes souvent rencontrées dans les meilleures configurations visitées sont mémorisées au cours de la recherche, puis favorisées pendant la période d'intensification. Une autre manière d'appliquer l'intensification consiste à mémoriser une liste de solutions de bonne qualité et à retourner vers une de ces solutions.

La diversification a un objectif inverse de l'intensification : elle cherche à diriger la recherche vers des zones inexplorées. Sa mise en œuvre consiste souvent à modifier temporairement la fonction de coût pour favoriser des mouvements n'ayant pas été effectués ou à pénaliser les mouvements ayant été souvent répétés. L'intensification et la diversification jouent donc un rôle complémentaire. Comme pour la plupart des méthodes heuristiques, il n'existe pas de résultats théoriques garantissant la convergence d'une procédure tabou vers un optimum global. La raison principale de cet état de fait tient à la nature même de la méthode. Celle-ci étant hautement adaptative et modulable, son analyse par les outils mathématiques est rendue plus difficile.

Cette méthode se caractérise par sa stratégie agressive de recherche (choix d'un des meilleurs mouvements à chaque itération) combinée avec différentes possibilités permettant de s'adapter au problème et d'intégrer des connaissances spécifiques. Cela demande naturellement un effort particulier d'adaptation de la méthode. [43]

### II.8.4 Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques classiques introduits par Holland s'appuient fortement sur un *codage universel* sous forme de chaînes 0/1 de longueur fixe et un ensemble d'opérateurs *génétiques* : la mutation, l'inversion et le croisement.

Un individu sous ce codage, appelé un chromosome, représente une configuration du problème. Les opérateurs « génétiques » sont définis de manière à opérer aléatoirement sur un ou deux individus sans aucune connaissance sur le problème.

Le croisement permet de produire deux nouvelles individus (enfants) à partir de deux individus (parents). Par exemple, le croisement bi-points consiste à choisir aléatoirement deux points de

## *Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation*

---

croisement et à échanger les segments des deux parents déterminés par ces deux points. Le croisement réalise donc uniquement des recombinaisons de valeurs (gènes) existantes entre deux parents et ne permet pas d'introduire de nouvelles valeurs dans les individus enfants. Pour cela, on applique la mutation. L'opérateur de mutation consiste à changer aléatoirement la valeur de certaines variables dans un individu. Dans les algorithmes génétiques la mutation est considérée comme un opérateur secondaire par rapport au croisement. Un cycle d'évolution complet d'un algorithme génétique est formé par l'application des opérateurs de sélection, croisement et mutation sur une population d'individus.

Bien que les algorithmes génétiques soient considérés aujourd'hui comme une méthode d'optimisation, l'objectif initial consistait à concevoir des systèmes d'apprentissage généraux, robustes et adaptatifs, applicables à une large classe de problèmes. En particulier, Holland s'est intéressé à l'élaboration d'une technique de programmation permettant l'évolution des programmes informatiques par reproduction, croisement et mutation. Cette motivation est à l'origine de l'universalité des algorithmes génétiques : ni le codage ni les opérateurs génétiques ne demandent des connaissances spécifiques du problème. Selon ce principe, pour un problème donné, il suffit de trouver une transformation des paramètres du problème en chaînes 0/1 et d'appliquer les opérateurs génétiques sur une population de solutions potentielles ainsi codées. C'est grâce à cette universalité que Holland a pu réaliser des analyses théoriques sur les algorithmes génétiques conduisant à la théorie des schémas et à la caractérisation du rôle et de l'importance du croisement. De plus, des résultats théoriques ont été obtenus sur la convergence des algorithmes génétiques standards.

L'universalité d'un tel algorithme pose évidemment des problèmes d'efficacité en pratique. En effet, en tant que méthode d'optimisation, un algorithme génétique classique se base uniquement sur des opérateurs « aveugles » et est donc rarement en mesure de produire des résultats comparables à ceux d'une méthode de voisinage. Une technique pour remédier à ce problème consiste à spécialiser l'algorithme génétique au problème donné. Plus précisément, à la place des opérateurs aléatoires, la mutation et le croisement sont adaptés en se basant sur des connaissances spécifiques du problème. De cette manière, la recherche est mieux guidée et donc plus efficace. Il est désormais établi que pour être efficace en optimisation, il est indispensable d'intégrer des connaissances du problème. Une autre voie intéressante pour améliorer l'efficacité des algorithmes génétiques consiste à combiner le cadre génétique avec d'autres méthodes de résolution. Ce point sera développé ultérieurement dans la section sur les méthodes hybrides.

## *Chapitre II : Généralités sur l'Optimisation*

---

Les algorithmes génétiques spécialisés ou hybrides ont été appliqués à de nombreuses applications dans des domaines très variés. Quant aux algorithmes génétiques purs, leurs résultats en optimisation combinatoire sont en général faibles. [43]

### **II.9 Conclusion**

En conclusion, ce chapitre est consacré à l'optimisation et son importance dans la résolution de divers problèmes comme ceux que nous avons rencontrés dans notre cursus d'ingénieur à savoir le problème des tournées de véhicules, du sac à dos et l'optimisation des prix de vente et des coûts.

*Chapitre III: Problématique  
abordée*

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons aborder le contexte de notre travail ainsi que les hypothèses sur notre problème pour ensuite le modéliser mathématiquement afin de le résoudre et obtenir des résultats que nous allons interpréter vers la fin.

### **III.2 Description de la problématique**

Afin d'éviter le problème que certains équipages travaillent plus que d'autres et que certains avions volent plus que d'autres. Nous allons, dans ce mémoire, équilibrer les charges entre les équipages et les avions pour la compagnie aérienne Air Algérie à l'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella. Nous allons programmer cela en utilisant une métaheuristique. En effet, pour un petit nombre de vols, un solveur d'Excel suffit pour résoudre ce problème, or pour un nombre important de vols, le solveur n'est plus efficace. Donc il est plus utile d'utiliser une métaheuristique afin qu'elle puisse donner une solution satisfaisante. Dans la partie ingénieur, nous avons conçu le modèle mathématique avec les vols internationaux de l'aéroport d'Oran seulement et nous l'avons résolu en utilisant un solveur du logiciel EXCEL, mais dans cette partie nous allons le résoudre en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé.

### **III.3 Hypothèses**

Dans ce travail, nous avons structuré les hypothèses de la manière suivante :

- Chaque avion doit être conduit par un équipage constitué d'un Commandant de Bord et un Copilote.
- le pilote ne peut pas conduire deux avions simultanément.
- Chaque vol ne doit pas se faire par deux avions en même temps.
- Chaque vol ne peut pas être affecté à deux équipages simultanément.
- Chaque équipage ne peut pas être affecté à deux vols en même temps.
- Chaque avion ne peut pas être affecté à deux vols en même temps.
- Chaque vol doit avoir un avion et un équipage dédiés.
- Chaque équipage doit effectuer au plus 2 vols par jour soit un aller-retour.

- Une période de service de l'équipage ne doit pas dépasser 14 heures par jour selon le Flight Safety Foundation. [33]
- La limite d'heures de vol est de 45 heures pour une période de 7 jours consécutifs selon le Flight Safety Foundation. [33]

### III.4 Modèle mathématique

Pour le modèle mathématique, Il est similaire à celui qu'on a établi dans la partie ingénieur. les notations utilisées dans le système (les entrées du système) :

#### Les Indices

$i$  ( $= 1, \dots, I$ ) ensemble des vols.

$j$  ( $= 1, \dots, J$ ) ensemble des équipes.

$j'$  ( $= 1, \dots, J$ ) ensemble des équipes avec  $j \neq j'$ .

$k$  ( $= 1, \dots, K$ ) ensemble des avions.

$k'$  ( $= 1, \dots, J$ ) ensemble des avions avec  $k \neq k'$ .

$t$  ( $= 1, \dots, T$ ) indice des jours.

#### Les Paramètres

$HDDP_{it}$  : l'heure de départ planifiée du vol  $i$  aller le jour  $t$ .

$HDAP_{it}$  : l'heure d'arrivée planifiée du vol  $i$  aller le jour  $t$ .

$HADP_{it}$  : l'heure de départ planifiée du vol  $i$  retour le jour  $t$ .

$HAAP_{it}$  : l'heure d'arrivée planifiée du vol  $i$  retour le jour  $t$ .

$D_{it}$  : la durée de vol  $i$  aller-retour le jour  $t$ .

#### Les variables de décisions (sortie du système)

$HTE_j$  : nombre d'heures de travail de l'équipage  $j$  sur une période d'une semaine.

$HVA_k$  : nombre d'heures de vol de l'avion  $k$  sur une période d'une semaine.

$y1_{jt}$  : variable de décision entière qui a une relation avec l'affectation des équipes (varie selon le nombre de vols).

$y2_{kt}$  : variable de décision entière qui a une relation avec l'affectation des avions (varie selon le nombre de vols).

$$\begin{aligned} \blacksquare \quad x1_{ijt} &= \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < s \leq i \text{ avec } s = y1_{jt} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \\ \blacksquare \quad x2_{ikt} &= \begin{cases} 1 & \text{si } 0 < m \leq i \text{ avec } m = y2_{kt} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned}$$

### La modélisation de système

➤ La fonction objectif qu'on a pour but d'optimiser c'est :

$$\sum_j \sum_{j' \neq j} |HTE_j - HTE_{j'}| + \sum_k \sum_{k' \neq k} |HVA_k - HVA_{k'}| \quad (\text{III.1})$$

➤ En respectant les contraintes suivantes :

$$1. \quad D_{it} = (HAAP_{it} - HDAP_{it}) + (HADP_{it} - HDDR_{it}) \quad (\text{III.2})$$

$$2. \quad HTE_j = \sum_t \sum_i D_{it} * x1_{ijt} \quad \forall j \quad (\text{III.3})$$

$$3. \quad HVA_k = \sum_t \sum_i D_{it} * x2_{ikt} \quad \forall k \quad (\text{III.4})$$

$$4. \quad \sum_j x1_{ijt} = 1 \quad \forall i, \forall t \quad (\text{III.5})$$

$$5. \quad \sum_i x1_{ijt} \leq 1 \quad \forall j, \forall t \quad (\text{III.6})$$

$$6. \quad \sum_k x2_{ikt} = 1 \quad \forall i, \forall t \quad (\text{III.7})$$

$$7. \quad \sum_i x2_{ikt} \leq 1 \quad \forall k, \forall t \quad (\text{III.8})$$

➤ **La fonction objectif (III.1)** est une fonction mono objectif qui minimise La somme des différences entre le nombre d'heures de travail de l'équipe j et celle de toutes les autres et La somme des différences entre le nombre d'heures de vol de l'avion k et celui de tous les autres avions.

➤ **La contrainte (III.2)** permet de calculer la durée de chaque vol i le jour t.

- **La contrainte (III.3)** permet de calculer le nombre d'heures de travail de chaque équipe pendant une semaine après affectation.
- **La contrainte (III.4)** permet de calculer le nombre d'heures de vol de chaque avion pendant une semaine après affectation.
- **La contrainte (III.5)** assure que le vol  $i$  le jour  $t$  doit être obligatoirement affecté à un équipage mais on ne peut pas affecter deux équipages au même vol  $i$ .
- **La contrainte (III.6)** assure que l'équipage  $j$  s'il est affecté à un vol  $i$  (aller-retour) le jour  $t$  et il ne peut pas être affecté à un autre vol  $i$  le même jour  $t$ .
- **La contrainte (III.7)** assure que le vol  $i$  le jour  $t$  doit obligatoirement avoir un avion  $k$  à disposition, mais on ne peut pas affecter deux avions au même vol  $i$ .
- **La contrainte (III.8)** assure que l'avion  $k$  s'il est affecté à un vol  $i$  (aller-retour) le jour  $t$  mais il ne peut pas être affecté à un autre vol  $i$  le même jour  $t$ .

### III.5 Saisie des données

Les données que nous allons utiliser pour programmer le modèle mathématique décrit précédemment concernent le planning des vols internationaux de la compagnie internationale Air Algérie à l'aéroport d'Oran Ahmed Ben Bella (voir Tableau III.1).

### III.6 Approche de résolution

Dans cette partie, nous allons entamer notre approche de résolution en expliquant à nos lecteurs les étapes de résolution de notre problème décrit précédemment. En effet, à l'aide des données que nous avons à disposition sur EXCEL, nous avons programmé le modèle mathématique de l'équilibrage des charges avec le langage Python et nous avons fait le choix de résoudre ce problème en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé parce qu'elle est utilisée pour des problèmes de grande taille et nous donne généralement des solutions de bonne qualité en peu de temps.

## Chapitre III : Problématique abordée

**Tableau III.1.** Planning des vols internationaux de la compagnie aérienne Air Algérie à l'aéroport d'Oran en heures.

ALLER				JOUR	RETOUR			
DESTINATION	H.DEPART	H.ARRIVEE	DD		PROVENANCE	H.DEPART	H.ARRIVEE	DA
LYON	7,25	9,42	2,17	S A M E D I	LYON	10,50	12,58	2,08
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50		PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
ISTANBUL	9,42	15,25	5,83		ISTANBUL	16,42	19,00	2,58
BARCELONE	13,75	15,25	1,50		BARCELONE	16,25	17,75	1,50
LILLE	14,67	17,50	2,83		LILLE	18,50	21,17	2,67
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
PARIS-CDG	16,75	19,33	2,58		PARIS-CDG	20,33	22,75	2,42
BARCELONE	8,42	9,75	1,33	D I M A N C H E	BARCELONE	10,75	12,25	1,50
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50		PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
ISTANBUL	9,42	15,25	5,83		ISTANBUL	16,42	19	2,58
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
LYON	13,25	15,42	2,17		LYON	16,50	18,58	2,08
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
PARIS-CDG	16,75	19,33	2,58		PARIS-CDG	20,33	22,75	2,42
JEDDAH	15,17	18,50	3,33		JEDDAH	21,42	23,83	2,42
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50	L U N D I	PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
LILLE	9,50	12,33	2,83		LILLE	13,33	16,00	2,67
MONTPELLIER	13,92	15,50	1,58		MONTPELLIER	17,17	19,75	2,58
CASABLANCA	14,33	15,67	1,33		CASABLANCA	17,17	18,50	1,33
LYON	14,75	16,92	2,17		LYON	17,92	20,00	2,08
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
MEDINE	14,67	16,92	2,25		MEDINE	18,42	19,42	1,00
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50	M A R D I	PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
CASABLANCA	9,00	11,58	2,58		CASABLANCA	12,83	15,25	2,42
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
LILLE	9,50	12,33	2,83		LILLE	13,33	15,92	2,58
ISTANBUL	9,42	15,25	5,83		ISTANBUL	16,42	19,00	2,58
LYON	14,75	16,92	2,17		LYON	17,92	20,00	2,08
PARIS-CDG	14,75	17,42	2,67		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	16,25	17,25	1,00		ALICANTE	19,67	22,00	2,33
PARIS-CDG	16,75	19,33	2,58		PARIS-CDG	20,33	22,75	2,42
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50	M E R C R E D I	PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
ISTANBUL	9,42	15,25	5,83		ISTANBUL	16,50	19,08	2,58
LILLE	9,50	12,33	2,83		LILLE	13,33	15,92	2,58
MEDINE	9,00	16,25	7,25		MEDINE	17,25	21,67	4,42
LYON	14,75	16,92	2,17		LYON	17,92	20,00	2,08
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
PARIS-CDG	16,75	19,33	2,58		PARIS-CDG	20,33	22,75	2,42
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50	J E U D I	PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
BARCELONE	8,42	9,75	1,33		BARCELONE	10,75	12,25	1,50
LYON	8,00	10,17	2,17		LYON	11,25	13,33	2,08
BORDEAUX	13,25	15,00	1,75		BORDEAUX	16,00	17,75	1,75
CASABLANCA	14,33	15,67	1,33		CASABLANCA	17,17	18,50	1,33
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
MARSEILLE	14,75	16,50	1,75		MARSEILLE	17,50	19,33	1,83
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
JEDDAH	16,17	17,50	1,33		JEDDAH	18,42	19,42	1,00
LYON	8,00	10,17	2,17	V E N D R E D I	LYON	11,25	13,33	2,08
PARIS-ORLY	8,00	10,50	2,50		PARIS-ORLY	11,75	14,17	2,42
MEDINE	9,00	16,25	7,25		MEDINE	17,25	21,67	4,42
CASABLANCA	9,00	11,58	2,58		CASABLANCA	12,83	15,25	2,42
MARSEILLE	9,00	10,75	1,75		MARSEILLE	11,75	13,58	1,83
TOULOUSE	9,50	11,08	1,58		TOULOUSE	12,08	13,67	1,58
MONTPELLIER	13,92	15,50	1,58		MONTPELLIER	17,17	19,75	2,58
PARIS-CDG	14,83	17,42	2,58		PARIS-CDG	18,58	21,00	2,42
ALICANTE	15,33	16,33	1,00		ALICANTE	17,33	18,33	1,00
PARIS-CDG	16,75	19,33	2,58		PARIS-CDG	20,33	22,75	2,42

## Chapitre III : Problématique abordée

➤ Où DD et DA sont respectivement les durées de vols Aller et Retour (les différences entre les heures de départ et d'arrivée pour chaque vol) et en attribuant chaque destination à un numéro de vol cela donne ceci (voir Tableau III.2) :

**Tableau III.2.** Les horaires de départ et d'arrivée des vols aller-retour en heures.

		Heure de départ planifiée ↗							
		HDDP	SAMEDI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
A L L E R	<b>Vol 1</b>	7,25	8,42	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	
	<b>Vol 2</b>	8,00	8,00	9,00	9,00	9,00	8,42	8,00	
	<b>Vol 3</b>	9,00	9,00	9,50	9,00	9,50	8,00	9,00	
	<b>Vol 4</b>	9,50	9,42	9,50	9,50	9,42	13,25	9,00	
	<b>Vol 5</b>	9,42	9,50	13,92	9,50	9,50	14,33	9,00	
	<b>Vol 6</b>	13,75	13,25	14,33	9,42	9,00	9,50	9,50	
	<b>Vol 7</b>	14,67	14,83	14,75	14,75	14,75	14,83	13,92	
	<b>Vol 8</b>	14,83	15,33	14,83	14,75	14,83	14,75	14,83	
	<b>Vol 9</b>	15,33	16,75	15,33	16,25	15,33	15,33	15,33	
	<b>Vol 10</b>	16,75	15,17	14,67	16,75	16,75	16,17	16,75	
		Heure d'arrivée planifiée ↘							
		HDAP	SAMEDI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
	<b>Vol 1</b>	9,42	9,75	10,50	10,50	10,50	10,50	10,50	10,17
	<b>Vol 2</b>	10,50	10,50	10,75	10,75	10,75	10,75	9,75	10,50
	<b>Vol 3</b>	10,75	10,75	11,08	11,58	11,08	11,08	10,17	16,25
	<b>Vol 4</b>	11,08	15,25	12,33	11,08	15,25	15,25	15,00	11,58
	<b>Vol 5</b>	15,25	11,08	15,50	12,33	12,33	12,33	15,67	10,75
	<b>Vol 6</b>	15,25	15,42	15,67	15,25	16,25	16,25	11,08	11,08
	<b>Vol 7</b>	17,50	17,42	16,92	16,92	16,92	16,92	17,42	15,50
	<b>Vol 8</b>	17,42	16,33	17,42	17,42	17,42	17,42	16,50	17,42
	<b>Vol 9</b>	16,33	19,33	16,33	17,25	16,33	16,33	16,33	16,33
	<b>Vol 10</b>	19,33	18,50	16,92	19,33	19,33	19,33	17,50	19,33

## Chapitre III : Problématique abordée

R E T O U R	Heure de départ planifiée ↗							
	HADP	SAMEDI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
	Vol 1	10,50	10,75	11,75	11,75	11,75	11,75	11,25
	Vol 2	11,75	11,75	11,75	11,75	11,75	10,75	11,75
	Vol 3	11,75	11,75	12,08	12,83	12,08	11,25	17,25
	Vol 4	12,08	16,42	13,33	12,08	16,50	16,00	12,83
	Vol 5	16,42	12,08	17,17	13,33	13,33	17,17	11,75
	Vol 6	16,25	16,50	17,17	16,42	17,25	12,08	12,08
	Vol 7	18,50	18,58	17,92	17,92	17,92	18,58	17,17
	Vol 8	18,58	17,33	18,58	18,58	18,58	17,50	18,58
Vol 9	17,33	20,33	17,33	19,67	17,33	17,33	17,33	
Vol 10	20,33	21,42	18,42	20,33	20,33	18,42	20,33	
Heure d'arrivée planifiée ↘								
HAAP	SAMEDI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI	
Vol1	12,58	12,25	14,17	14,17	14,17	14,17	13,33	
Vol2	14,17	14,17	13,58	13,58	13,58	12,25	14,17	
Vol3	13,58	13,58	13,67	15,25	13,67	13,33	21,67	
Vol4	13,67	19,00	16,00	13,67	19,08	17,75	15,25	
Vol5	19,00	13,67	19,75	15,92	15,92	18,50	13,58	
Vol6	17,75	18,58	18,50	19,00	21,67	13,67	13,67	
Vol7	21,17	21,00	20,00	20,00	20,00	21,00	19,75	
Vol8	21,00	18,33	21,00	21,00	21,00	19,33	21,00	
Vol9	18,33	22,75	18,33	22,00	18,33	18,33	18,33	
Vol10	22,75	23,83	19,42	22,75	22,75	19,42	22,75	

- Et en additionnant les durées de vols aller-retour pour chaque vol, cela donne le tableau suivant (voir Tableau III.3) :

**Tableau III.3.** La durée totale en heures des vols aller-retour de chaque vol *i* durant les jours de semaine.

DA+DR	SAMEDI	DIMANCHE	LUNDI	MARDI	MERCREDI	JEUDI	VENDREDI
Vol 1	4,25	2,83	4,92	4,92	4,92	4,92	4,25
Vol 2	4,92	4,92	3,58	3,58	3,58	2,83	4,92
Vol 3	3,58	3,58	3,17	5,00	3,17	4,25	11,67
Vol 4	3,17	8,42	5,50	3,17	8,42	3,50	5,00
Vol 5	8,42	3,17	4,17	5,42	5,42	2,67	3,58
Vol 6	3,00	4,25	2,67	8,42	11,67	3,17	3,17
Vol 7	5,50	5,00	4,25	4,25	4,25	5,00	4,17
Vol 8	5,00	2,00	5,00	5,08	5,00	3,58	5,00
Vol 9	2,00	5,00	2,00	3,33	2,00	2,00	2,00
Vol 10	5,00	5,75	3,25	5,00	5,00	2,33	5,00

## Chapitre III : Problématique abordée

---

Dans ce qui va suivre, nous allons expliquer en détail les étapes de programmation de notre modèle en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé.

### III.6.1 Codage

Pour le codage, nous avons utilisé un codage matriciel en nombres entiers, c'est-à-dire que chaque solution est représentée sous forme de matrice avec des nombres entiers à l'intérieur.

Exemple : Soit  $AFE_{jt}$  résultat de l'affectation de l'équipage  $j$  au vol le jour  $t$ .

$$AFE_{jt} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 4 \\ 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

Où chaque ligne représente un équipage  $j$  et chaque colonne un jour de semaine  $t$ , les nombres entiers sont les numéros de vol où chaque équipage  $j$  y est affecté le jour  $t$ .

Dans notre exemple, le numéro 4 est le numéro auquel est affecté l'équipage 2 le jour 3.

Et on effectue la même procédure en même temps avec les avions en considérant  $AFA_{kt}$  comme résultat d'affectation de l'avion  $k$  au vol le jour  $t$

### III.6.2 Algorithme

Voici l'algorithme de la métaheuristique Recuit Simulé :

1. Engendrer une configuration initiale  $S_0$  de  $S$  :  $S \leftarrow S_0$ .
2. Initialiser la température  $T$  en fonction du schéma de refroidissement.
3. Répéter
4. Engendrer un voisin  $S'$  de  $S$ .
5. Calculer  $\Delta E = f(S') - f(S)$ .
6. Si  $\Delta E \leq 0$  alors  $S \leftarrow S'$
7. Sinon accepter  $S'$  comme la nouvelle solution avec la probabilité  $P(E,T) = \exp(-\Delta E/T)$ .
8. Fin si
9. Mettre à jour  $T$  en fonction du schéma de refroidissement (réduire la température).
10. Jusqu'à la condition d'arrêt.
11. Retourner la meilleure configuration trouvée. [44]

### III.6.3 Génération des voisins

Pour la génération des voisins, nous allons prendre un jour au hasard où nous allons prendre deux équipages de manière aléatoire et nous allons permuter le numéro de vol auquel ils sont assignés entre eux.

Exemple :  $AFE_{jt}$  avant la génération d'un voisin

$$AFE_{jt} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 0 \\ 1 & 2 & 4 \\ 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

$AFE_{jt}$  après la génération d'un voisin

$$AFE_{jt} = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 \\ 1 & 3 & 4 \\ 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

Dans cet exemple nous avons pris le 2<sup>ème</sup> jour et nous avons permuté entre les numéros de vol de l'équipage 1 et l'équipage 2.

Et on effectue la même procédure en même temps avec les avions en considérant  $AFA_{kt}$  comme résultat d'affectation de l'avion k au vol le jour t car la fonction objectif dépend de l'équipage j et de l'avion k.

Puis on calcule la fonction objectif des nouvelles valeurs d' $AFE_{jt}$  et d' $AFE_{kt}$  et nous effectuons la différence avec la fonction objectif des anciennes valeurs d' $AFE_{jt}$  et d' $AFE_{kt}$ . Si la différence est négative nous acceptons la nouvelle solution car nous avons un problème de minimisation des écarts pour les heures de travail entre chaque équipage et les heures de vol entre chaque avion. Par contre, si elle est positive, nous l'acceptons à condition que la probabilité  $P(E,T) = \exp(-\Delta E/T)$  soit inférieure à un nombre aléatoire généré par le programme, sinon nous gardons les anciennes valeurs d' $AFE_{jt}$  et d' $AFE_{kt}$  et nous générerons un nouveau voisin.

### III.6.4 Paramètres de l'algorithme

Pour les paramètres, nous avons pris :

1. La température  $T = 600\ 000$ .

2. Le coefficient de refroidissement  $\alpha=0.9$ .
3. Le nombre d'itération = 100 000

Et pour chaque itération, la nouvelle température est de  $T * \alpha$ .

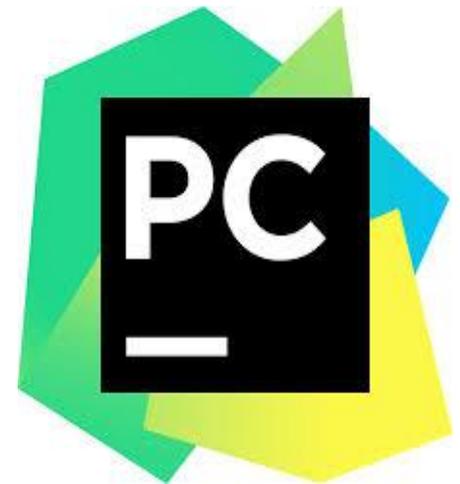
### III.7 Programmation, résultats et interprétation

Dans cette partie, nous allons programmer notre modèle mathématique avec une métaheuristique du Recuit Simulé en utilisant le logiciel Pycharm qui va nous donner des résultats que nous allons voir et interpréter par la suite.

#### III.7.1 Définition de Pycharm

PyCharm est un environnement de développement intégré utilisé pour programmer en langage Python.

Il permet l'analyse de code et contient un débogueur graphique. Il permet également la gestion des tests unitaires, l'intégration de logiciel de gestion de versions, et supporte le développement web avec Django.



Développé par l'entreprise tchèque JetBrains, c'est un logiciel multiplateforme qui fonctionne sous Windows, Mac OS X et Linux. Il est décliné en édition professionnelle, diffusé sous licence propriétaire, et en édition communautaire diffusé sous licence Apache. [45]

#### III.7.2 Résultats

Après avoir programmé notre modèle mathématique avec le logiciel Pycharm avec un nombre d'équipages égal à 12 et un nombre d'avions égal à 11 nous avons trouvé les résultats suivants :

### Chapitre III : Problématique abordée

---

\_\_\_\_\_C\_AFE\_\_\_\_\_

[	4	1	5	2	8	10	2]
[	8	7	9	5	2	0	4]
[	2	0	2	7	4	2	9]
[	3	8	4	10	3	8	6]
[	0	10	3	6	5	4	0]
[	10	4	0	9	0	3	8]
[	5	6	0	1	10	0	5]
[	0	2	1	8	7	5	7]
[	6	5	10	4	6	9	0]
[	9	0	6	0	1	1	3]
[	1	3	8	3	0	6	10]
[	7	9	7	0	9	7	1]

La matrice AFE ci-dessus nous donne le résultat l'affectation des équipages aux vols durant les jours de semaine.

\_\_\_\_\_C\_AFA\_\_\_\_\_

[	10	2	3	3	9	3	7]
[	3	7	6	7	4	10	9]
[	7	0	8	10	5	5	2]
[	2	10	7	8	8	4	0]
[	1	6	1	9	0	0	3]
[	6	8	10	6	2	6	4]
[	5	3	2	0	10	2	10]
[	0	4	5	4	7	1	5]
[	9	5	4	5	3	7	1]
[	8	9	0	1	1	8	8]
[	4	1	9	2	6	9	6]

La matrice AFA ci-dessus nous donne le résultat de l'affectation des avions aux vols durant les jours de semaine.

Ces résultats d'affectation d'équipages AFE et d'avions AFA nous ont donné, après plusieurs exécutions du programme sous Pycharm, la plus petite solution retrouvée avec une valeur de la fonction objectif de : **Fo= 11.17.**

### III.7.3 Interprétation

Le dernier résultat que nous avons trouvé c'est-à-dire **Fo= 11.17** représente l'ensemble de variations entre les heures de travail entre chaque équipage et les heures de vol entre chaque avion qui est de 11.17 heures soit 11 heures et 10 minutes. Soit une variation moyenne de 0.092 heures soit 7 minutes et 6 secondes de variation entre les 12 équipages et les 11 avions que nous avons à disposition soit une différence moyenne entre les heures de travail entre chaque équipage et entre les heures de vol de chaque avion de 5 minutes et 32 secondes ce qui est acceptable et négligeable devant une heure ou deux. Ce qui veut dire que les charges sont bien équilibrées entre chaque équipage et les heures de vol sont bien équilibrés pour les avions.

Bien sûr la solution que nous avons trouvée ici n'est pas la solution optimale mais une solution satisfaisante car dans la partie ingénieur nous avons trouvé, en soumettant les mêmes données à un solveur EXCEL, une valeur de la fonction objectif de 10,67 heures soit 10 heures et 40 minutes pour les 12 équipages et les 11 avions soit une variation moyenne de 0.0881 heures qui est 5 minutes et 17 secondes. Donc la solution trouvée en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé est proche de 4.7% de la solution optimale en utilisant un solveur EXCEL dans la partie ingénieur. Donc la solution que nous a donné la métaheuristique Recuit Simulé est une solution de très bonne qualité car elle très proche de la solution optimale donnée par le solveur EXCEL.

### III.8 Conclusion :

En conclusion, nous avons vu comment équilibrer les charges entre les équipages et les avions de manière stochastique en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé.

## *Conclusion générale*

---

En somme, nous avons vu dans le premier chapitre quelques chiffres sur le trafic aérien avant et après la pandémie de la COVID-19. En effet, avant cette pandémie le trafic aérien n'a jamais cessé d'accroître mais la pandémie du Coronavirus a paralysé le trafic aérien durant des mois entraînant des pertes de milliards de dollars aux compagnies aériennes mondiales.

Nous avons aussi dans le deuxième chapitre quelques notions fondamentales sur l'optimisation, leur domaine d'application et les différents heuristiques et métaheuristiques qui permettent de résoudre des problèmes NP-difficiles.

Dans le troisième chapitre nous avons abordé notre problématique qui concerne l'équilibrage des charges pour les équipages et les avions en utilisant la métaheuristique du Recuit Simulé et nous avons trouvé une solution proche de la solution optimale qu'on a trouvée dans la partie ingénieur d'où l'importance des métaheuristiques dans la résolution d'un grand nombre de vols durant une journée de semaine.

Dans cette étude c'est-à-dire dans les deux parties ingénieur et master, nous avons travaillé avec les vols internationaux d'Air Algérie à l'aéroport d'Oran avec une fréquence de 10 vols par jour qui a été facilement programmable en utilisant un solveur EXCEL ce qui a donné une solution meilleure à celle trouvée en programmant avec une métaheuristique. Cependant, avec un nombre important de vols, d'équipages et d'avions, le solveur devient inefficace et c'est là que les métaheuristiques jouent un rôle important dans l'équilibrage des charges en affectant les équipages et les avions aux vols en proposant des solutions de bonne qualité.

Ce mémoire nous a permis d'approfondir nos connaissances sur le domaine du trafic aérien et nous a permis de mettre en pratique ce que nous avons vu sur l'optimisation et la programmation durant notre cursus d'ingénieur.

## Recherche Bibliographique

- [1] [https://www.tourmag.com/Liberalisation-du-traffic-aerien-qu-est-ce-qu-un-droit-de-traffic-et-comment-est-il-attribue\\_a89320.html](https://www.tourmag.com/Liberalisation-du-traffic-aerien-qu-est-ce-qu-un-droit-de-traffic-et-comment-est-il-attribue_a89320.html)
- [2] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transport\\_aerien#Impact\\_sur\\_l'environnement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transport_aerien#Impact_sur_l'environnement)
- [3] <https://immolidays.com/avantages-et-inconvenients-des-voyages-aeriens/>
- [4] <https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr/definition/passager/>
- [5] <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Avion>
- [6] <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Transport-aerien/Equipage-aeronef.htm>
- [7] [www.google.com/retard](http://www.google.com/retard)
- [8] <https://fr.april-international.com/fr/se-deplacer/les-principales-causes-de-retard-des-avions>
- [9] <https://educalingo.com/fr/dic-fr/aerodrome>
- [10] <https://fr.wikipedia.org/wiki/secteur-aerien>
- [11] <https://fr.wikipedia.org/wiki/espace-aerien>
- [12] Marie BENEJEAN « Informatisation des productions d'information et des activités de communication dans les relations pilotes-contrôleurs : contradictions et reconfigurations entre technologies en projet et mises en pratiques » Université de Toulouse 2013 p. 32/35/ 41-45/46-48
- [13] <https://fr.wikipedia.org/wiki/plan-de-vol>
- [14] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Compagnie\\_aerienne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Compagnie_aerienne)
- [15] <https://www.vol-retarde.fr/blog/2019/06/06/compagnies-aeriennes-les-8-plus-grandes-compagnies-aeriennes-deurope>
- [16] <https://fr.ripleybelieves.com/largest-airlines-in-asia-6201>
- [17] <https://afrique.le360.ma/maroc-autres-pays/economie/2018/07/24-afrique-les-dix-meilleures-compagnies-aeriennes-africaines-en-2018-22074>
- [18] <https://fr.statista.com/statistiques/500415/plus-grandes-compagnies-aeriennes-mondiales-pkp/>
- [19] <http://www.logistiqueconseil.org/Articles/Transport-aerien/Ataf-iata-afra-oaci.htm>
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_Safety\\_Foundation](https://en.wikipedia.org/wiki/Flight_Safety_Foundation)
- [21] <https://definition-simple.com/trafic-aerien/>
- [22] Jamal ANAMMAS « Autour de la résolution du conflit aérien » FST de Fès 2016

- [23] <https://fr.wikipedia.org/wiki/service-de-la-circulation-aérienne>
- [24] <https://fr.wikipedia.org/wiki/gestion-des-flux-du-traffic-aérien>
- [25] <https://fr.wikipedia.org/wiki/gestion-espace-aérien>
- [26] <https://www.capital.fr/entreprises-marches/airbus-la-flotte-mondiale-davions-passagers-va-plus-que-doubler-dici-2037-1296688>
- [27] [https://transport.sia-partners.com/sites/default/files/evolution\\_du\\_traffic\\_aerien\\_-\\_projets\\_dinfrastructure\\_vf.pdf](https://transport.sia-partners.com/sites/default/files/evolution_du_traffic_aerien_-_projets_dinfrastructure_vf.pdf)
- [28] <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/IS.AIR.PSGR?end=2018&start=1970>
- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Air\\_Algerie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Air_Algerie)
- [30] <https://airalgerie.dz/experience-voyage/notre-flotte/>
- [31] [https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9roport\\_d%27Oran\\_-\\_Ahmed\\_Ben\\_Bella](https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9roport_d%27Oran_-_Ahmed_Ben_Bella)
- [32] <https://theconversation.com/trafic-aerien-mondial-une-croissance-fulgurante-pas-prete-de-sarreter-116107>
- [33] [https://flightsafety.org/files/bars/bars\\_overview\\_fr.pdf](https://flightsafety.org/files/bars/bars_overview_fr.pdf)
- [34] [https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/06/17/covid-19-la-convalescence-du-transport-aerien-pourrait-durer-dix-ans\\_6043161\\_3234.html](https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/06/17/covid-19-la-convalescence-du-transport-aerien-pourrait-durer-dix-ans_6043161_3234.html)
- [35] <https://www.lemonde.fr/economie/article/2020/07/28/retour-a-la-normale-pas-avant-2024-pour-le-traffic-aerien>
- [36] <https://atalayar.com/fr/content/le-covid-19-fait-couler-le-transport-a%C3%A9rien-de-passagers>
- [37] <https://www.air-cosmos.com/article/iata-le-pire-est-encore-venir-pour-le-transport-arien-europen-23262>
- [38] <https://afrique.le360.ma/maroc-algerie-tunisie-autres-pays/economie/2020/06/08/30796-transport-aerien-le-covid-19-risque-dentraîner-la-faillite-de>
- [39] <https://www.atlas-mag.net/article/transport-aerien-impact-du-covid-19-et-estimation-des-couts>
- [40] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Optimisation\\_\(mathématiques\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Optimisation_(mathématiques))
- [41] [Cours Optimisation Professeur CHERKI Brahim 3<sup>ème</sup> année génie industriel ESSAT.](#)
- [42] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Séparation\\_et\\_évaluation](https://fr.wikipedia.org/wiki/Séparation_et_évaluation)
- [43] <http://www.info.univ-angers.fr/pub/hao/papers/RIA.pdf>
- [44] [Cours Métaheuristiques Docteur MALIKI Fouad 5<sup>ème</sup> année génie industriel ESSAT Chapitre2.](#)
- [45] <https://fr.wikipedia.org/wiki/PyCharm>

## **Résumé :**

Ce mémoire a pour objectif d'équilibrer les temps de service entre chaque équipage et les heures de vol entre chaque avion pour la compagnie aérienne Air Algérie avec un nombre important de vols durant une semaine en utilisant une métaheuristique.

**Mots Clés :** Equilibrage des charges, Equipage, Avion, Aéroport, Air Algérie.

## **Abstract :**

The purpose of this dissertation is to balance the service times between each crew and the flight hours between each aircraft for the airline Air Algérie with a significant number of flights during a week using a metaheuristic.

**Keywords :** Charge balancing, Crew, Aircraft, Airport, Air Algérie.

## **ملخص**

و الغرض من هذه المذكرة هو موازنة أوقات الخدمة بين كل طاقم و عدد ساعات الرحلة بين كل طائرة تابعة لشركة الخطوط الجوية الجزائرية، و عدد كبير منها من الرحلات الجوية خلال أسبوع باستخدام أداة تجريبية.

**الكلمات المفتاحية :** موازنة التحميل، الطاقم، الطائرة، المطار، الخطوط الجوية الجزائرية.