

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida 1  
Institut d'Aéronautique et des Études Spatiales  
Département de Navigation Aérienne



**Mémoire de fin d'études**  
En vue de l'obtention du diplôme de  
**Master en Aéronautique**  
Option : Opérations Aériennes  
Thème

---

*Optimisation de la gestion du personnel  
naviguant*

---

*Présenté par :*

*M<sup>lle</sup> ZAHRA Boutheyna*

*M<sup>r</sup> AYACHI Abdelkader*

*Encadré par :*

*Promotrice M<sup>me</sup> BENMEGGOURA Sarah*

*Promotion : 2022 / 2023*

# *Remerciements*

*P*our commencer, nous exprimons notre gratitude envers Allah pour nous avoir guidés et soutenus tout au long de ce travail de recherche.

*N*ous souhaitons également exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à notre projet. Votre soutien moral, vos conseils et votre présence ont été d'une importance capitale pour notre réussite.

*N*ous tenons tout particulièrement à remercier notre promotrice, Madame Benmeggoura Sarah, pour son soutien dévoué, son expertise et ses précieux conseils tout au long de notre travail. Nous sommes sincèrement reconnaissants envers elle pour son accompagnement attentif et son implication passionnée dans notre projet de recherche.

*E*nfin, nous exprimons notre reconnaissance envers Madame la Directrice Benkheda pour son appui et ses encouragements.

*C*haque de ces personnes a joué un rôle crucial dans la réalisation de cette recherche, et nous leur en sommes profondément reconnaissants pour leur contribution inestimable.

## *Dédicace*

*T*out d'abord, je tiens à exprimer ma gratitude envers Dieu pour m'avoir donné la force et le courage nécessaires pour accomplir ce travail modeste. Je dédie ce travail :

*À* mes parents, surtout à ma mère, ma source de vie et de bonheur. Tu as été ma plus grande inspiration. Tu m'as toujours soutenue de manière inconditionnelle, m'encourageant à poursuivre mes rêves et à réussir mes études. J'espère que vous êtes fiers de votre fille.

*À* ma soeur HIBA, qui m'a soutenu chaque jour et était toujours à mes côtés. Ma future docteure, je vous souhaite une réussite exemplaire dans votre vie. Je suis toujours à vos côtés.

*S*ans oublier mon frère OMAR, à qui je souhaite tout le succès possible dans sa vie.

*U*n remerciement spécial à mon binôme, ABDELKADER, pour sa patience, son soutien et sa compréhension tout au long de ce projet.

*T*ous mes amis de ma promo, merci pour votre amitié.

*E*nfin, à tous ceux qui ont contribué à ma réussite, qui m'ont aimé, soutenu et encouragé sans limite, votre présence dans ma vie est un véritable trésor.

*Boutheyna*

## *Dédicace*

*T*out d'abord, je remercie Allah de m'avoir donné la force et la persévérance nécessaires pour arriver jusqu'ici.

*J*e suis également profondément reconnaissant envers mes parents, qui ont été des piliers fondamentaux de mon parcours académique.

*U*n merci tout particulier à ma mère qui m'a encouragé chaque jour à persévérer dans mes études. Grâce à son soutien indéfectible, j'ai réussi à terminer mon parcours académique.

*J*e n'oublie pas mon frère Fawzi, votre présence et votre encouragement ont été d'une importance capitale dans ma vie.

*J*e tiens également à remercier mon binôme, Boutheyne, pour leur collaboration sérieuse et efficace. Grâce à toi, nous avons surmonter les difficultés et accomplir ce travail avec succès.

*J*e souhaite également exprimer ma gratitude envers toute ma promo et mes amis.

*M*erci à tous pour votre soutien inconditionnel, vos encouragements et votre amour constants. Chacun d'entre vous a joué un rôle crucial dans mon parcours académique, et je suis reconnaissant pour chaque moment partagé et chaque obstacle surmonté ensemble.

*Abdel kader*

## RESUME

**L**a gestion du personnel navigant au sein d'une compagnie aérienne a un impact significatif sur sa rentabilité économique, en contribuant à la réduction des retards et à une meilleure utilisation des ressources humaines. Cette étude se concentre sur l'optimisation de l'appariement de l'équipage, visant à créer des séquences de vols pour les membres d'équipage, tout en minimisant les coûts en maximisant les périodes de service et en réduisant les périodes hors service. L'objectif est de garantir la couverture de l'ensemble du calendrier de vols tout en tenant compte des contraintes spécifiques du problème.

**Mots clés :** Optimisation, personnel navigant, appariement du personnel navigant .

## ABSTRACT

**T**he management of flight crew within an airline has a significant impact on its economic profitability by contributing to reducing delays and optimizing human resources. This study focuses on crew pairing optimization, aiming to create flight sequences for crew members while minimizing costs by maximizing duty periods and reducing rest periods. The objective is to ensure coverage of the entire flight schedule while considering the specific constraints of the problem.

**Keywords:** Optimization, flight crew, flight crew matching .

## ملخص

إدارة طاقم الطيران في شركة الطيران لها تأثير كبير على ربحيتها الاقتصادية، من خلال المساهمة في تقليل التأخيرات واستخدام أفضل للموارد البشرية. تركز هذه الدراسة على تحسين توافق الطاقم، بهدف إنشاء سلاسل رحلات لأفراد الطاقم، مع تقليل التكاليف من خلال زيادة فترات الخدمة وتقليل فترات الراحة. الهدف هو ضمان تغطية جدول الرحلات بالكامل مع مراعاة القيود الخاصة بالمشكلة .

**الكلمات المفتاحية:** التحسين، طاقم الطيران، مطابقة طاقم الطيران

## Table des matières

<b>RESUME.....</b>	<b>I</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>II</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Partie I : Généralités .....</b>	<b>3</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 La structure des coûts d'exploitation dans les compagnies aériennes .....</b>	<b>3</b>
I.1.2 les coûts d'exploitation direct .....	4
I.1.3 les coûts d'exploitation indirect .....	5
<b>Conclusion .....</b>	<b>7</b>
<b>Partie II : La Gestion du Personnel Navigant .....</b>	<b>-</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>9</b>
<b>I.1 Gestion des équipages .....</b>	<b>9</b>
I.1.1 Le personnel de bord .....	9
I.1.2 Personnel navigant commerciale .....	10
<b>I.2 Les séquences de vol et les missions d'un PNC .....</b>	<b>10</b>
<b>I.3 Membres d'équipage de conduite ou personnel navigant technique        Le</b>	
<b>personnel navigant technique est globalement constitué de .....</b>	<b>11</b>
I.3.1 Missions d'un PNT .....	12
I.3.2 Frais personnel navigant .....	12
I.3.3 Méthodes de gestion des PN .....	15
<b>Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre II :Approche proposé pour la résolution du probleme .....</b>	<b>17</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1 Présentation du problème .....</b>	<b>17</b>
<b>II.2 Construction des périodes de service .....</b>	<b>18</b>
II.2.1 L'affectation du personnel navigant technique aux périodes de service .....	18
<b>II.3 Les algorithmes de optimisations .....</b>	<b>19</b>
II.3.1 l'optimisation .....	19
II.3.2 Problème d'optimisation .....	19
II.3.3 Domaine d'application .....	20
II.3.4 Processus d'optimisation .....	20

II.3.5 Les étapes de modélisation du problème .....	21
<b>II.4 Parcours de graphes .....</b>	<b>22</b>
II.4.1 Différence entre parcours de profondeur et parcours de largeur .....	22
II.4.2 Arborescence couvrante associée à un parcours.....	23
<b>II.5 Parcours en largeur (Breadth First Search = BFS) .....</b>	<b>23</b>
II.5.1 Structures de données utilisées .....	23
II.5.2 Complexité .....	25
II.5.3 Applications du parcours en largeur .....	25
<b>II.6 Parcours en profondeur (Depth First Search = DFS) .....</b>	<b>26</b>
II.6.1 Structures de données utilisées .....	26
II.6.2 Complexité .....	27
II.6.3 Applications du parcours en profondeur .....	28
II.6.3.1 Recherche des composantes connexes .....	28
II.6.3.2 Recherche de circuits .....	29
II.6.3.3 Tri topologique des sommets d'un graphe orienté .....	29
II.6.3.4 Recherche des composantes fortement connexes d'un graphe orienté	30
II.6.3.5 Plus courts chemins .....	31
II.6.3.6 Algorithme de Dijkstra .....	32
II.6.3.7. Algorithme de Bellman-Ford.....	35
<b>Conclusion .....</b>	<b>38</b>
.....	40
<b>Chapitre III :Partie 1 :Approche proposé pour la résolution et Réalisation &amp; resultat..</b>	
<b>Introduction .....</b>	<b>39</b>
<b>III.1 Conformité Réglementaire et Sécurité dans l'Industrie Aérienne .....</b>	<b>39</b>
<b>III.2 Optimisation des Ressources Humaines dans l'Industrie Aéronautique .....</b>	<b>39</b>
<b>III.3 Problématique des Pairings et de la Planification des Équipages en Aéronautique</b>	
.....	40
III.3.1 Gestion des Équipages dans le Transport Aérien .....	40
<b>III.4 Modélisation du problème .....</b>	<b>41</b>
III.4.1 Définitions .....	41
III.4.1.1 Ensembles .....	41
III.4.1.2 Variables de décision .....	41

III.4.1.3 Données .....	41
III.4.1.4 Contraintes.....	41
III.4.2 les conditions variables .....	42
<b>Conclusion .....</b>	<b>44</b>
<b>Chapitre III: Partie 2 : Réalisation &amp; resultat .....</b>	<b>.....</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>44</b>
<b>III.1 Présentation de l'environnement utiliser .....</b>	<b>44</b>
<b>III.2 Langage de programmation .....</b>	<b>44</b>
<b>III.3 Présentation de l'application .....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>51</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>50</b>
<b>Définition .....</b>	<b>.....</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>51</b>

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AESA</b>	: l'Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
<b>AIMS</b>	: Aircraft Information and Management System
<b>JAN</b>	: Arrêt Nocturne
<b>CC</b>	: Chef de Cabine
<b>CCP</b>	: Chef de Cabine Principe
<b>CDB</b>	: Commandant De Bord
<b>DH</b>	: DeadHead
<b>CMS</b>	: Crew Management System
<b>EASA</b>	: Agence de l'union Européen de Sécurité de vol
<b>FIATA</b>	: Fédération International des Association des Transitaire
<b>IATA</b>	: L'Association du Transport Aérien International
<b>OACI</b>	: L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale
<b>OMN</b>	: Officier Mecanicien Naviguant
<b>OPL</b>	: Officier Pilote de Ligne ou Co pilote
<b>P</b>	: Poste
<b>PN</b>	: Personnel Naviguant
<b>PNC</b>	: Personnel Naviguant Commercial
<b>PNT</b>	: Personnel Naviguant Technique
<b>Ps</b>	: Période de Service
<b>Pv</b>	: Période de Vol
<b>Pvd</b>	: Période de vol avec DH
<b>Sv</b>	: Segment de Vol
<b>Ta</b>	: Temps d'arrêt
<b>Ta+1</b>	: Temps d'arrêt suivant
<b>Ta-1</b>	: Temp d arrêt précédent
<b>Tai</b>	: Insuffisance de Temps d'arrêt

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

Figure I. 1:Graphe du taux de croissance du trafic aérien mondial et part de marché (année 2014, unité %)	3
Figure I. 2:les coûts de carburant et d'exploitation directs a partir du coût d'exploitation total	5
Figure I. 3: les séquences de vol	11
No table of figures entries found.	

### CHAPITRE II

Figure II. 1: schéma de processus d'optimisation	20
Figure II. 2 :exemple graph orienté	31
Figure II. 3: illustration algorithme Djikstra	33
Figure II. 4: exemple algorithme Djikstra	34
Figure II. 5: illustration algorithme Bellman-Ford	36
Figure II. 6:Mode Raster. $\mathcal{L}$	39

### CHAPITRE III

Figure III. 1 : Interface des paramètres	45
Figure III. 2: shema de l'affichage finale	46
Figure III. 3 L'affichage de période de service 1	47
Figure III.4: L'affichage de période de service 2	47
Figure III. 5 : L'affichage de période de service 3	48
Figure III. 6 : L'affichage de période de service 4	48
Figure III. 7 : tableau d'affichage de résultat final	49
Figure III. 8: exemple d'affichage dans le CMD	50
Figure III. 9: base de données importer	50

## LISTE DES TABLES

### CHAPITRE I

---

Table I. 1 : taux croissance du transport aérien mondial.....	3
Table I. 2: Structure des couts des compagnies aériennes.....	4
Table I. 3 : Taux croissance du transport aérien mondial.....	6

## INTRODUCTION GENERALE

Le moyen de transport le plus récent est le transport aérien, parmi les autres modes de déplacement. C'est un moyen qui a connu de grands progrès et qui a rapidement évolué. L'aviation commerciale est apparue, les bateaux à vapeur et les chemins de fer furent rapidement délaissés entre les deux guerres. L'aviation civile s'est développée aux États-Unis avant de conquérir le reste du globe, atteignant une dimension mondiale.

Sous l'influence des changements économiques, les relations de travail ont été modifiées. Ainsi, l'introduction de la concurrence a conduit les compagnies à redéfinir les conditions de travail tout en modulant les rémunérations. De plus, portés par un syndicalisme fort et une tradition bien établie de conflits, les rapports collectifs dans le transport aérien ont évolué vers davantage de négociation. Les compagnies aériennes et leurs navigants s'adaptent à ces changements.

La gestion du personnel navigant (commercial PNC ou technique PNT) dans une compagnie aérienne représente un enjeu économique très important : la qualité des programmes de vols de chaque PN influe sur la rentabilité de l'activité de la compagnie. Plus le nombre d'heures supplémentaires est élevé, plus le coût total du PN est important. La construction des programmes de vols du personnel navigant est un problème rencontré par toutes les compagnies aériennes qui, pour réaliser leurs vols, doivent déterminer quels personnels navigants affecter à chacun des vols programmés. De par sa taille, le problème d'affectation est rendu difficile par les diverses contraintes réglementaires et sociales relatives, d'une part à l'enchaînement des vols (durée maximale de vol, durée maximale de service, durée maximale de vol de nuit, durée minimale de repos pré-courrier ou post-courrier...) et, d'autre part à l'affectation du PN (qualifications exigées, ancienneté, composition de l'équipage...).

Ce type de problème est généralement décomposé en deux sous-problèmes formulés et résolus de façon indépendante :

- Construire une liste de séquences de vols appelées périodes de service, couvrant l'ensemble des vols de la période de planification considérée.

- Attribution nominative des personnels requis à ces périodes de service construites en (a), en tenant compte, là aussi, de diverses contraintes telles que les qualifications du personnel, la composition de l'équipage, les congés, les périodes de formation, etc. Cela garantit que chacun des vols donnés est couvert par le personnel adéquat.

Affecter du personnel technique et commercial à chacun des vols d'une compagnie aérienne demande beaucoup de travail en raison de la saisonnalité des horaires de vols et de la présence de nombreux vols supplémentaires. Il n'existe pas de solution stable ou cyclique. Par conséquent, les membres d'équipage sont affectés à chaque vol individuellement, tous les jours de l'année. En échange de leur disponibilité, un programme mensuel distinct est publié vers le 28 de chaque mois pour le mois suivant.

Ces plannings intègrent les règles légales, les pré-travaux et les souhaits, et ils couvrent évidemment toutes les tâches correspondant au plan de vol.

Dans notre thèse, l'objectif principal était de réduire les coûts et les frais de personnel navigant pour maximiser les redevances de la compagnie aérienne. À l'aide de l'ordinateur, nous avons optimisé les emplois du temps du personnel navigant commercial et technique en développant une application basée sur un algorithme d'optimisation qui génère des plannings optimisés, contribuant ainsi à une meilleure gestion des ressources et des coûts pour la compagnie aérienne.

On a proposé trois chapitres pour la résolution de notre problématique

Le premier chapitre définit l'origine du problème de la gestion des personnels navigant

Et le processus d'injection des personnels navigant.

Le deuxième chapitre donne un résumé général des méthodes d'optimisation pour résoudre ce type de problème.

Le troisième chapitre présente la réalisation de notre application et le résultat obtenus.

---

# **Chapitre I : Généralités et la Gestion du Personnel Navigant**

---

**Introduction :**

Le trafic aérien mondial ne cesse de croître : il est passé de quelques millions de passagers en 1950 à 3,3 milliards en 2014, la barre du milliard de passagers ayant été franchie en 1987. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) estime que le nombre de passagers aériens atteindra les 6 milliards d'ici 2030.

L'activité aérienne mondiale, double, pratiquement chaque 15 ans, certes cette croissance a été plus accentuée au début du développement de l'industrie aéronautique, le taux de croissance de 1971 à 1985 le confirme selon le tableau I.1, toutefois, cette croissance n'est pas uniforme au niveau des différentes régions du monde.[5]

Table I. 1: taux croissance du transport aérien mondial.

Année	1971- 1985	1986 - 2000	2001- 2014
Taux croissance	135	99	101

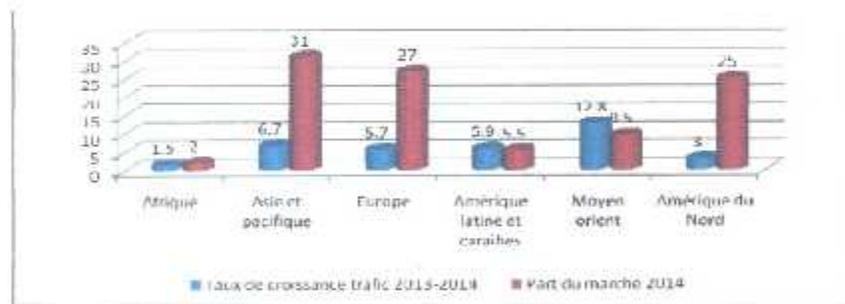


Figure I. 1:Graphe du taux de croissance du trafic aérien mondial et part de marché (année 2014, unité %)

**I.1 La structure des coûts d'exploitation dans les compagnies aériennes :**

L'optimisation des opérations aériennes nécessite plus que la simple maximisation du service. Vous devez tenir compte non seulement des ventes, mais également des coûts, et trouver un compromis qui vous rapportera le plus de bénéfices (bénéfice net, soit revenus moins dépenses). Par conséquent, la structure des coûts doit également être analysée. Les opérations aériennes sont généralement très complexes. On distingue cependant deux catégories de coûts de fonctionnement : les coûts directs d'exploitation et les coûts d'exploitation indirects.

Les coûts des actifs d'une compagnie aérienne sont essentiellement fixes.

### 1.1.2 les coûts d'exploitation direct :

Les coûts d'exploitation directs sont divisés en deux catégories :

Coûts directs associés aux vols :

- Carburant et lubrifiants.
- Salaires des pilotes et personnels techniques.
- Frais d'aéroport.
- Frais de contrôle aérien.
- Primes d'assurance.
- Frais de maintenance.
- Frais d'amortissement liés aux équipements de vol.
- Location d'avions et de leurs accessoires.

Ces différents coûts représentent environ la moitié des coûts totaux de fonctionnement (voir Tableau 1.2). La part relative de chacun de ces éléments dépendra du type d'équipement et du moteur utilisé. Les équipements techniques plus récents sont généralement plus économes en carburant.

Table 1. 2: Structure des coûts des compagnies aériennes

Coûts directs d'exploitation		
1-coûts directs de vols	PNT	7.1%
	Carburant, lubrifiants	12.1%
	Charges d'atterrissage et Redevances de route	8.8%
2-Maintenance		10.4%

3-Dépréciation, assurance		13.2%
Total (%)		51.6%
Coûts indirects d'exploitation		
1-stationnement et service au sol		11.7%
2-services offerts aux passagers		13.9%
3-frais commerciaux et de réservation		16.6%
4-Frais généraux et administratifs		6.1%
Total(%)		48.4%
TOTAL GENERAL		100%

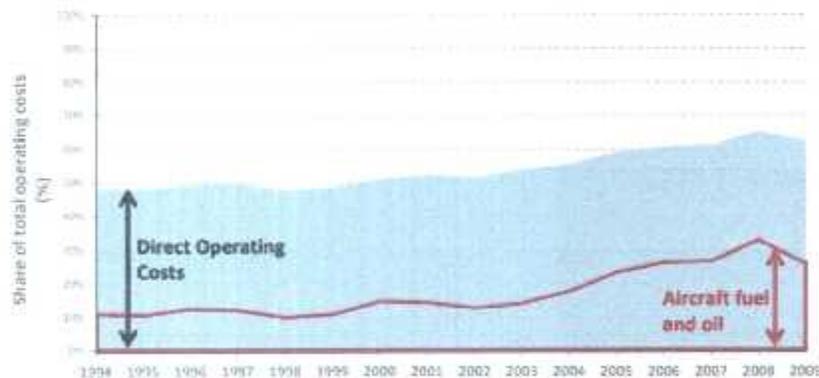


Figure I. 2: les coûts de carburant et d'exploitation directs apartir du coût d'exploitation total

### I.1.3 les coûts d'exploitation indirect :

Ces coûts indirects sont principalement composés des coûts administratifs et commerciaux.

L'ensemble des coûts indirects peut représenter une part importante des coûts d'exploitation, notamment pour les grandes compagnies aériennes qui peuvent engager des dépenses annexes,

notamment dans le domaine de la commercialisation (points de vente dans les principales artères commerciales des grandes capitales, campagnes de promotion et de publicité grand public, utilisation de zones spéciales dans les aéroports).

Les coûts indirects de fonctionnement comprennent quatre grandes catégories de coûts :

- Les coûts d'étapes correspondant aux dépenses d'assistance au sol des avions et des passagers.
- Les coûts associés au service de bord (commissariat, personnel navigant commercial).
- Les frais commerciaux et de réservation.
- Les frais généraux administratifs.

Les compagnies aériennes s'efforcent de fournir des services attractifs aux passagers afin que Conservez-les et remplissez les surfaces planes ; tout en faisant un compromis entre la qualité du produit et le coût. Cependant, ces coûts continuent d'augmenter. Certaines de ces sociétés ont Des efforts importants ont été déployés pour réduire les frais généraux et administratifs (Voir tableau 1.3) :

Table I. 3 : Taux croissance du transport aérien mondial

		1980	1990	2000
Coûts directs d'exploitation		8%	7%	8%
1-coûts directs de vols	PNT	28%	15%	11%
	Carburant, lubrifiants	5%	4%	7%
	Charges d'atterrissage et Redevances de route	11%	11%	11%
2-Maintenance		11%	11%	11%
3-Dépréciation, assurance		6%	7%	7%
Total (%)		60	50	53
Coûts indirects d'exploitation				

1-stationnement et service au sol		11%	12%	11%
2-services offerts aux passagers		9%	10%	11%
3-frais commerciaux et de réservation		14%	16%	14%
4-Frais généraux et administratifs		6%	11%	12%
Total (%)		40	50	47
TOTAL GENERAL		100%		

Quant aux coûts de commercialisation, ils ont tendance à s'additionner.

Une grande attention est accordée à l'environnement concurrentiel de cette activité. Mais avec l'explosion du nombre d'entreprises low-cost (low-cost), certains opérateurs (même les entreprises traditionnelles) réduisent ces dépenses en utilisant de nouveaux moyens de communication, comme Internet, pour faciliter ou les billets sont vendus via leur site Internet.

En résumé, pour un service de liaison donné, les coûts des opérations peuvent être regroupés en trois catégories distinctes. Tout d'abord, certains coûts sont liés à la fréquence des vols, englobant le carburant requis, les salaires des personnels navigants (PN), et peuvent être consolidés dans le coût unitaire relatif à cette fréquence. Le coût d'exploitation est calculé en évaluant les dépenses associées à divers éléments tels que le personnel navigant, le carburant, les taxes d'atterrissage, les frais d'assistance, l'entretien et les taxes de survol. Ces dépenses varient en fonction du volume horaire de production de la flotte, à l'exception des taxes d'atterrissage et des frais d'assistance, qui peuvent être évalués différemment.

### **Conclusion :**

Pour conclure, Ce chapitre constitue une étape importante pour comprendre l'origine de notre problématique et les raisons derrière les recherches pour optimiser la gestion du personnel navigant.

### **Introduction :**

L'optimisation de la gestion des personnels navigants est cruciale pour faire face à la pénurie de main-d'œuvre qualifiée. Avec la croissance continue du trafic aérien et le vieillissement de la main-d'œuvre actuelle, il est impératif de développer des stratégies efficaces de recrutement et de formation afin d'attirer de nouveaux talents et de garantir un approvisionnement adéquat en pilotes, copilotes et personnel de cabine. Cela peut nécessiter une collaboration avec des écoles de pilotage, la création de programmes de mentorat, l'offre d'incitations attractives et l'implémentation de processus de sélection rigoureux pour garantir la qualité et la compétence des personnels navigants. De plus, cela permettra de répondre aux exigences réglementaires strictes de l'aviation civile, car les compagnies aériennes doivent se conformer à des réglementations complexes en matière de qualifications, de temps de vol, de repos obligatoire et de limites de fatigue.

Une gestion inefficace peut entraîner des dépassements des limites réglementaires, compromettant ainsi la sécurité des vols. En mettant en place des systèmes de suivi précis, des outils de planification avancés et des processus de contrôle rigoureux, il est possible d'assurer la conformité aux réglementations et de garantir des opérations aériennes sûres et fiables.

### **I.1 Gestion des équipages :**

#### **I.1.1 Le personnel de bord :**

Il est constitué de deux types d'équipages : le Personnel Navigant Technique (PNT) et le Personnel Navigant Commercial (PNC). Le coût lié à l'exploitation de l'équipage est relativement important (en général plus de 10% des coûts d'opération).

L'objectif des compagnies à ce propos est de minimiser le coût de mise à disposition de l'équipage tout en respectant les contraintes réglementaires (sécurité, syndicats des pilotes). Il s'agit d'affecter les équipages adéquats en tenant compte notamment de leurs qualifications, de leur localisation (disponibilité locale ou réacheminement) et de leur disponibilité de travail (niveau de leur charge de travail).

### **I.1.2 Personnel navigant commerciale :**

L'équipage de cabine est composé de :

- Un Chef de Cabine Principal, (on le trouve sur les avions long-courrier).
- Un Chef de Cabine, (on le trouve sur moyen-courrier et sur le long-courrier sous la responsabilité d'un CCP).
- Des Hôtesse et Stewards.

L'ensemble de l'équipage est placé sous les ordres du commandant de bord. L'exploitant s'assure que tous les membres d'équipage de cabine portent l'uniforme d'équipage de cabine de l'exploitant et sont clairement reconnaissables en tant que tels par les passagers.

### **I.2 Les séquences de vol et les missions d'un PNC :**

La mission du personnel navigant de cabine s'inscrit dans un cadre réglementaire et fonctionnel très précis, visant principalement à assurer la sécurité du transport aérien. Ce cadre fonctionnel spécifie en détail les missions du personnel navigant de cabine (PNC), qui se répartissent en trois tâches principales :

1- Tâche de sûreté :

- Protéger le système avion-passager.
- Effectuer des vérifications pour fiabiliser la cabine, telles que les inspections et la surveillance des passagers.

2- Tâche de sécurité :

- Vérifier l'état, la présence, l'arrimage, le nombre et le fonctionnement du matériel et des équipements à bord.
- Appliquer et démontrer les consignes de sécurité en coopération avec le personnel technique.
- Intervenir en tant que secouriste en cas d'incident.

3- Tâche de service commercial :

- Accueillir et installer les passagers.
- Préparer et distribuer les prestations.
- Fournir une assistance.
- Gérer les émotions des passagers pendant le service.

### Aspect de travail non intégré a la définition du poste

Ces tâches sont réparties entre les membres de l'équipage de cabine et sont réalisées sous la responsabilité d'un chef de cabine (CC) en fonction de leur qualification. Selon le type de vol (national ou international), sa durée, le moment de départ du vol et les événements survenus, des spécialités sont prévues dans les procédures.

Par exemple, le PNC P1 est chargé de la sécurité et du service commercial des passagers à l'avant de la cabine, tandis que le PNC P2 accueille les passagers à l'arrière, effectue des annonces en cours de vol et rappelle les consignes de sécurité. Le PNC P3 installe des rideaux mobiles en cabine, accueille les passagers, compte leur nombre et effectue les démonstrations de sécurité. Compte tenu des possibilités d'observation dans les cabines, seule l'activité des P2 et P3 a été analysée.

Le déroulement de ces tâches est synchronisé sur la succession des séquences de vol : préparation du vol avec les PNT, montée a bord, vérification de la cabine, embarquement des passagers. Mais l'analyse du personnel de cabine montre qu'il est amené débiter le service de repas ou de collation aux passagers au cours de la phase d'envol et à le terminer pendant la phase d'arrivée ou descente de l'avion (comme indique la figure schéma des séquence de vol )

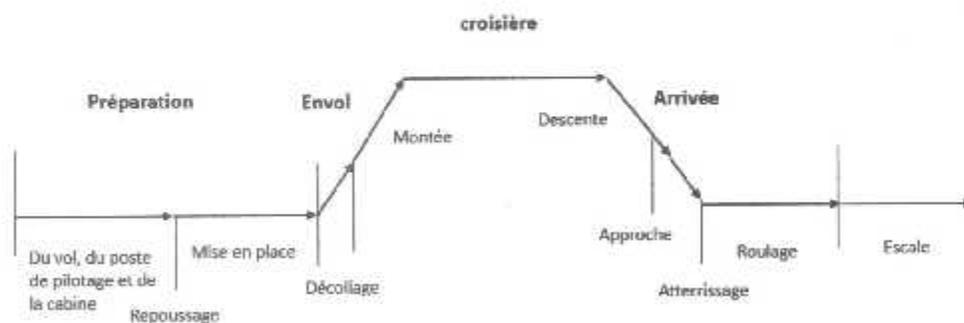


Figure I.3: les séquences de vol

### I.3 Membres d'équipage de conduite ou personnel navigant technique :

**Le personnel navigant technique est globalement constitué de :**

- Un Commandant de Bord.
- Un Officier Pilote de Ligne ou Copilote.
- Un Officier Mécanicien Navigant.

La présence de l'Officier Mécanicien Navigant se fait de plus en plus rare, car dans les aéronefs de nouvelle génération, le pilotage est assisté par des ordinateurs. En effet, les progrès de l'aéronautique ont permis de réduire le nombre de membres du PNT à trois puis deux personnes. Auparavant, ceux-ci ont longtemps été au nombre de 5 : le pilote, le copilote, le mécanicien navigant, le navigateur, le radio.

### I.3.1 Missions d'un PNT :

- **CDB** : Le Commandant de Bord est responsable du voyage (il définit les paramètres du vol et choisit la route) ; il est garant de la sécurité de tous les membres d'équipage, des passagers et du fret qui se trouvent à bord ; il s'assure l'application des règlements, et le respect de toutes les procédures opérationnelles et des listes de vérification conformément au manuel d'exploitation.
- **OPL** : l'Officier Pilote de Ligne ou Copilote est le second du CDB. Lorsque ce dernier est dans l'incapacité d'assurer ses fonctions, il assume le commandement et la responsabilité de l'avion, de l'équipage, des passagers et du chargement.
- **OMN** : l'Officier Mécanicien Navigant a une fonction de mécanicien à bord. Il assiste le CDB et l'OPL lors de leurs missions au cours de la préparation du vol et pendant le vol.

### II.3.2 Frais personnel navigant :

La répartition des coûts d'exploitation par réseau et par type d'appareil élaborée par la compagnie aérienne, donne les salaires du personnel navigant (technique et commercial) ainsi que les dépenses de vols.

Les coûts du PN sont exprimés en heures de vol, en incluant une partie fixe par cycle (Un mois). Pour ces calculs, il s'agit de prendre en compte les aspects suivants :

- 1- Les différences de rémunération qui existent entre les heures de travail de jour et les heures de travail de nuit.
- 2- Les différences de rémunération existante entre les heures de travail en vol et les heures de travail au sol.
- 3- Les différences dans le niveau de salaire du PN selon le type d'appareil et de son ancienneté dans l'entreprise. Le calcul des frais PN fait intervenir trois variables à savoir la rémunération PN.
- 4- Les heures de vols et les caractéristiques avions.

Problèmes couramment associés à la question des personnels navigants en aéronautique :

- Pénurie de main-d'œuvre : L'industrie aéronautique fait face à une pénurie de pilotes et de personnel navigant qualifié, ce qui entraîne des difficultés de recrutement et de rétention.
- Réglementation et conformité : Les personnels navigants doivent se conformer à de nombreuses réglementations, normes de sécurité et exigences de formation. La complexité de ces réglementations peut poser des défis en termes de mise en œuvre et de suivi.
- Fatigue et stress : Les personnels navigants sont soumis à des horaires de travail irréguliers, des décalages horaires, des conditions de travail stressantes et la pression de prendre des décisions rapides en situation d'urgence. Cela peut entraîner une fatigue accrue et des problèmes de santé mentale.
- Formation continue et mise à jour des compétences : Les personnels navigants doivent suivre une formation continue pour maintenir leurs compétences et se familiariser avec les nouvelles technologies et procédures. Cela peut être coûteux et chronophage.
- Équilibre entre vie professionnelle et vie personnelle : Les personnels navigants sont souvent confrontés à des défis pour concilier leur carrière exigeante avec une vie personnelle équilibrée en raison des déplacements fréquents et des horaires de travail imprévisibles.
- Évolution de la technologie : L'évolution rapide de la technologie dans le domaine de l'aéronautique nécessite une adaptation constante des personnels navigants. Cela

peut nécessiter une formation supplémentaire et une mise à jour régulière des compétences.

Les logiciels de gestion des personnels navigants en aéronautique, tels que AIMS ont identifié plusieurs solutions pour traiter les problèmes liés à l'établissement des jumelages dans une compagnie aérienne. Voici quelques-unes de ces solutions :

- **Optimisation des compétences** : Les logiciels de gestion des personnels navigants utilisent des algorithmes avancés pour analyser les compétences et les qualifications de chaque membre de l'équipage. Cela permet de créer des jumelages efficaces en tenant compte des exigences spécifiques de chaque vol, telles que les certifications requises et les limitations réglementaires.
- **Gestion des horaires** : Ces logiciels permettent de gérer les horaires des personnels navigants de manière équitable en évitant les affectations excessivement lourdes ou les périodes de repos inadéquates. Ils prennent également en compte les préférences individuelles des membres de l'équipage, comme les préférences de vol de nuit ou de jours de congé spécifiques.
- **Prise en compte des réglementations** : Les logiciels de gestion des personnels navigants intègrent les réglementations et les restrictions opérationnelles spécifiques à chaque compagnie aérienne et à chaque pays. Cela garantit que les jumelages respectent les exigences légales en matière de temps de vol maximum, de périodes de repos obligatoires, etc.
- **Communication et transparence** : Ces logiciels facilitent la communication entre les membres de l'équipage et les planificateurs. Ils permettent aux personnels navigants de consulter et de modifier leurs horaires, de signaler des conflits potentiels ou de demander des ajustements. Cela favorise la transparence et l'implication des membres de l'équipage dans le processus de planification.
- **Analyse des données et amélioration continue** : Les logiciels de gestion des personnels navigants collectent des données sur les jumelages passés, les préférences des membres de l'équipage, les retours d'expérience, etc. Ces données sont ensuite utilisées pour améliorer les méthodes de planification, identifier les problèmes récurrents et optimiser les processus de jumelage à l'avenir.

En utilisant ces solutions, les logiciels de gestion des personnels navigants contribuent à améliorer l'efficacité et la satisfaction des membres de l'équipage, tout en respectant les contraintes opérationnelles et réglementaires.

### I.3.3 Méthodes de gestion des PN :

- **Méthodes anciennes :**

1. Système manuel de gestion des plannings : Les compagnies aériennes utilisaient autrefois des tableaux physiques pour planifier les horaires des équipages navigants. Cela nécessitait une coordination manuelle des disponibilités et des compétences des membres d'équipage.

2. Communication par téléphone ou fax : Avant les avancées technologiques, les informations relatives aux horaires, aux changements de vol ou aux affectations étaient souvent communiquées par téléphone ou par fax aux membres d'équipage, ce qui pouvait entraîner des retards et des erreurs de communication.

- **Méthodes récentes :**

**1- Systèmes de gestion des équipages informatisés (CMS) :**

Les compagnies aériennes utilisent maintenant des CMS pour automatiser la planification et la gestion des personnels navigants. Ces systèmes intègrent les plannings, les disponibilités, les compétences et les réglementations en vigueur pour attribuer efficacement les missions aux membres d'équipage.

**2- Applications mobiles dédiées :**

Les compagnies aériennes ont développé des applications mobiles pour permettre aux membres d'équipage de consulter leurs horaires, de recevoir des notifications de modifications de vol et de communiquer avec leur équipe. Cela facilite la gestion en temps réel des équipages et améliore la communication.

**3- Intégration des données de vol en temps réel :**

Les systèmes modernes intègrent les données de vol en temps réel, ce qui permet de prendre en compte les changements de vol, les retards ou les annulations dans la planification des équipages. Cela réduit les erreurs et améliore l'efficacité opérationnelle.

**4- Utilisation des algorithmes d'optimisation :**

Certains systèmes de gestion des équipages utilisent pour analyser les données historiques, les préférences des membres d'équipage et les facteurs externes afin d'optimiser la planification et d'anticiper les besoins futurs en personnel navigant. Ces méthodes récentes ont permis d'améliorer l'efficacité, la précision et la communication dans la gestion des personnels navigants en aéronautique.[2]

### **Conclusion :**

En conclusion, la gestion des personnels navigateurs en aéronautique est une problématique complexe qui nécessite une attention particulière de la part de l'industrie. Les enjeux liés à la pénurie de main-d'œuvre qualifiée, à la gestion des compétences, aux conditions de travail, à la réglementation et aux aspects économiques sont autant de défis à relever. Cependant, en adoptant une approche proactive, en mettant en place des mesures adaptées et en favorisant l'innovation, il est possible d'améliorer la gestion des personnels navigateurs et de garantir la sécurité, l'efficacité et la durabilité de l'industrie aéronautique.

---

## **Chapitre II : Méthodes d'optimisation**

---

### **Introduction :**

La gestion du personnel navigant (commercial ou technique) dans une compagnie aérienne représente un enjeu économique très important : la qualité des programmes de vols de chaque PN influe sur la rentabilité de l'activité de la compagnie. Plus le nombre d'heures supplémentaires est élevé, plus le coût total du PN est important. La construction des programmes de vols du personnel navigant est un problème rencontré par toutes les compagnies aériennes qui, pour réaliser leurs vols, doivent déterminer quels personnels navigants affecter à chacun des vols programmés. De par sa taille, le problème d'affectation est rendu difficile par les diverses contraintes réglementaires et sociales relatives, d'une part à l'enchaînement des vols (durée maximale de vol, durée maximale de service, durée maximale de vol de nuit, durée minimale de repos pré-courrier et/ou post-courrier...) et, d'autre part à l'affectation du PN (qualifications exigées, ancienneté, composition de l'équipage...).

Ce type de problème est généralement décomposé en deux sous-problèmes formulés et résolus de façon indépendante :

- Construire une liste de séquences de vols appelées période de service, couvrant l'ensemble des vols de la période de planification considérée.
- Attribuer nominativement les personnels requis à des périodes de service construites en (a) en tenant compte, là aussi, de diverses contraintes (qualifications du personnel, composition de l'équipage, congés, périodes de formation, ...), et ce, de façon à ce que chacun des vols donnés soit couvert.[7]

*NOTE :* Dans la première partie, par présenter la problématique générale de l'affectation de personnels Navigants.

### **II.1 Présentation du problème :**

Le problème d'affectation d'équipages peut être défini comme suit :

Sur une période donnée (une semaine, un mois...) une compagnie aérienne doit assurer un certain nombre de vols, et ce en affectant le personnel approprié (en nombre, et en

qualification) à des périodes de service tout en respectant une série de contraintes. Une première étape consiste donc à construire les différentes périodes de service auxquelles les personnels navigants techniques pourront être affectés. La seconde étape est celle de la recherche d'une affectation des personnels aux périodes de service.

### **II.2 Construction des périodes de service :**

Compte tenu des diverses contraintes réglementaires (durée maximale de vol, durée maximale de service, durée maximale de vol de nuit, durée minimale de repos pré-courrier et/ou post-courrier...) et sociales (départ à une heure tardive pour des destinations éloignés...) relatives à la construction des périodes de service à partir d'un ensemble de vols sur une période donnée, ce problème se trouve fortement contraint. De plus, le nombre de vols par période de service dépasse rarement les 3 ou 4 vols. Par conséquent, même pour les problèmes réels de grande taille, on a généralement recours à l'énumération exhaustive de toutes les périodes de service couvrant tous les vols programmés et satisfaisant l'ensemble des contraintes. Ainsi, les périodes de service construites se composent d'au plus 4 vols consécutifs séparés par des temps d'escale. La ville d'arrivée de chaque vol doit être la ville de départ du vol suivant et ainsi de suite. Cependant, il n'y aucune contrainte sur les villes de départ et d'arrivée des périodes de service. Pour éviter les périodes de service qui partent d'une ville à l'étranger et/ou qui reviennent à une ville à l'étranger, des coûts de mise en place sont attribués à ces périodes de service, traduisant le coût supplémentaire de transfert du personnel navigant technique de sa base d'affectation vers la ville de départ ou de la ville d'arrivée vers sa base d'affectation.

#### **II.2.1 L'affectation du personnel navigant technique aux périodes de service :**

A ce stade, le problème consiste à affecter nominativement le personnel navigant technique à des périodes de service de façon à réaliser le programme de vols avec un coût minimal, tout en respectant les diverses contraintes (qualifications du personnel, composition de l'équipage, congés, périodes de formation, ...).

*NOTE :* Le personnel navigant technique est scindé en trois collèges : Pilote (ou Commandant de Bord), Copilote et Instructeur. Un instructeur peut être défini comme un

Pilote pouvant, en cas de besoin, remplacer un Copilote. Un équipage se compose d'un Pilote (ou d'un Instructeur) et d'un Copilote (ou d'un Instructeur).

D'autre part, chaque personnel navigant technique est caractérisé par ses qualifications avion. En effet, la flotte est à son tour composée de différents vecteurs d'avion nécessitant les mêmes qualifications avion et au sein desquels le personnel navigant technique du même collège est complètement polyvalent. Un PNT qualifié pour opérer sur un appareil d'un secteur donné, est qualifié pour opérer sur tous les autres appareils de ce secteur. En outre, par mesure de sécurité, chaque personnel navigant technique n'a le droit d'opérer que sur un seul secteur d'avion. Par conséquent, le problème d'affectation d'équipage peut être traité séparément pour chaque secteur d'avion, sans pour autant altérer la qualité de la solution attendue.

### II.3 Les algorithmes de optimisations :

#### II.3.1 l'optimisation :

Euler dit " il n'y a rien au monde qui ne se réalise sans la volonté de minimiser ou maximiser quelque chose "

L'optimisation est une branche des mathématiques et de l'informatique en tant que disciplines, cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes réels : qui consistent à déterminer quelles sont là où les solution(s) (Inconnues) satisfaisant un objectif quantitatif tout en respectant d'éventuelles contraintes.

Donc cela revient à Résoudre un problème d'optimisation.

#### II.3.2 Problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation est un modèle mathématique (formel) d'un problème réel. On cherche à minimiser (ou maximiser) une fonction objective sous des contraintes :

$x \in \mathbb{R}^n$  : Ensemble des variables

$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  : fonction coût (objectif)

$D \subset \mathbb{R}^n$  : Ensemble des contraintes  $g(x)$

$PO = \{ (\min (\text{ou max}) f(x) \quad g(x) \leq 0 \quad x \in \mathbb{R}^n ) \}$

On cherche à minimiser (ou maximiser)  $f$  sur  $D$ , c.à.d. on cherche  $x^* \in D$  tel que :

$$f(x^*) = \min (\max) f(x)$$

$$\text{Avec } f(x) \leq f(x^*), \forall x \in D$$

### II.3.3 Domaine d'application :

Entre Autres, on cite encore beaucoup d'autres domaines d'application :

- Economie/Finances
- Biologie
- Transport
- Organisation/Logistique
- Robotique/Intelligence
- Artificielle Ingénierie ....

### II.3.4 Processus d'optimisation :

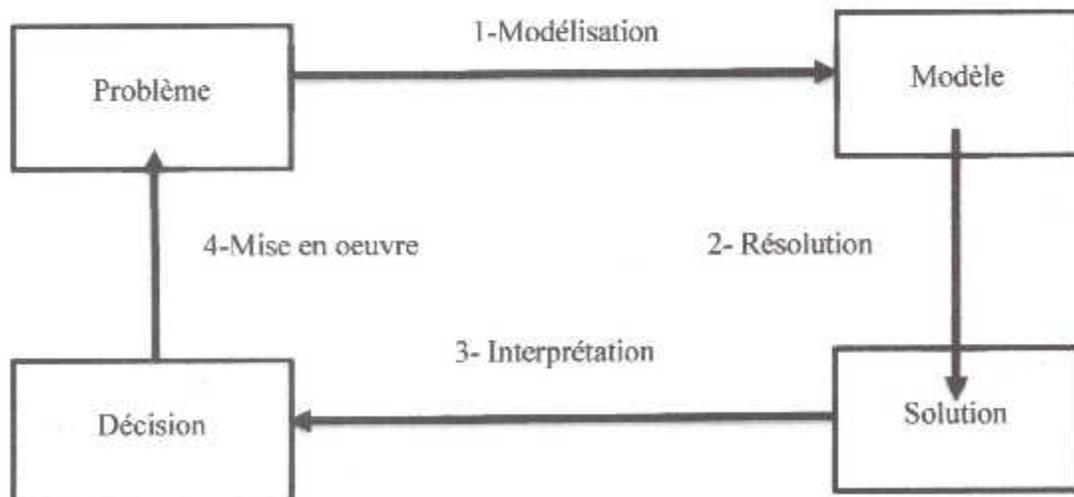


Figure II. 1: schéma de processus d'optimisation

Pour atteindre l'optimisation d'un problème il faut passer par le processus indiquer dans la figure III .1 englober dans les points suivants :

- Analyse du problème.
- Modélisation et choix de méthode.
- Résolution.
- Interprétation des résultats.

### II.3.5 Les étapes de modélisation du problème :

Les étapes suivantes permettent de modéliser notre problème par un problème d'optimisation :

- Identifier les variables et leurs domaines de définitions.
- Traduire les contraintes de la situation par un système d'inéquations.
- Établir la règle de la fonction à optimiser.
- Tracer le graphe représentant les différentes contraintes.
- Déterminer les coordonnées des sommets du polygone de contraintes.
- Évaluer la fonction à optimiser en chaque sommet du polygone de contraintes.
- Dédire le ou les sommets dont les coordonnées maximisent (ou minimisent) la fonction à optimiser et trouver géométriquement la ou les solutions.

Et il y'a aussi la résolution algorithmique par une méthode d'optimisation.

Une méthode d'optimisation est une technique de résolution d'un problème d'optimisation mathématique désignant :

- La transformation du problème d'origine en un problème équivalent (modèle),
- Une méthode théorique dont la description permet l'élaboration d'un algorithme numériquement applicable.
- Des outils d'implémentation.
- Le choix d'une technique appropriée dépend de :
- La nature de la fonction objectif  $f$ , de sa régularité (continuité, dérivabilité), de propriétés spécifiques (parité, convexité), de la connaissance de voisinages de ses extrema,
- Des contraintes caractérisant l'ensemble  $D$  des points admissibles (réalisables).[6]

### II.4 Parcours de graphes :

Beaucoup de problèmes sur les graphes nécessitent que l'on parcoure l'ensemble des sommets et des arcs/arêtes du graphe. On étudie dans la suite les deux principales stratégies d'exploration :

- Le parcours en largeur consiste à explorer les sommets du graphe niveau par niveau, à partir d'un sommet donné.
- Le parcours en profondeur consiste, à partir d'un sommet donné, à suivre un chemin le plus loin possible (jusqu'à un cul-de-sac ou un cycle), puis à faire des retours en arrière pour reprendre tous les chemins ignorés précédemment.

Dans les deux cas, l'algorithme procède par coloriage des sommets :

- Initialement, tous les sommets sont blancs. On dira qu'un sommet blanc n'a pas encore été découvert.
- Lorsqu'un sommet est "découvert" (autrement dit, quand on arrive pour la première fois sur ce sommet), il est colorié en gris. Le sommet reste gris tant qu'il reste des successeurs de ce sommet qui sont blancs (autrement dit, qui n'ont pas encore été découverts).
- Un sommet est colorié en noir lorsque tous ses successeurs sont gris ou noirs (autrement dit, lorsqu'ils ont tous été découverts).

De façon pratique, on va utiliser une liste "d'attente au coloriage en noir" dans laquelle on va stocker tous les sommets gris :

- Un sommet est mis dans la liste d'attente dès qu'il est colorié en gris.
- Un sommet gris dans la liste d'attente peut faire rentrer dans la liste ses successeurs qui sont encore blancs (en les coloriant en gris).

Quand tous les successeurs d'un sommet gris de la liste d'attente sont soit gris soit noirs, il est colorié en noir et il sort de la liste d'attente.

#### II.4.1 Différence entre parcours de profondeur et parcours de largeur :

La différence fondamentale entre le parcours en largeur et le parcours en profondeur provient de la façon de gérer cette liste d'attente au coloriage en noir : le parcours en largeur

utilise une file d'attente, où le premier sommet arrivé dans la file est aussi le premier à en sortir, tandis que le parcours en profondeur utilise une pile, où le dernier sommet arrivé dans la pile est le premier à en sortir.

### II.4.2 Arborecence couvrante associée à un parcours

On parcourt un graphe à partir d'un sommet donné  $S_0$ . Ce parcours va permettre de découvrir les sommets accessibles depuis  $S_0$ , c'est à dire tous les sommets pour lesquels il existe un chemin depuis  $S_0$ . En même temps que l'on effectue ce parcours, on construit l'arborecence de découverte des sommets accessibles depuis  $S_0$ , appelée arborecence couvrante de  $S_0$ . Cette arborecence contient un arc  $(S_i, S_j)$  si et seulement si le sommet  $S_j$  a été découvert à partir du sommet  $S_i$  (autrement dit, si c'est le sommet  $S_i$  qui a fait entrer  $S_j$  dans la file d'attente).

Ce graphe est effectivement une arborecence, dans la mesure où chaque sommet a au plus un prédécesseur, à partir duquel il a été découvert. La racine de cette arborecence est  $S_0$ , le sommet à partir duquel on a commencé le parcours.

L'arborecence associée à un parcours de graphe sera mémorisée dans un tableau  $\pi$  tel que  $\pi[S_j] = S_i$  si  $S_j$  a été découvert à partir de  $S_i$ , et  $\pi[S_k] = nil$  si  $S_k$  est la racine, ou s'il n'existe pas de chemin de la racine vers  $S_k$ .

### II.5 Parcours en largeur (Breadth First Search = BFS):

Le parcours en largeur est obtenu en gérant la liste d'attente au coloriage comme une file d'attente FIFO. Autrement dit, on enlève à chaque fois le plus vieux sommet gris dans la file d'attente, et on introduit tous les successeurs blancs de ce sommet dans la file d'attente, en les coloriant en gris.

#### II.5.1 Structures de données utilisées :

On utilise une file  $F$ , pour laquelle on suppose définies les opérations  $init\_file(F)$  qui initialise la file  $F$  à vide,  $ajoute\_fin\_file(F,s)$  qui ajoute le sommet  $s$  à la fin de la file  $F$ ,  $est\_vide(F)$  qui retourne vrai si la file  $F$  est vide et faux sinon, et  $enleve\_debut\_file(F,s)$  qui enlève le sommet  $s$  au début de la file  $F$ .

- On utilise un tableau  $\pi$  qui associe à chaque sommet le sommet qui l'a fait entrer dans la file, et un tableau couleur qui associe à chaque sommet sa couleur (blanc, gris ou noir).
- On va en plus utiliser un tableau d qui associe à chaque sommet son niveau de profondeur par rapport au sommet de départ  $s_0$  (autrement dit,  $d[s_i]$  est la longueur du chemin dans l'arbores-cence  $\pi$  de la racine  $s_0$  jusque  $s_i$ )

Algorithme de parcours en largeur (BFS)(S, A,  $s_0$ )

```
    Init_file(F)
pour tout sommet  $s_i \in S$  faire
     $\pi[s_i] \leftarrow \text{nil}$ 
     $d[s_i] \leftarrow \infty$ 
    couleur[ $s_i$ ]  $\leftarrow$  blanc
fin pour
 $d[s_0] \leftarrow 0$ 
ajoute_fin_file(F,  $s_0$ )
couleur[ $s_0$ ]  $\leftarrow$  gris
tant que est_vide(F) = faux faire
    enleve_debut_file(F,  $s_i$ )
    pour tout  $s_j \in \text{succ}(s_i)$  faire
    si couleur[ $s_j$ ] = blanc alors
        ajoute_fin_file(F,  $s_j$ )
        couleur[ $s_j$ ]  $\leftarrow$  gris
         $\pi[s_j] \leftarrow s_i$ 
         $d[s_j] \leftarrow d[s_i] + 1$ 
    finsi
    fin pour
    couleur[ $s_i$ ]  $\leftarrow$  noir
fin tant
fin BFS
```

### II.5.2 Complexité :

Chaque sommet (accessible depuis  $S_0$ ) est mis, puis enlevé, une fois dans la file. A chaque fois qu'on enlève un sommet de la file, on parcourt tous ses successeurs, de telle sorte que chaque arc (ou arête) du graphe sera utilisé une fois dans l'algorithme. Par conséquent, si le graphe contient  $n$  sommets (accessibles à partir de  $S_0$ ) et  $p$  arcs/arêtes, alors BFS sera en :

- $O(n^2)$  dans le cas d'une implémentation par matrice d'adjacence.
- $O(n + p)$  dans le cas d'une implémentation par listes d'adjacence.

### II.5.3 Applications du parcours en largeur :

Le parcours en largeur peut être utilisé pour rechercher l'ensemble des sommets accessibles depuis  $s_0$ . A la fin de l'exécution de BFS ( $S, A, s_0$ ), chaque sommet est soit noir soit blanc. Les sommets noirs sont ceux accessibles depuis  $s_0$  ; les sommets blancs sont ceux pour lesquels il n'existe pas de chemin/chaine à partir de  $s_0$ .

D'une façon plus générale, le parcours en largeur permet de déterminer les composantes connexes d'un graphe non orienté. Pour cela, il suffit d'appliquer l'algorithme de parcours en largeur à partir d'un sommet blanc quelconque. A la suite de quoi, tous les sommets en noirs appartiennent à la première composante connexe. S'il reste des sommets blancs, cela implique qu'il y a d'autres composantes connexes. Il faut alors relancer le parcours en largeur sur le sous-graphe induit par les sommets blancs, pour découvrir une autre composante connexe. Le nombre de fois où l'algorithme de parcours en largeur a été lancé correspond au nombre de composantes connexes. Le parcours en largeur peut aussi être utilisé pour chercher le plus court chemin (en nombre d'arcs ou arêtes) entre la racine  $s_0$  et chacun des autres sommets du graphe accessibles depuis  $s_0$ .

Pour cela, il suffit de remonter dans l'arborescence  $\pi$  du sommet concerné jusqu'à la racine  $s_0$ .

L'algorithme (récursif) est le suivant :

```
Algorithme plus_court_chemin( $s_0, s_j, \pi$ )
/* affiche le plus court chemin pour aller de  $s_0$  a  $s_j$  */
si  $s_0 = s_j$  alors afficher( $s_0$ )
```

```
sinon si  $\pi[s_j] = \text{nil}$  alors afficher("pas de chemin")
sinon plus_court_chemin( $s_0, \pi[s_j], \pi$ )
afficher( $s_j$ )
finsi
fin plus court chemin
```

## II.6 Parcours en profondeur (Depth First Search = DFS) :

Le parcours en profondeur est obtenu en gérant la liste d'attente au coloriage en noir comme une pile (LIFO = Last In First Out). Autrement dit, on considère à chaque fois le dernier sommet gris entré dans la pile, et on introduit devant lui tous ses successeurs blancs.

### II.6.1 Structures de données utilisées :

On utilise une pile  $P$ , pour laquelle on suppose définies les opérations  $\text{init\_pile}(P)$  qui initialise la pile  $P$  à vide,  $\text{empile}(P,s)$  qui ajoute  $s$  au sommet de la pile  $P$ ,  $\text{est\_vide}(P)$  qui retourne vrai.

Si la pile  $P$  est vide et faux sinon,  $\text{sommet}(P)$  qui retourne le sommet  $s$  au sommet de la pile  $P$ , et  $\text{depile}(P,s)$  qui enlève  $s$  du sommet de la pile  $P$ .

On utilise, comme pour le parcours en largeur, un tableau  $\pi$  qui associe à chaque sommet le sommet qui l'a fait entrer dans la pile, et un tableau  $\text{couleur}$  qui associe à chaque sommet sa couleur (blanc, gris ou noir).

On va en plus mémoriser pour chaque sommet  $si$  :

$\text{dec}[si] = \text{date de découverte de } si \text{ (passage en gris)}$

$\text{fin}[si] = \text{date de fin de traitement de } si \text{ (passage en noir)}$

où l'unité de temps est une itération.

La date courante est mémorisée dans la variable  $\text{tps}$ .

Algorithme de parcours en profondeur des sommets accessibles depuis  $s_0$  DFS( $S, A, s_0$ )

```
init_pile(P)
pour tout sommet  $si \in S$  faire
     $\pi[si] \leftarrow \text{nil}$ 
     $\text{couleur}[si] \leftarrow \text{blanc}$ 
fin pour
```

```

    tps ← 0
    dec[s0] ← tps
    empile(P, s0)
    couleur[s0] ← gris
    tant que est_vide(P) = faux faire
        tps ← tps + 1
        si ← sommet(P)
        si ∃sj ∈ succ(si) tel que couleur[sj] = blanc alors
            empile(P, sj)
            couleur[sj] ← gris
            π[sj] ← si
            dec[sj] ← tps
        sinon /* tous les successeurs de si sont gris ou noirs */
            depile(P, si)
            couleur[si] ← noir
            fin[si] ← tps
        finsi
    fin tant
    fin DFS

```

### II.6.2 Complexité :

Chaque sommet (accessible depuis  $s_0$ ) est mis, puis enlevé, une fois dans la pile, comme dans BFS. Par conséquent, si le graphe contient  $n$  sommets (accessibles à partir de  $s_0$ ) et  $p$  arcs/arêtes, alors DFS sera en :

- $O(n^2)$  dans le cas d'une implémentation par matrice d'adjacence,
- $O(n + p)$  dans le cas d'une implémentation par listes d'adjacence.

Cet algorithme peut s'écrire récursivement sans utiliser de pile explicite de la façon suivante :

Algorithme récursif de parcours en profondeur des sommets accessibles depuis  $s_0$

```

DFSrec(S, A, s0)
    dec[s0] ← tps
    tps ← tps + 1

```

```
    couleur[s0] ← gris
pour tout sj ∈ succ(s0) faire
    si couleur[sj] = blanc alors
        π[sj] ← s0
        DFSrec(S, A, sj)
    fin si
fin faire
couleur[s0] ← noir
fin[s0] ← tps
tps ← tps + 1
fin DFS rec
```

Dans ce cas, les structures de données  $\pi$ , couleur, **dec** et **tps** sont des variables globales et il est nécessaire de les initialiser auparavant.

Algorithme d'initialisation avant l'appel de DFSrec initDFSrec(S, A)

```
pour tout sommet si ∈ S faire
    π[si] ← nil
    couleur[si] ← blanc
fin pour
tps ← 0
fin
```

La complexité de cet algorithme est la même que sa version itérative.

## II.6.3 Applications du parcours en profondeur :

### II.6.3.1 Recherche des composantes connexes :

Pour rechercher les composantes connexes d'un graphe non orienté, on peut procéder comme avec le parcours en largeur, c'est-à-dire appeler itérativement DFSrec à partir de sommets blancs, jusqu'à ce que tous les sommets soient noirs ; le nombre d'appels à DFSrec correspond au nombre de composantes connexes :

Algorithme global de parcours en profondeur DFSglobal(S, A)

```
  initDFSrec(S, A)
  tant que  $\exists si \in S$  tel que couleur[si] = blanc faire
  /* si appartient à une nouvelle composante connexe */
  DFSrec(S, A, si)
  fin tant
fin DFSglobal
```

### II.6.3.2 Recherche de circuits :

Lors du parcours en profondeur d'un graphe non orienté (resp. Orienté), si un successeur  $S_j$  du sommet "courant" si au sommet de la pile est déjà gris, cela implique qu'il existe une chaîne (resp. un chemin) permettant d'aller de  $S_j$  vers si, et donc qu'il existe un cycle (resp. un circuit).

Ainsi, un algorithme pour détecter les cycles/circuits d'un graphe peut être obtenu en rajoutant dans l'algorithme **DFSrec** l'instruction  
si couleur[ $S_j$ ] = gris alors afficher("existence d'un cycle") juste après la boucle "pour tout  $S_j \in \text{succ}(S_0)$  faire".

De la même façon, le parcours en profondeur permet de découvrir si un graphe possède plusieurs chemins élémentaires entre deux sommets. En effet, si lors du parcours en profondeur, un successeur  $S_j$  du sommet "courant" si au sommet de la pile est déjà noir, cela implique qu'il existe déjà un chemin permettant d'aller d'un ancêtre de si vers  $S_i$ .

### II.6.3.3 Tri topologique des sommets d'un graphe orienté :

Le tri topologique d'un graphe orienté sans circuit  $G = (S, A)$  consiste à ordonner linéairement tous ses sommets de telle sorte que si l'arc  $(u, v) \in A$ , alors u apparaisse avant v. (Si le graphe comporte des circuits, aucun ordre linéaire n'est possible.) Le tri topologique d'un graphe peut être vu comme un alignement de ses sommets le long d'une ligne horizontale de telle sorte que tous les arcs du graphe soient orientés de gauche à droite.

### II.6.3.3.1 Théorème :

Après l'exécution de DFSglobal(S, A), pour tout arc  $(s_i, s_j) \in A$ , on a  $f_{in}[s_j] < f_{in}[s_i]$ .

En effet, à l'appel de DFSrec(S, A,  $s_i$ ),

- si  $s_j$  est noir alors  $f_{in}[s_j] < tps < f_{in}[s_i]$
- si  $s_j$  est blanc alors  $dec[s_i] = tps < dec[s_j] < f_{in}[s_j] < f_{in}[s_i]$
- $s_j$  ne peut pas être gris car ça impliquerait l'existence d'un circuit.

Par conséquent, pour obtenir un tri topologique des sommets d'un graphe, il suffit d'exécuter DFS global, puis de trier les sommets par ordre de valeur de  $f_{in}$  décroissante.

D'une façon plus générale, les graphes orientés sans circuit sont utilisés dans de nombreuses applications pour représenter des précédences entre événements : les sommets représentent les événements, et les arcs les relations de précédence.

Dans ce cas, un tri topologique permet de trier les événements de telle sorte qu'un événement n'apparait qu'après tous les événements qui doivent le précéder.

### II.6.3.4 Recherche des composantes fortement connexes d'un graphe orienté :

Un algorithme pour rechercher les composantes fortement connexes d'un graphe orienté est donné ci-dessous.

Algorithme de recherche des composantes fortement connexes (S, A)

DFSglobal(S, A)

inverser les sens de tous les arcs du graphe

trier les sommets par ordre de numéro de fin décroissant dans un tableau t

initDFSrec(S, A)

nbcf c  $\leftarrow$  0

tant que  $\exists s_i \in S$  tel que couleur[ $s_i$ ] = blanc faire

soit  $s_j$  le prochain sommet blanc dans le tableau t

DFSrec(S, A,  $s_j$ )

nbcf c  $\leftarrow$  nbcf c + 1

fin tant

fin

**II.6.3.4.1 Complexité :**

Cet algorithme a la même complexité qu'un parcours en profondeur, pour peu que l'on trie les sommets par ordre de numéro de fin décroissant au fur et à mesure du parcours en profondeur (autrement dit, à chaque fois que l'on affecte un numéro de fin à un sommet, on l'insère au sommet d'une liste).

**II.6.3.5 Plus courts chemins :**

**II.6.3.5.1 Définition :**

Soit  $G = (S, A)$  un  $l$ -graphe orienté valué tel que la fonction cout :

$A \rightarrow R$  associe à chaque arc

$(s_i, s_j)$  de  $A$  un coût réel  $\text{cout}(s_i, s_j)$ .

Le coût d'un chemin  $p = \langle s_0, s_1, s_2, \dots, s_k \rangle$  est égal à la somme des coûts des arcs composant le chemin, c'est à dire,

$$\text{cout}(p) = \sum_{i=1, \dots, k} \text{cout}(s_{i-1}, s_i)$$

Le coût d'un chemin sera aussi appelé **poind du chemin**.

Le coût (ou poind) d'un plus court chemin entre deux sommets  $s_i$  et  $s_j$  est noté  $\delta(s_i, s_j)$  est défini par :

$$\delta(s_i, s_j) = +\infty \quad \text{si } \nexists \text{ de chemin entre } s_i \text{ et } s_j$$

$$\delta(s_i, s_j) = \min \{ \text{cout}(p) / p = \text{chemin de } s_i \text{ a } s_j \} \quad \text{sinon}$$

Considérons par exemple le graphe valué orienté suivant :

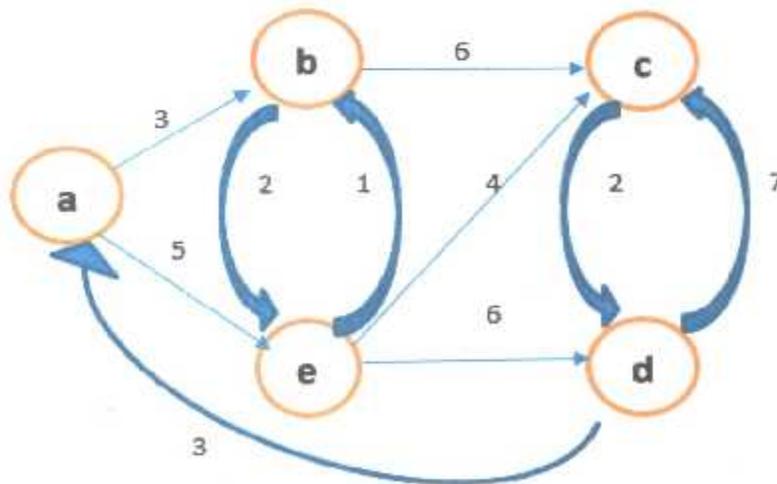


Figure II. 2 :exemple graph orienté

On a  $\delta(a, b) = 3$ ,  $\delta(a, e) = 5$ ,  $\delta(a, c) = 9$  et  $\delta(a, d) = 11$ .

### II.6.3.6 Algorithme de Dijkstra

**Idée :** On maintient 2 ensembles disjoints  $E$  et  $F$  tels que  $E \cup F = S$ .

L'ensemble  $E$  contient chaque sommet si pour lequel on connaît un plus court chemin depuis  $s_0$  (c'est-à-dire pour lequel  $d[s_i] = \delta(s_0, s_i)$ ). L'ensemble  $F$  contient tous les autres sommets. A chaque itération de l'algorithme, on choisit le sommet  $s_i$  dans  $F$  pour lequel la valeur  $d[s_i]$  est minimale, on le rajoute dans  $E$ , et on relâche tous les arcs partant de ce sommet  $s_i$ .

**func Dijkstra**( $G = (S, A)$ ,  $\text{cout} : A \rightarrow \mathbb{R}^+$ ,  $s_0 \in S$ )

**retourne** une arborescence des plus courts chemins d'origine  $s_0$

**pour** chaque sommet  $s_i \in S$  **faire**

$d[s_i] \leftarrow +\infty$

$\pi[s_i] \leftarrow \text{nil}$

**fin pour**

$d[s_0] \leftarrow 0$

$E \leftarrow \emptyset$

$F \leftarrow S$

**tant que**  $F \neq \emptyset$  **faire**

soit  $s_i$  le sommet de  $F$  tel que  $d[s_i]$  soit minimal

*/\*  $d[s_i] = \delta(s_0, s_i)$  \*/*

$F \leftarrow F - \{s_i\}$

$E \leftarrow E \cup \{s_i\}$

**pour tout** sommet  $s_j \in \text{succ}(s_i)$  **faire** : relacher( $s_i, s_j$ )

**fin tant**

**retourner**( $\pi$ )

**fin Dijkstra**

#### II.6.3.6.1 Correction de l'algorithme de Dijkstra :

On peut se convaincre de la correction de l'algorithme de Dijkstra en montrant qu'à chaque fois qu'un sommet  $s_i$  entre dans l'ensemble  $E$ , on a  $d[s_i] = \delta(s_0, s_i)$ . En effet, le premier sommet à entrer dans l'ensemble  $E$  est  $s_0$ , pour lequel

$$d[s_0] = 0 = \delta(s_0, s_0).$$

A chaque itération, on fait entrer dans  $F$  un sommet  $s_i \in F$  tel que  $d[s_i]$  soit minimal. L'idée est que, dans ce cas, s'il existe un autre chemin allant de  $s_0$  jusque  $s_i$ , alors il passera nécessairement par un sommet  $s_j \in F$  tel que  $d[s_j] > d[s_i]$  (puisque  $d[s_i]$  est minimal).

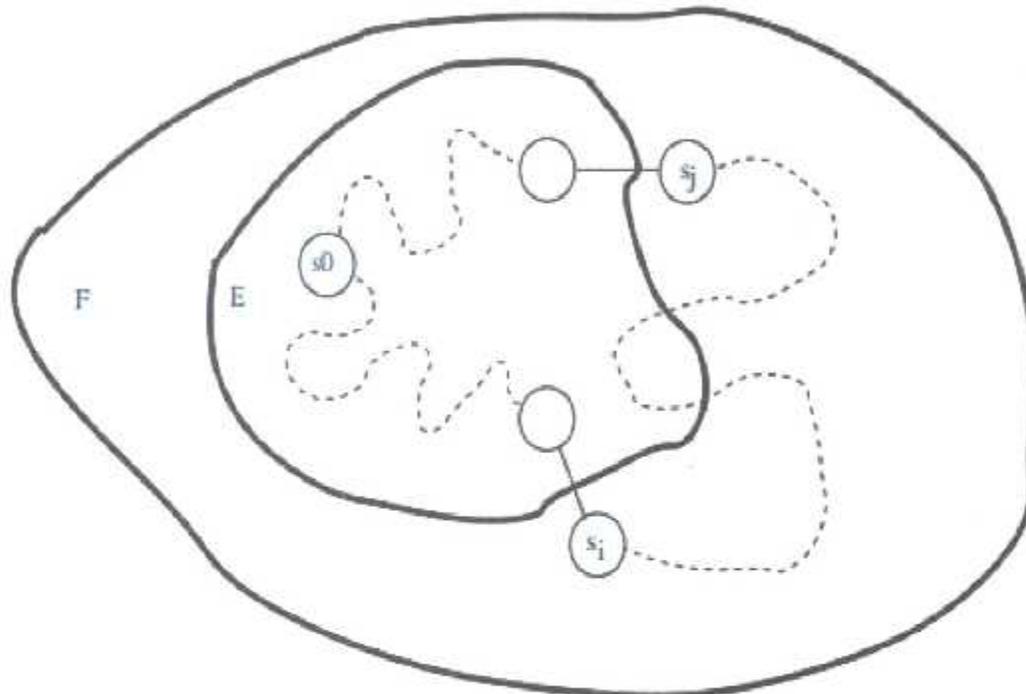


Figure II. 3: illustration algorithme Dijkstra

Sachant que la fin de ce chemin (de  $s_j$  par  $s_i$ ) ne peut faire qu'augmenter la distance du chemin, cet autre chemin sera forcément plus long. Par conséquent, on ne pourra pas trouver de chemin plus court pour aller de  $s_0$  à  $s_i$ , et on peut faire entrer  $s_i$  dans  $E$ , et relâcher tous les arcs qui partent de  $s_i$ .

### II.6.3.6.2 Complexité :

La complexité de cet algorithme dépend de l'implémentation du graphe (par matrice ou par liste d'adjacence), mais aussi de la façon de gérer l'ensemble  $F$ . On suppose que le graphe possède  $n$  sommets et  $p$  arcs. Si on utilise une matrice d'adjacence, l'algorithme sera en  $O(n^2)$ . En revanche, si on utilise une liste d'adjacence, alors :

Si  $F$  est implémenté par une liste linéaire, ou un tableau, il faudra chercher, à chaque itération, le sommet dans  $F$  ayant la plus petite valeur de  $d$ . Etant donné qu'il y a  $n$  itérations, et qu'au premier passage  $F$  contient  $n$  éléments, et qu'à chaque passage suivant  $F$  contient

un élément de moins, il faudra au total faire de l'ordre de  $n + (n - 1) + (n - 2) + \dots + 2 + 1$  opérations, soit  $O(n^2)$ . En revanche, chaque arc étant relâché une seule fois, les opérations de relâchement prendront de l'ordre de  $p$  opérations. Au total on aura donc une complexité en  $O(n^2)$ .

Pour améliorer les performances de l'algorithme, il faut trouver une structure de données permettant de trouver plus rapidement la plus petite valeur dans l'ensemble  $F$ . Pour cela, on peut utiliser un tas binaire : un tas binaire permet de trouver le plus petit élément d'un ensemble en temps constant (immédiatement). En revanche, l'ajout, la suppression ou la modification d'un élément dans un tas binaire comportant  $n$  éléments prendra de l'ordre de  $\log_2(n)$  opérations. Par conséquent, si on implémente  $F$  avec un tas binaire, on obtient une complexité pour Dijkstra en  $O(p * \log(n))$ .

**Exemple :**

On considère un réseau de télécommunication, composé d'émetteurs/récepteurs pouvant s'envoyer des messages, avec une certaine fiabilité de communication, c'est à dire une certaine pour que la communication ne soit pas interrompue. On modélise ce problème à l'aide du graphe orienté et valué suivant, où la valuation d'un arc est une valeur réelle comprise entre 0 et 1 et indiquant la probabilité pour que la communication se passe sans problème.

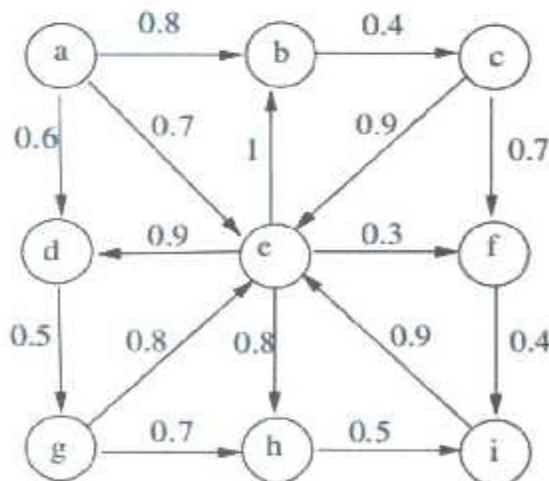


Figure II. 4: exemple algorithme Dijkstra

Quel est le chemin le plus fiable pour envoyer un message de a vers i ?

**Correction** : on cherche le chemin pour lequel le produit des probabilités soit maximal. Pour cela, on peut adapter l'algorithme de Dijkstra de la façon suivante :

Pour chaque sommet  $s_i \in S$  faire

```
d[si] ← 0
π[si] ← nil
fin pour
d[a] ← 1
F ← S
tant que F ≠ ∅ faire
  soit si ∈ F le sommet tel que d[si] soit maximal
  F ← F - {si}
  pour tout sommet sj ∈ succ(si) faire :
    si d[sj] < d[si] * cout(si, sj) alors
      d[sj] ← d[si] * cout(si, sj)
      π[sj] ← π[si]
  finsi
fin pour
fin tant
```

**Attention :**

Cet algorithme ne marche que si les poids des arcs sont tous compris entre 0 et 1 de telle sorte qu'à chaque fois qu'on ajoute un arc à un chemin, on diminue le coût total du chemin (pour la même raison que Dijkstra ne marche que pour des coûts positifs).

### II.6.3.7. Algorithme de Bellman-Ford

L'algorithme de Dijkstra ne marche pas toujours quand le graphe contient des arcs dont les coûts sont négatifs. Considérons par exemple le graphe suivant :

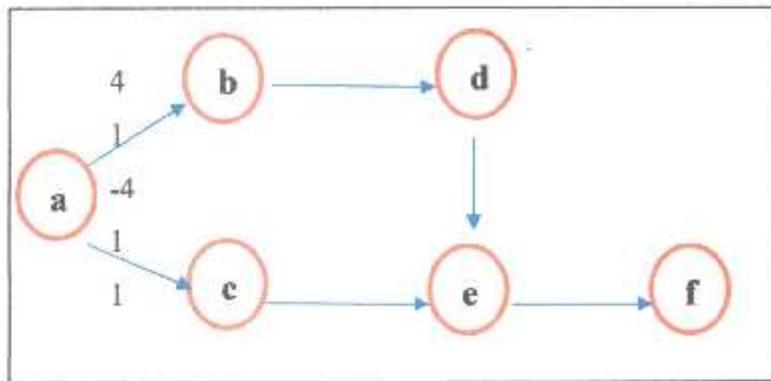


Figure II. 5: illustration algorithme Bellman-Ford

Pour aller de a à f, l'algorithme de Dijkstra va trouver le chemin  $\langle a, c, e, f \rangle$ , de poids 3, alors que le chemin  $\langle a, b, d, e, f \rangle$  est de poids 2.

L'algorithme de Bellman-Ford permet de trouver les plus courts chemins à origine unique dans le cas où le graphe contient des arcs dont le coût est négatif, sous réserve que le graphe ne contienne pas de circuit absorbant (dans ce cas, l'algorithme de Bellman-Ford va détecter l'existence de circuits absorbants).

L'algorithme de Bellman-Ford fonctionne selon le même principe que celui de Dijkstra : on associe à chaque sommet si une valeur  $d[si]$  qui représente une borne maximale du coût du plus court chemin entre  $s_0$  et  $si$ .

L'algorithme diminue alors progressivement les valeurs  $d[si]$  en relâchant les Arcs. Contrairement à Dijkstra, chaque arc va être relâché plusieurs fois : on relâche une première fois tous les arcs ; après quoi, tous les plus courts chemins de longueur 1, partant de  $s_0$ , auront été trouvés. On relâche alors une deuxième fois tous les arcs ; après quoi tous les plus courts chemins de longueur 2, partant de  $s_0$ , auront été trouvés... et ainsi de suite... Après la  $k$ ème série de relâchement des arcs, tous les plus courts chemins de longueur  $k$ , partant de  $s_0$ , auront été trouvés. Etant donné que le graphe ne comporte pas de circuit absorbant, un plus court chemin est nécessairement élémentaire. Par conséquent, si le graphe comporte  $n$  sommets, et s'il ne contient pas de circuit absorbant, un plus court chemin sera de longueur inférieure à  $n$  et au bout de  $n - 1$ , on aura trouvé tous les plus courts chemins partant de  $s_0$ . (Si le graphe contient un circuit absorbant, au bout de  $n - 1$  passages, on aura encore au moins un arc  $(si, sj)$  pour lequel un relâchement permettrait de diminuer la valeur de  $d[sj]$ . L'algorithme utilise cette propriété pour Détecter la présence de circuits absorbants.)

fonc **Bellman-Ford**( $G = (S, A)$ , cout :  $S \rightarrow R$ ,  $s_0 \in S$ )

```
retourne une arborescence des plus courts chemins d'origine  $s_0$ 
pour chaque sommet  $s_i \in S$  faire
   $d[s_i] \leftarrow +\infty$ 
   $\pi[s_i] \leftarrow \text{nil}$ 
fin pour
 $d[s_0] \leftarrow 0$ 
pour  $k$  variant de  $1$  à  $|S| - 1$  faire
  pour chaque arc  $(s_i, s_j) \in A$  faire relacher( $s_i, s_j$ ) fin pour
fin pour
pour chaque arc  $(s_i, s_j) \in A$  faire
  si  $d[s_j] > d[s_i] + \text{cout}(s_i, s_j)$  alors afficher("circuit absorbant") fin si
fin pour
retourner( $\pi$ )
fin Bellman-ford
```

### II.6.3.7.1 Complexité :

Si le graphe comporte  $n$  sommets et  $p$  arcs, chaque arc sera relâché  $n - 1$  fois, et on effectuera donc au total  $(n - 1)p$  relâchements successifs. Si le graphe est représenté par des matrices d'adjacence, on aura une complexité en  $O(n^3)$ , alors que s'il est représenté par des listes d'adjacence, on aura une complexité en  $O(np)$ .

**Remarque :** En pratique, on pourra arrêter l'algorithme dès lors qu'aucune valeur de  $d$  n'a été modifiée pendant une itération complète. On pourra aussi mémoriser à chaque itération l'ensemble des sommets pour lesquels la valeur de  $d$  a changé, afin de ne relâcher lors de l'itération suivante que les arcs partant de ces sommets.

### Exemple :

**Exercice :** Peut-on modifier l'algorithme de Bellman-Ford pour qu'il trouve les plus longs chemins à partir d'un sommet donné ?

**Correction :** oui, sous réserve que le graphe ne contienne pas de circuit absorbant de poids positif.

On peut par exemple inverser les valuations des arcs  $\text{cout}(s_i, s_j) \leftarrow -\text{cout}(s_i, s_j)$  pour tout arc  $(s_i, s_j)$ , puis appliquer Bellman-Ford tel quel. On peut aussi modifier légèrement

l'algorithme, en remplaçant les initialisations de valeurs de  $d[s_i]$  de  $+\infty$  à  $-\infty$ , et en remplaçant le test  $d[s_j] > d[s_i] + \text{cout}(s_i, s_j)$  par  $d[s_j] < d[s_i] + \text{cout}(s_i, s_j)$ .

**Attention**, on ne peut pas faire la même chose pour l'algorithme de Dijkstra.

### **Synthèse :**

En résumé, en fonction des caractéristiques du problème à résoudre il faudra choisir le bon algorithme :

- Si le graphe ne comporte pas de circuit alors, que l'on recherche un plus court chemin ou un plus long chemin, il suffit de trier les sommets topologiquement avec un parcours en profondeur d'abord, puis de considérer chaque sommet dans l'ordre ainsi défini et relâcher à chaque fois tous les arcs partant de ce sommet ;
- Si le graphe comporte des circuits, alors
- Si la fonction coût est telle que tout sous chemin d'un chemin optimal est également optimal, alors on pourra appliquer Dijkstra.
- Sinon, on appliquera Bellman-Ford, et on vérifiera en même temps que le graphe ne comporte pas de circuits absorbants.[1]

### **Conclusion :**

La problématique de l'optimisation de la gestion du personnel navigant est d'une complexité remarquable, englobant une multitude de variables et de contraintes qui nécessitent une attention méticuleuse. Dans ce chapitre, nous avons exploré plusieurs méthodes de résolution pour aborder ce défi, en mettant un accent particulier sur les algorithmes de parcours de graphe tels que DFS (Depth-First Search) et BFS (Breadth-First Search).

Chaque algorithme possède ses propres avantages. Le DFS, par exemple, est particulièrement efficace pour explorer en profondeur les solutions possibles, permettant ainsi de garantir que toutes les options sont envisagées. Le BFS, quant à lui, offre une exploration plus large, ce qui peut être bénéfique pour identifier rapidement des solutions viables dans un espace de recherche étendu. Le parcours de graphe, en général, fournit une structure pour visualiser et naviguer à travers l'ensemble complexe des combinaisons possibles, rendant ainsi le processus d'optimisation plus compréhensible et gérable.

En fin de compte, la sélection de la méthode appropriée dépend largement de la nature spécifique du problème à résoudre et des contraintes opérationnelles. Ce qui est clair,

cependant, c'est que l'utilisation de ces techniques avancées est indispensable pour aborder efficacement la question de la gestion du personnel navigant. En combinant ces méthodes avec une compréhension approfondie des besoins du secteur aéronautique, nous sommes en mesure de proposer des solutions robustes qui non seulement optimisent l'utilisation du personnel, mais contribuent également à une meilleure rentabilité et efficacité pour les compagnies aériennes.

---

**Chapitre III : Approche proposé pour la  
résolution du problème et Réalisation  
& Résultat**

---

### **Introduction :**

L'industrie aéronautique est un secteur d'une importance capitale, garantissant des déplacements sûrs et efficaces à l'échelle mondiale. Cependant, elle est soumise à des réglementations et normes strictes établies par des organismes tels que l'OACI, l'EASA et l'IATA, visant à assurer la conformité et la sécurité des opérations aériennes. Dans ce contexte, les compagnies aériennes sont confrontées à des défis majeurs en matière de conformité, touchant des domaines variés tels que la sécurité, l'environnement, la qualité et les finances. Pour répondre à ces exigences, il est essentiel d'adopter une gestion intégrée recommandée par l'IATA et approuvée par l'OACI, visant à améliorer les performances et à garantir une conformité rigoureuse. Cette étude se plonge dans les tenants et aboutissants de la conformité réglementaire et de la sécurité dans l'industrie aérienne, en explorant également l'optimisation des ressources humaines et la coordination précise nécessaire pour garantir des vols sûrs et efficaces.

### **III.1 Conformité Réglementaire et Sécurité dans l'Industrie Aérienne :**

Les compagnies aériennes font face à des défis majeurs en matière de conformité, notamment en respectant les réglementations et les normes établies par des organismes de réglementation tels que l'OACI, l'EASA et l'IATA. Elles doivent démontrer leur conformité aux normes de sécurité et de qualité édictées par ces organismes et rassurer les autres membres sur le respect de ces normes. Ces membres scrutent de manière continue les opérations de chaque compagnie. Cette industrie subit diverses pressions en termes de conformité, qu'il s'agisse de la sécurité, de l'environnement, de la qualité ou encore des finances. Pour répondre à ces pressions, les compagnies aériennes s'engagent à adopter une gestion intégrée, recommandée par l'IATA et approuvée par l'OACI, pour améliorer leurs performances.

### **III.2 Optimisation des Ressources Humaines dans l'Industrie Aéronautique :**

Le problème de pairings en aéronautique fait référence à l'affectation des membres d'équipage à des vols spécifiques sur une période donnée. Il s'agit d'une tâche complexe,

### Réalisation & Résultat

visant à optimiser l'utilisation des ressources humaines tout en garantissant la conformité aux réglementations relatives au temps de vol et de repos. La planification des rotations et des emplois du temps est étroitement liée à ce problème. Elle consiste à planifier les horaires de travail des membres d'équipage sur une période plus longue, généralement un mois ou un trimestre. Ces deux problèmes sont liés à la gestion des personnels navigants en aéronautique, où il est essentiel d'optimiser leur utilisation pour maximiser l'efficacité opérationnelle tout en respectant les réglementations.

### **III.3 Problématique des Pairings et de la Planification des Équipages en Aéronautique :**

L'industrie de l'aéronautique repose sur une coordination précise et complexe pour assurer des vols sûrs et efficaces. Cela inclut la gestion des équipages à travers des processus tels que les "crew pairings", le "crew rostering" et la planification des vols. Les "crew pairings" consistent à créer des combinaisons d'équipages spécifiques pour des vols donnés en tenant compte de divers facteurs tels que les compétences, les qualifications, les heures de vol et les réglementations de repos. D'autre part, le "crew rostering" implique la création des horaires de travail des équipages sur une période donnée, tout en équilibrant les heures de vol, les périodes de repos, les jours de congé et les besoins individuels des membres d'équipage. Enfin, la planification des vols concerne l'élaboration des horaires de vols pour une compagnie aérienne sur une période plus longue, en tenant compte de la demande des passagers, des contraintes opérationnelles et des capacités des aéroports.

#### **III.3.1 Gestion des Équipages dans le Transport Aérien :**

La gestion des équipages dans le transport aérien nécessite une coordination minutieuse pour garantir des vols sûrs et efficaces. Cette coordination passe par la planification précise des "crew pairings", du "crew rostering" et des horaires de vols. Les "crew pairings" consistent à créer des combinaisons appropriées d'équipages pour chaque vol, en tenant compte des compétences, des heures de vol et des réglementations. Le "crew rostering" vise à établir des horaires de travail équilibrés pour les équipages sur une période donnée. Enfin, la planification des vols implique la création d'horaires optimisés pour les

## Réalisation & Résultat

vols, tenant compte de la demande, des contraintes opérationnelles et des besoins des passagers.

### **III.4 Modélisation du problème :**

La modélisation de ce problème nécessite une approche systématique qui prend en compte toutes les variables, données et contraintes mentionnées ci-dessus. L'objectif principal serait d'optimiser l'affectation du personnel navigant aux vols tout en respectant toutes les contraintes.

Ceci peut être réalisé en utilisant des méthodes d'optimisation comme on a mentionné dans le chapitre précédent.

#### **III.4.1 Définitions :**

##### **III.4.1.1 Ensembles :**

Ils représentent les collections ou groupes d'éléments qui partagent des caractéristiques communes. Dans notre contexte de la planification du personnel navigant, un ensemble représente un groupe de vols, un groupe de personnel navigant, ou d'autres entités pertinentes.

##### **III.4.1.2 Variables de décision :**

Ce sont les éléments sur lesquels des décisions doivent être prises. Par exemple, l'affectation d'un membre d'équipage à un vol particulier serait une variable de décision. DH (Deadheading).

##### **III.4.1.3 Données**

Les données représentent toutes les informations pertinentes nécessaires pour prendre des décisions. Cela inclut les horaires de vol, flight ID, la disponibilité du personnel navigant, les contraintes réglementaires, les destinations programmer etc.

##### **III.4.1.4 Contraintes**

Réalisation & Résultat

Ce sont les restrictions ou les conditions qui doivent être respectées lors de la prise de décisions. Les contraintes peuvent être légales, opérationnelles ou basées sur les préférences du personnel.

Le Pairing doit commencer et se terminer a la même base.

**III.4.2 les conditions variables :**

Pairing =  $\sum$ periodes de services +  $\sum$  périodes de repos

Période de services = Breifing +  $\sum$ segment de vol +  $\sum$ temps de connexion + Debriefing

Temps de connexion = temps entre deux segments de vol

Temps total du vol = temps des périodes de service

$\sum$ segment de vol =  $\leq$  bloc time

Temps de repos (temps d'arrêt) = temps entre deux périodes de services

Breifing=30mn

Debriefing=60mn

30mn  $\leq$  Temps de connexion  $\leq$  180mn

Un segment de vol  $\leq$  Période de vol  $\leq$  quatre segments de vol ou maximum cinq

Une période de service  $\leq$  Pairing  $\leq$  quatre périodes de service

→ Si  $P_v \leq 6h$

Si ( $T_a$  on base) alors

$T_a \geq 11h$

Sinon ( $T_a$  hors base) :

$T_a < 11h$

Et  $T_{n+1} \geq 18h$  et  $AN \in T_a$

Ou  $T_{v+1} \leq 6h$

Fin si

**Fin si**

→ Si  $6h < P_v < 10h$

Si  $T_a$  (on base)

Si  $6h < P_v < 8h$

$T_a \leq 3 * P_v$

Réalisation & Résultat

Sinon

$$T_a \geq 4 * P_v$$

Ou :  $T_a \geq 36h$  et  $2 * AN \in T_a$

Fin si

Sinon

$$\text{Si } 6h < P_v < 8h$$

$$12 < T_a < 3 * P_v$$

Sinon

$$24 < T_a < 36$$

Et  $T_{a+1} \geq (36h + (36 - T_a))$  et  $2 * AN \in T_a$

Fin Si

Fin Si

**Fin Si**

→ **Si  $P_v > 10h$**

Si  $T_{a-1} \geq 36$  et  $2 * AN \in T_{a-1}$

$$P_v > 10h$$

Fin si

Si  $T_a$  on base

$T_a \geq 36h$  et  $2 * AN \in T_a$

Si non

$$T_a \geq 18h$$

Et  $T_{a+1} \geq (36h + (36 - T_a))$  et  $2 * AN \in T_a$

Fin si

**Fin si**

→ **If  $DH=1$**

$$P_v = \frac{PVD}{2} + P_v$$

Go to 1

**Fin si**

**Conclusion :**

La compagnie aérienne doit assurer un certain nombre de vols, et affecter le PN approprié a des périodes de service tout cela en respectant une série de contraintes réglementaire (durée de vol, durée maximale de service, durée minimalc de repos, repos pré-courrier et poste courrier ...) Et couvrir le maximum de ces vols sur une période donné afin de maximiser les profits et minimiser les dépenses.

---

## **Chapitre III: Réalisation & Résultat**

---

### **Introduction :**

Ce chapitre présente en détail l'application qu'on a développée dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude. En utilisant le langage de programmation Python, nous avons conçu ce programme visant à résoudre un problème spécifique et à apporter une solution pratique et efficace pour la gestion des PN.

Dans ce qui suit on va représenter les différentes fiches qui composent notre logiciel mais avant on vas présenter l'environnement de programmation utiliser .

### **III.1 Présentation de l'environnement utiliser :**

**Code Studio :** est un environnement de développement intégré (EDI) visuel conçu pour permettre aux débutants d'apprendre les concepts fondamentaux de la programmation de manière interactive et amusante.

VS Code est un éditeur de code source léger, mais puissant, qui s'exécute sur le bureau et est disponible pour Windows, macOS et Linux

Ce choix a été fait par rapport aux caractéristiques clés qui se mets en évidence dans :

L'offre d'une interface visuelle qui permet aux utilisateurs de programmer en utilisant des blocs de code préconstruits et de les assembler pour créer des programmes fonctionnels. Cela facilite la compréhension des concepts de programmation sans la complexité de la syntaxe du code.

Le Feedback immédiat ; ils reçoivent un feedback immédiat sur les erreurs et les réussites. Cela nous a permis de mieux les assimiler , en addition de tout ça VSC permet de travailler avec différents langages comme Python, C++, XML JavaScript, Node. JS et bien d'autres. Il fournit des extensions pour le développement front, back et fullstack.

### **III.2 Langage de programmation :**

#### **Le langage Python :**

Python est l'un des langages de programmation les plus populaires et largement utilisés dans le monde de la programmation. son syntaxe claire et lisible, a fait de lui un excellent choix pour nous comme débutants.

Ce choix a été fait par rapport aux caractéristiques clés qui se mets en évidence dans :

La syntaxe simple car le Python utilise une syntaxe simple et facile à comprendre, qui ressemble à un langage naturel. Cela facilite la lecture et la compréhension du code, réduisant ainsi les erreurs de syntaxe car c'est un langage interprété, ce qui signifie qu'il exécute directement le code ligne par ligne. S'il y a des erreurs dans le code du programme, celui-ci s'arrête de fonctionner. On a donc trouvé rapidement les erreurs dans notre code.

Il a une Large bibliothèque standard ; Python dispose d'une vaste bibliothèque standard qui offre une gamme de modules et de fonctions prédéfinis. Cela nous a permis aux d'accéder à des fonctionnalités avancées sans avoir à réinventer la roue, ce qui a facilité le développement rapide de notre application

### III.3 Présentation de l'application:

Dans cette section, nous explorerons les fonctionnalités clés de l'application et les techniques de programmation qu'on a utilisées et les résultats obtenus.

En cliquant sur l'icône de notre application au bureau on arrive a l'interface ( page) des paramètres.



Figure III. 1 : Interface des paramètres

On a cliqué sur le bouton « commencer » logiciel affiche des figures de période de service et les données suivantes : home base et les vols effectuer.

Exemple :

période de service 1

flight id	depart	destination	heure de depart	heure d arrive	temps de vol ( diff arrive et depart )	temps de connexion
					la somme	

periode de repos =

periode de service 2

periode de repos

périodes de service 3

Périodes de repos

Périodes de service 4

Périodes de repos

la somme

Figure III. 2: schéma de l'affichage finale

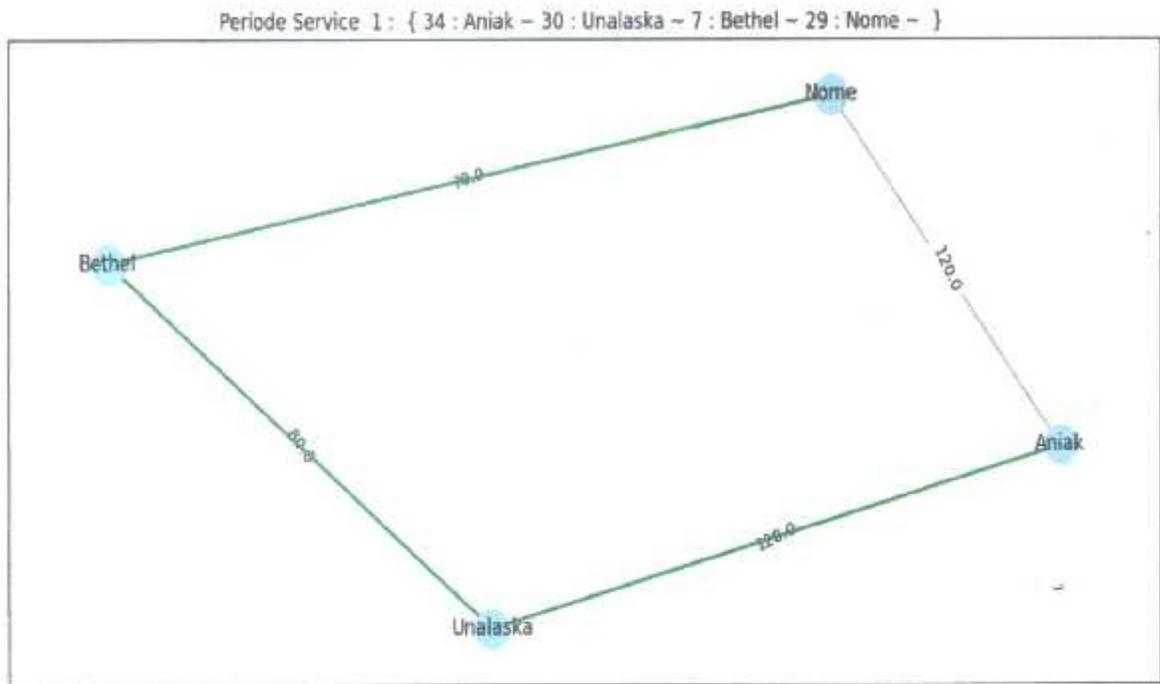


Figure III. 3: L'affichage de période de service 1

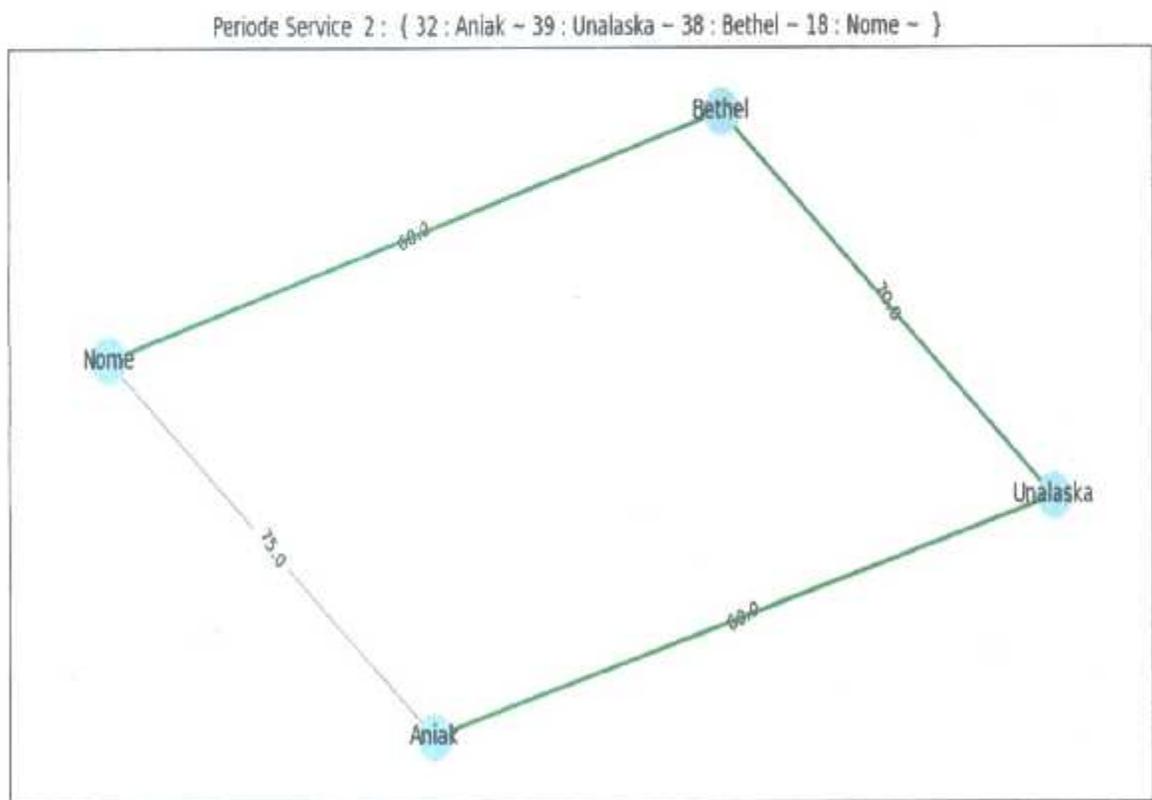


Figure III. 4: L'affichage de période de service 2

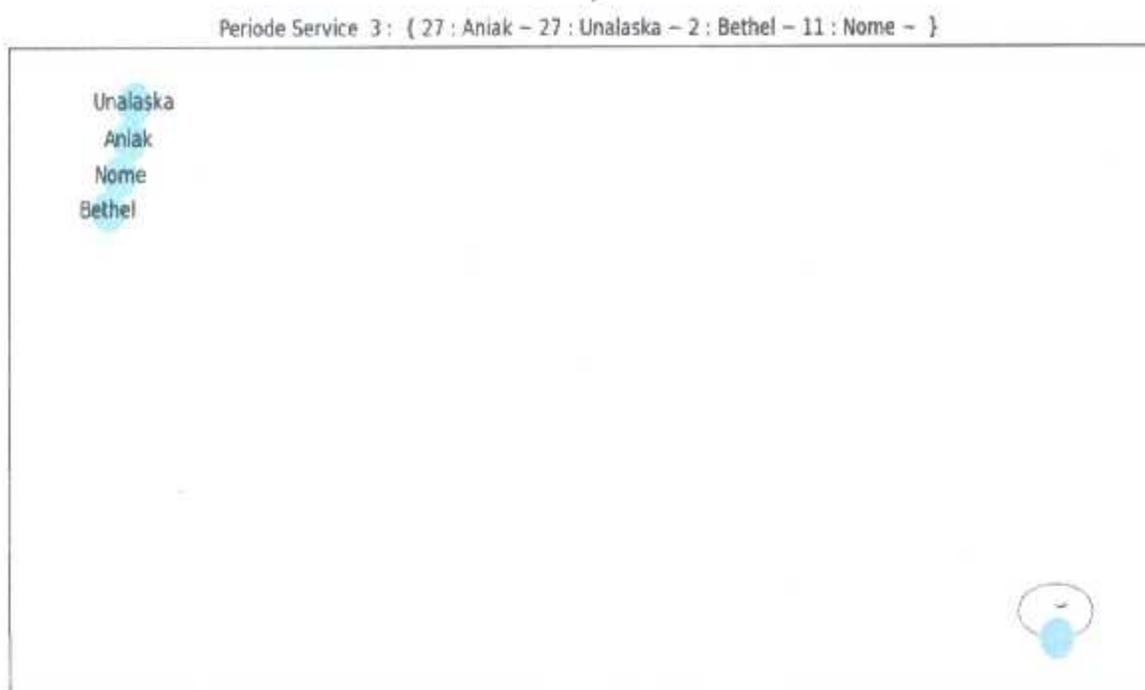


Figure III. 5: L'affichage de période de service 3



Figure III. 6: L'affichage de période de service 4

Puis en quittant le menu des résultats des période de service en auras le tableau de résultat final du pairing optimiser sous la forme suivantes :

---

## Chapitre III: Réalisation

### Résultat final :

flight ID	depart	destination	heur de depart	heur de l'arrive	temps de vol	temps de connexion	FltDutyStar	FltDutyEnd
Période de service 1								
34	Aniak	Unalaska	14:45	16:15	120		20/04/2023	20/04/2023
30	Unalaska	Bethel	17:00	18:20	80	45	20/04/2023	20/04/2023
7	Bethel	Nome	20:00	21:10	70	100	20/04/2023	20/04/2023
29	Nome	Aniak	22:00	00:00	120	50	20/04/2023	20/04/2023
Somme de Période de service					390	Somme de temps de Connexion	195	
Période de service 2								
32	Aniak	Unalaska	22:00	23:00	60		22-04-2023	22-04-2023
39	Unalaska	Bethel	01:00	02:10	70	120	23/04/2023	23/04/2023
38	Bethel	Nome	05:00	06:00	60	170	23-04-2023	23/04/2023
18	Nome	Aniak	08:15	09:30	75	135	23/04/2023	23/04/2023
Somme de Période de service					265	Somme de temps de connexion	425	
Période de service 3								
27	Aniak	Unalaska	22:30	23:30	60		24/04/2023	24/04/2023
2	Bethel	Nome	02:30	03:30	60	180	25/04/2023	25/04/2023
11	Nome	Aniak	04:30	05:45	75	120	25/04/2023	25/04/2023
26	Aniak	Unalaska	08:45	09:45	60	180	25/04/2023	25/04/2023
Somme de Période de service					255	Somme de temps de connexion	480	
Période de service 4								
23	Aniak	Unalaska	17:00	18:00	60		26/04/2023	26/04/2023
15	Unalaska	Aniak	20:30	22:30	120	150	26/04/2023	24/04/2023
Somme de Période de Service					180	Somme de temps de connexion	150	

Figure III. 4 : tableau d'affichage de résultat final

Voilà le résultat afficher dans le CMD :

```

departure ::: Aniak
['34', 'Aniak', 'Unalaska', '07:45', '09:45', 120, 150, '24-04-2023', '25-04-2023']
['30', 'Unalaska', 'Bethel', '17:00', '18:20', 80, 170, '29-04-2023', '20-04-2023']
['7', 'Bethel', 'Nome', '11:00', '12:10', 70, 160, '28-03-2023', '28-03-2023']
['20', 'Nome', 'Aniak', '07:45', '09:45', 120, 210, '10-04-2023', '19-04-2023']
departure ::: Aniak
['32', 'Aniak', 'Unalaska', '22:00', '23:00', 60, 90, '22-04-2023', '22-04-2023']
['39', 'Unalaska', 'Bethel', '11:00', '12:10', 70, 160, '19-04-2023', '19-04-2023']
['38', 'Bethel', 'Nome', '11:45', '12:45', 60, 150, '23-04-2023', '24-04-2023']
['18', 'Nome', 'Aniak', '21:15', '22:30', 75, 165, '08-04-2023', '06-04-2023']
departure ::: Aniak
['27', 'Aniak', 'Unalaska', '22:00', '23:00', 60, 90, '17-04-2023', '17-04-2023']
['2', 'Bethel', 'Nome', '06:00', '07:00', 60, 150, '23-03-2023', '23-03-2023']
['11', 'Nome', 'Aniak', '16:50', '18:05', 75, 165, '01-04-2023', '01-04-2023']
['26', 'Aniak', 'Unalaska', '19:00', '20:00', 60, 90, '16-04-2023', '16-04-2023']
departure ::: Aniak
['23', 'Aniak', 'Unalaska', '17:00', '18:00', 60, 90, '13-04-2023', '13-04-2023']
##### END Project #####

```

Figure III. 5: exemple d'affichage dans le CMD

En cliquant sur le bouton Dataset on peut changer la base de donnée importer une nouvel base à condition qu'elle soit sous forme csv .

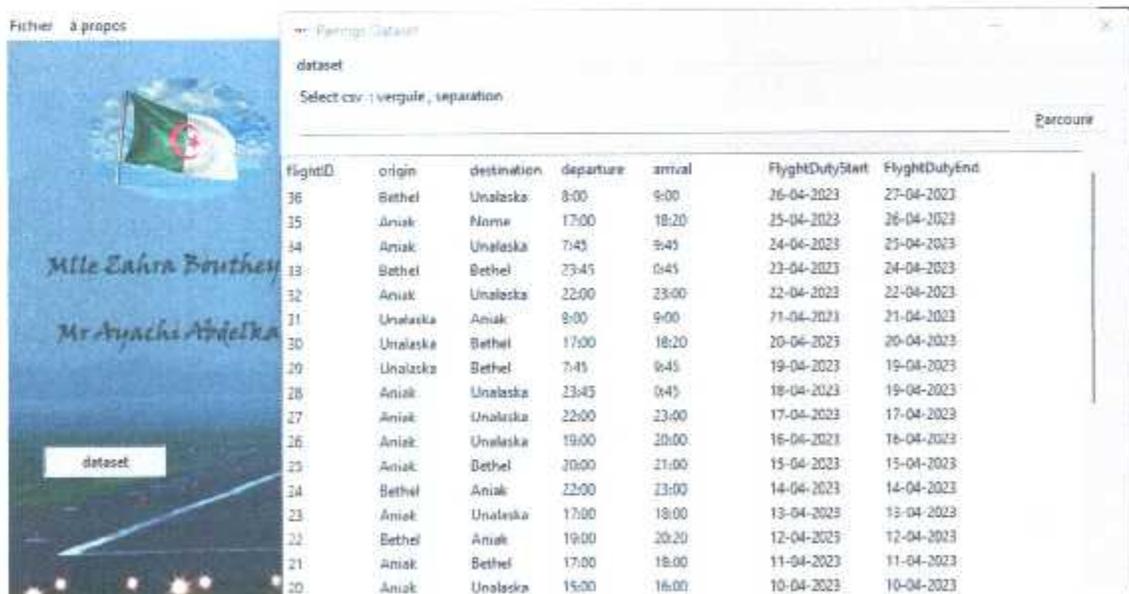


Figure III. 6: base de données importer

### **Conclusion :**

Nous avons plongé en détail dans l'architecture et la conception de l'application développée dans le cadre de ce mémoire de fin d'études. Cette application, conçue pour résoudre la problématique complexe de la gestion du personnel navigant, est le fruit d'une réflexion approfondie et d'un engagement envers l'excellence technique. L'utilisation de Python, un langage puissant et flexible, a permis de garantir des solutions optimales tout en maintenant une performance élevée. . Alors que nous avons fini ce chapitre , nous sommes confiants dans la valeur et le potentiel que cette application apporte à l'industrie aéronautique

## CONCLUSION GENERALE

*L*a gestion judicieuse du personnel navigant est au cœur de la réussite opérationnelle et financière d'une compagnie aérienne. Cette étude met en avant l'importance cruciale de l'optimisation des appariements de l'équipage, une démarche qui, lorsqu'elle est bien exécutée, contribue significativement à minimiser les dépenses opérationnelles tout en maximisant l'efficacité du service. En élaborant des séquences de vols stratégiques qui maximisent les périodes de service et minimisent les temps d'arrêt, nous jetons les bases d'une opération plus rentable pour la compagnie.

L'outil que nous avons conçu est une avancée majeure en ce sens. Capable de générer des "pairings" conformes aux réglementations tout en optimisant l'ordonnancement des vols, cette application fournit à la compagnie aérienne un instrument solide pour répondre à ses impératifs opérationnels, tout en naviguant habilement à travers les défis spécifiques du secteur. Nos échanges détaillés ont renforcé l'importance d'un tel outil pour gérer efficacement les nuances intriquées de la planification de l'équipage, en particulier dans une industrie en quête constante d'excellence opérationnelle.

### **Perspective :**

Toutefois, il est essentiel de préciser que, malgré le potentiel indéniable de notre application, celle-ci n'a pas encore été mise à l'épreuve avec des ensembles de données conséquents issus d'une compagnie aérienne en activité. Néanmoins, grâce à sa modularité et son aptitude à produire des solutions optimales, elle se profile comme un atout de choix pour des déploiements à plus grande échelle.

Pour conclure, ce travail de recherche, conjugué à l'élaboration de notre application, marque un pas significatif vers une gestion plus sophistiquée du personnel navigant. En intégrant minutieusement les contraintes sectorielles et en exploitant des algorithmes d'optimisation de pointe, nous proposons des solutions qui ont le potentiel d'accroître non seulement la rentabilité, mais aussi le bien-être du personnel et, par ricochet, la satisfaction de la clientèle. Dans une industrie aéronautique en constante mutation, des innovations comme la nôtre sont primordiales pour assurer une trajectoire de succès durable.

## **Définitions :**

### **Le temps de vol :**

Est le temps total décompté depuis le moment où l'aéronef commence à se déplacer en vue de décoller jusqu'au moment où il s'immobilise à la fin du vol dans le cas des avions, des motoplaneurs et des aéronefs à sustentation motorisée.

### **Période de vol :**

Est une mesure de temps qui correspond à la répétition d'un cycle complet de mouvement qui commence au moment où un membre d'équipage est tenu de se présenter pour le service, qui comprend un vol ou une série de vols et qui se termine au moment où l'avion s'immobilise et après l'arrêt des moteurs à la fin du dernier vol sur lequel il assure des fonctions de membre d'équipage

Une séquence de vols consécutifs (sans ou avec deadheads) correspondant à une journée de travail pour un membre d'équipage. Deux SDV consécutifs doivent commencer et se terminer dans le même aéroport. Des SDV sont séparés par une escale de nuit

La définition de la période de service de vol est destinée à couvrir une période de service continue qui comprend toujours un vol ou une série de vols pour un membre d'équipage de conduite ou de cabine. Elle est formulée de manière à englober toutes les fonctions qu'un membre d'équipage peut être appelé à exécuter, depuis le moment où il se présente pour le service jusqu'au moment où il termine le vol ou la série de vols, où l'avion s'immobilise en dernier lieu et après l'arrêt des moteurs

Une période de service de vol n'inclut pas le temps de déplacement du domicile au point de prise de service

### **Deadheading :**

Le "Deadheading" se réfère à la situation où un membre du personnel navigant voyageant en tant que passager sur un vol pour être repositionné en vue d'une autre affectation. C'est une pratique courante dans l'industrie aérienne pour optimiser l'utilisation du personnel navigant.

### **Période de repos**

la période de temps pendant laquelle un membre d'équipage est dégagé de tout service par l'exploitant de l'aéronef et peut se reposer de façon ininterrompue à terre, dans un endroit approprié.

### **Home base ou Base d'affectation.**

Lieu désigné par l'exploitant où le membre d'équipage commence et termine normalement une période de service ou une série de périodes de service

**Segment de vol :**

Un segment de vol est une série de vols qui sont réservés ensemble pour former un itinéraire de voyage

Chaque segment de vol est spécifié par cinq caractéristiques :

- Le numéro de vol, l'aéroport d'origine, l'aéroport de destination, l'heure de départ et l'heure d'arrivée

**Temps de briefing :** Une période de temps avant le début de chaque SDV qui est consacré à des instructions et des discussions de l'équipage avec l'objectif de transformer un groupe d'individus en une équipe efficace.

**Temps de débriefing :** Une période de temps à la fin de chaque SDV utilisée par les membres de l'équipage pour faire un rapport sur les événements survenus et leurs implications.

**Escales de nuit (Layover) :** Une période de repos (un arrêt de nuit) entre les SDV qui dure généralement au moins dix heures.

**Pairing ou appariement ou paires :**

Un terme utilisé en documentation et régulation officielle d'aéronautique qui désigne une série de vols qui sont regroupés pour former un horaire de travail ou une période de service pour un membre du personnel navigant ou une équipe. Un jumelage comprend généralement une séquence de vols qui partent et arrivent à différents aéroports, ainsi que toutes les tâches au sol associées, telles que l'enregistrement, la sécurité et l'embarquement. Les jumelages sont conçus pour être efficaces et rentables, les membres d'équipage travaillant généralement sur plusieurs vols pendant leur période de service. Le processus de création d'appariements implique d'équilibrer des facteurs tels que la disponibilité de l'équipage, les horaires de vol et les exigences réglementaires, ainsi que de minimiser les coûts.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Université de Toulouse II- Le MIRAIL U.F.R SCIENCES, ESPACES ET SOCIETES  
Département : MATHEMATIQUES ET INFORMATIQUE Thèse pour obtenir le grade de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TOULOUSE

[2] J. AGARD Automatisation du planning mensuel du personnel navigant commercial

[3] UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL OPTIMISATION INTÉGRÉE DES ROTATIONS ET  
DES BLOCS MENSUELS PERSONNALISÉS DES ÉQUIPAGES EN TRANSPORT  
AÉRIEN ATOOSA JUILLET 2015

[4] Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de maître ès science (M.Sc.)

Décembre 1996 © Arielle LASRY 1996

[5] CONFÉRENCE MONDIALE DE TRANSPORT AÉRIEN (ATCONF) SIXIÈME  
REUNION Montréal, 18 - 22 mars 2013

[6] La théorie des graphes Aimé SACHE . Presses universitaires de France, série "Que sais-je ?"

[7] Introduction à l'algorithmique T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest . Editions Dunod –  
1997.

[8] Annexe 1 de l'OACI.

[9] Annexe 6 à la Convention relative à l'aviation civile internationale

[10] Décret n° 73-36 du 28 février 1973 limitant la durée du travail du personnel navigant  
professionnel dans les entreprises de transport et de travail aériens. (Page 254)

[11] Code de l'aviation civile

Partie réglementaire - Décrets simples

LIVRE IV : PERSONNEL NAVIGANT

TITRE II : PERSONNEL NAVIGANT PROFESSIONNEL