

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

**Département de navigation aérienne**

**Institut d'aéronautique et des études spatiales**



**Spécialité : opération aérienne**

**Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en aéronautique**

**Thème**

**Optimisation de l'exploitation du personnel navigant pour la  
minimisation des couts dans les compagnies aériennes**

**Une approche algorithmique**

**Encadré par :**

Promotrice M<sup>me</sup> BENMEGGOURA Sara

**Présenté par :**

ZENAGUIE Soltana

KARTOUT Djoulia Sara

## Resume

Ce mémoire explore l'application d'un algorithme spécifique pour optimiser l'utilisation du personnel navigant dans les compagnies aériennes, avec pour objectif principal la réduction des coûts opérationnels. En analysant les différentes variables telles que les horaires de vol, les compétences requises et les contraintes réglementaires, cette étude propose une méthodologie visant à maximiser l'efficacité opérationnelle tout en minimisant les dépenses liées à la main-d'œuvre. Les résultats obtenus sont présentés et discutés afin de mettre en lumière les avantages potentiels de cette approche pour l'industrie aéronautique.

Mots clés: Compagnie aérienne, Personnel navigant, Optimisation, Coûts, Algorithme, Efficacité opérationnelle.

## Abstract

This dissertation explores the application of a specific algorithm to optimize the use of cabin l'appareillement de d'équipagein airlines, with the main objective of reducing operational costs. By analyzing different variables such as flight schedules, required skills and regulatory constraints, this study proposes a methodology aimed at maximizing operational efficiency while minimizing labor expenses. The results obtained are presented and discussed in order to highlight the potential advantages of this approach for the aeronautical industry.

Keywords: Airline, Cabin crew, Optimization, Costs, Algorithm, Operational efficiency.

## ملخص

هذه الرسالة تستكشف تطبيق خوارزمية محددة لتحسين استخدام طاقم الطيران في شركات الطيران، بهدف الرئيسي لتقليل التكاليف التشغيلية. من خلال تحليل المتغيرات المختلفة مثل جداول الرحلات والمهارات المطلوبة والقيود التنظيمية، تقدم هذه الدراسة منهجية تهدف إلى تعظيم الكفاءة التشغيلية مع الحد الأدنى من النفقات المتعلقة بالعمالة. يتم عرض ومناقشة النتائج المحصلة لتسليط الضوء على الفوائد المحتملة لهذا النهج لصناعة الطيران

الكلمات المفتاحية شركة الطيران، طاقم الطائرة، التحسين، التكاليف، الخوارزمية، الكفاءة التشغيلية

## Remerciements

**O**n remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

**D**ans la réalisation de ce mémoire ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme BENMEGGOURA SARAH, je la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

**N**otre remerciement s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

## **Dédicace**

Dédié du plus profond du cœur à mon père, le professeur Abdul Rahman, que Dieu ait pitié de lui, et à ma mère, Mohiédine Fatiha, sans qui je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

À mes sœurs Charifa, Wafae et mon frère Morsli

Mon grand-père, Mohiédine Makhloof, que Dieu ait pitié de lui. Ma grand-mère, Cherifa Cherifa, que Dieu la protège ainsi que toute ma famille, mes amies Nesriene, Sara, Ziana, Khadija, Si Saber Maroua et tous mes collègues, Mebarki Aziza, Bouri Hicham, Hamel Nadjibe, Kaddah Mohammed et tous ceux qui m'ont aidé à terminer ce travail.

Et une grande gratitude à mon professeur, Benhaboucha Mohammad ElAmin, et à mon professeur, BenHaboucha Rachida, dont les paroles et les encouragements résonnent en moi.

Enfin, à ma précieuse jument Goldina

Zenagui Soltana

Je tiens à adresser mes remerciements à Papa et mama , maya , Akram , Zizi , Adam , Massai , Sultana , Ilyes , Monsieur Elhertsi , monsieur Amin et madame Samia ,Ilyes Gueraoui.

Kartout djoulia Sara

## Liste des figures

Figure 1:exemple d'horaire de vol.....	18
Figure 2:exemple de jumelage d'équipage.....	24
Figure 3 : schéma de processus d'optimisation .....	36
Figure 4: code de l'algorithme simple pour générer les périodes de services .....	55
Figure 5: résultat de l'algorithme simple.....	56
Figure 6: code de l'algorithme en profondeur (DFS) pour générer les périodes de services.....	59
Figure 7: résultat de l'algorithme DFS .....	60
Figure 8: code de l'algorithme dfs pour générer les pairings .....	63
Figure 9: résultat de l'algorithme DFS pour générer les pairings.....	63
Figure 10: code pour l'algorithme d'optimisation .....	65
Figure 11: résultat d'optimisation .....	66

## LISTE DES ABREVIATIONS

<b>AESA</b>	<b>Agence Européenne de la Sécurité Aérienne</b>
<b>CMS</b>	<b>Content Management System</b>
<b>EASA</b>	<b>European Authority for Aviation Safety</b>
<b>IATA</b>	<b>International Air Transport Association</b>
<b>OACI</b>	<b>Organisation de l'Aviation Civile Internationale</b>
<b>CPP</b>	<b>Crew Pairing Problem</b>
<b>PN</b>	<b>Personnel Navigant</b>
<b>PNC</b>	<b>Personnel Navigant Commercial</b>
<b>PNT</b>	<b>Personnel Navigant Technique</b>
<b>DH</b>	<b>Dead Head</b>
<b>Ps</b>	<b>Période de Service</b>
<b>Pv</b>	<b>Période de Vol</b>
<b>Pvd</b>	<b>Période de vol avec DH</b>
<b>Sv</b>	<b>Segment de Vol</b>
<b>Ta</b>	<b>Temps d'arrêt</b>
<b>Ta+1</b>	<b>Temps d'arrêt suivant</b>
<b>Ta-1</b>	<b>Temp d'arrêt précédent</b>
<b>Tai</b>	<b>Insuffisance de Temps d'arrêt</b>

## Liste des variables

$C_i^v$  : Le coût de chaque vol i

$C_j^{Ps}$  : Le paiement de base pour un droit j

$K_j^{Ps}$  : Nombre de vols en service j

$M_{il}^{Tc}$  : Temps de connexion entre i et l

$M_l^{Tps}$  : Le temps de vol j

$M_j^{Tpv}$  : Le temps de bloc du service j

$Z_{\Sigma K}^{PAIRING}$  : Le nombre de tâches pour k paires

$M_k^{pairing}$  : Temps de service total pour la paire k

$b_{jk}$  : Si le devoir "j" est couvert par l'appariement k,  $b_{jk}=1$  ; sinon  $b_{jk} = 0$

$b_{qk}$  : Si le devoir "q" est couvert par l'appariement k,  $b_{qk}=1$  ; sinon  $b_{qk} = 0$

$h_{jq}$  : Si le devoir j suit le devoir q,  $h_{jq} = 1$  ; sinon  $h_{jq} = 0$

$M_{jq}^{pr}$  : Temps de service total pour la paire k

$M_j^{tft}$  : La durée totale du service j

$c_{jq}^{Tr}$  : Le coût du temps de repos entre deux tâches consécutives, j et q

$h_{jq}$  : Si le devoir j suit le devoir q,  $h_{jq} = 1$  ; sinon  $h_{jq} = 0$

$a_{ij}$  : Si le vol i est couvert par le devoir j,  $a_{ij} = 1$  ; sinon  $a_{ij} = 0$

$a_{lj}$  : Si le vol l est couvert par le devoir j,  $a_{lj} = 1$  ; sinon  $a_{lj} = 0$

$u_{il}$  : Si le vol  $i$  suis le vol  $l$ ,  $u_{il} = 1$  ; sinon  $u_{il} = 0$

$c_{il}^{Tc}$  : Le coût du temps de correspondance entre deux vols consécutifs,  
 $i$  et  $l$

$M_j^{Tps}$  : Temps total de Ps

$M_j^{Tpv}$  : Le temps de bloc du service  $j$

Briefing : 30 min

Débriefing : 60 min



# Table des matières

<b>RESUME</b> .....	2
<b>Remerciements</b> .....	3
<b>Dédicace</b> .....	4
<b>Liste des figures</b> .....	5
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	6
<b>Liste des variables</b> .....	7
<b>Table des matières</b> .....	1
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LE PROBLÈME DE L'APPAREILLEMENT DE L'ÉQUIPAGE ...</b>	<b>2</b>
I.1 Introduction .....	2
I.2 Définitions .....	2
I.3 Généralités sur l'appareillement de d'équipage.....	4
I.3.1 Pour améliorer le processus de l'appareillement de d'équipage, quelques suggestions .....	5
I.3.2 La gestion efficace du l'appareillement de d'équipage implique plusieurs étapes et pratiques clés .....	7
I.3.3 Rôles et rentabilités .....	8
I.3.4 travail vie personnelle .....	9
I.3.5 L'optimisation du l'appareillement de d'équipage a une influence significative sur le personnel navigant, qui peut être à la fois positive et négative .....	10
I.3.6 L'optimisation du l'appareillement de d'équipage peut avoir un impact significatif sur la minimisation des coûts et l'augmentation des revenus d'une compagnie aérienne de plusieurs façons .....	11
I.3.7 Pour approfondir, quelques points supplémentaires sur l'impact de l'optimisation du l'appareillement de d'équipage sur les coûts et les revenus des compagnies aériennes .....	12
I.4 Gestion des redevances et dépenses d'une compagnie aérienne.....	13
I.5 Problème l'appareillement de d'équipage aérien (CPP) (crew pairing problem) .....	17
I.6 Détermination du modèle mathématique .....	18
I.7 Points clés concernant le CPP .....	19
I.7.1 Complexité et méthodologie de résolution .....	19
I.7.2 Fondements du l'appareillement de d'équipage.....	20
I.7.3 Formulation du Problème .....	20
I.7.4 Caractéristiques du CPP .....	20
I.7.5 Algorithmes d'Optimisation .....	21
I.7.6 Méthodes de Résolution .....	21
I.7.7 Contraintes et Règles .....	21

1.7.8 Objectif .....	22
1.7.9 Complexité .....	22
1.8 Les termes liés au (l'appariement de d'équipage).....	22
1.8.1 Quelques éléments clés concernant le CPP .....	24
1.8.1.1 Définition du CPP : .....	24
1.8.1.2 Complexité computationnelle :.....	24
1.8.1.3 Méthodologie de résolution : .....	25
1.8.1.4 Contraintes : .....	25
<b>CHAPITRE 2 : MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ET RÉOLUTION ALGORITHMIQUE DU</b>	
<b>PROBLÈME .....</b>	<b>27</b>
II.1 Introduction .....	27
II.2 Modélisation du problème .....	27
II.3 Paramètres de calcul .....	30
II.3.1 Fonction objectif (Coûts des pairing).....	30
II.3.2 Contraintes .....	30
II. 4 Processus d'optimisation .....	33
II.4.1 Algorithme utilisé pour la résolution du problème.....	34
II.4.1.1 La Recherche en Profondeur (DFS).....	35
II.4.1.2 Fonctionnement de DFS.....	35
II.4.2 Structure de données : .....	36
II.4.3 Avantages de DFS.....	38
II.4.4 Complexité de DFS .....	38
II.5 Applications du parcours en profondeur .....	40
II.5.1 Recherche des composantes connexes .....	40
II.5.2 Recherche de circuits .....	41
II.6 Amélioration de l'Algorithme DFS.....	42
II.6.1 Techniques d'Amélioration .....	42
II.6.2 Adaptation au Contexte Aérien .....	42
II.6.3 Résultats et Performances .....	42
II.7 Étude de Cas .....	43
II.7.1 Contexte de l'Étude .....	43
II.7.2 Méthodologie.....	43
II.7.3 Résultats .....	43
II.8 Conclusion.....	43
<b>CHAPITRE III : RÉSULTAT ET DISCUSSION.....</b>	<b>85</b>
III.1 Introduction .....	85
III.2 considérations.....	85

III.2.1 Construction des périodes de service .....	86
III.3 Langage de programmation .....	86
III.4 étape 1 : Approches proposées pour la génération des périodes de services .....	87
III.4.1 Approche basée sur un Algorithme simple .....	87
III.4.1.1 Algorithme en pseudocode .....	87
III.4.1.2. Explication des étapes en pseudo-code :.....	854
III.4.2 Approche basé sur l'utilisation de l'algorithme DFS .....	89
III.4.2.1 Initialisation.....	89
III.4.2.2 Fonction Récursive DFS : .....	90
III.4.2.3 Condition de Terminaison : .....	90
III.4.2.4 Récursion : .....	90
III.4.2.5 Retour des Périodes de Service : .....	91
III.4.2.8 Psudocode: .....	91
III.4.3 Etape 2 : Application de l'algorithme DFS pour Générer les pairings légaux.....	92
III.4.3.1 Algorithme en pseudocode .....	93
III.4.4 Application de l'algorithme DFS pour la sélection des meilleurs pairing .....	94
III.4.4.1 Fonction find_best pairings (pairings, count).....	94
III.5 Conclusion .....	95
<b>Conclusion Générale</b> .....	<b>96</b>
<b>Perspective</b> .....	<b>97</b>
<b>REFERENCE</b> .....	<b>98</b>



# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction**

Dans un contexte économique où la concurrence dans le secteur aérien est en augmentation continue, les compagnies aériennes sont constamment à la recherche de stratégies pour optimiser leurs opérations et réduire leurs coûts. L'un des leviers les plus significatifs pour atteindre cet objectif est l'optimisation de l'exploitation des personnels navigants, qui représente une part importante des dépenses opérationnelles d'une compagnie.

## **Objectifs du Mémoire**

L'objectif de ce mémoire est de construire une séquence d'étape de vol pour un nombre d'équipages non défini (l'appariement de d'équipage) cette séquence doit se commencer et se terminer au même home base (A) et elle doit couvrir tous les vols de calendrier le meilleur est celui qui a un coût minimal et qui couvre tous les vols de calendrier

Ce mémoire vise à explorer les différentes méthodes et modèles d'optimisation de l'appariement de d'équipage, En analysant les différentes variables telles que les horaires de vol, les compétences requises et les contraintes réglementaires, pour optimiser l'utilisation du personnel navigant dans les compagnies aériennes, tout en assurant la réduction des coûts opérationnels.

Pour traiter cette problématique ce mémoire est divisé en (03) chapitres qui sont :

Chapitre 1 : Généralité et description du appariement d'équipage et l'importance de l'optimisation des coûts pour les compagnies aériennes.

Chapitre 2 : une modélisation et conception d'un modèle pour représenter le problème d'appariement d'équipages et les algorithmes d'optimisation utilisés pour résoudre le problème en particulier le DFS.

Chapitre 3 : l'application des algorithmes et les résultats obtenus

## **Chapitre I : Généralité sur le problème de l'appareillement de l'équipage**

### **I.1 Introduction**

Les compagnies aériennes doivent respecter les règles établies par les autorités de l'aviation civile concernant les temps de service des équipages de conduite et des personnels navigants commerciaux, pour garantir la sécurité des vols. Dans ce contexte on se trouve devant le problème de l'appareillement de l'équipage qui un processus complexe qui vise à équilibrer les besoins opérationnels de la compagnie aérienne tout en garantissant la sécurité et le bien-être des membres d'équipage.

Ce chapitre présente des généralités et des notions de base qui explique le problème de l'appareillement de l'équipage et son influence sur la rentabilité d'une compagnie aérienne

### **I.2 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 motos planeurs et des aéronefs à sustentation motorisé.

#### **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 deadhead) 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

### **Le Temps mort (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.

### **Appariement ou pairing :**

Un terme utilisé en documentation et régulation officiel 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 l'appareillement 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.

## **I.3 Généralités sur l'appareillement de d'équipage**

Dans le domaine de l'aviation commerciale, l'appareillement de d'équipage est un aspect crucial de la planification opérationnelle des compagnies aériennes. Voici quelques points supplémentaires à considérer :

**1. Optimisation des ressources :** L'appareillement de d'équipage vise à maximiser l'efficacité opérationnelle en assignant les équipages de manière à couvrir le plus grand nombre possible de vols tout en respectant les règles de sécurité et les contraintes réglementaires [1]



**2. Complexité croissante** : Avec la croissance du nombre de destinations des services par les compagnies aériennes et l'augmentation de la diversité des types d'avions, le processus de l'appareillement de l'équipage est devenu de plus en plus complexe. Les logiciels spécialisés sont indispensables pour gérer cette complexité [1]

**3. Gestion de la fatigue** : Assurer que les membres d'équipage bénéficient de périodes de repos adéquates est essentiel pour prévenir la fatigue, qui est un facteur critique dans la sécurité des opérations aériennes. L'appareillement de l'équipage doit donc tenir compte des exigences réglementaires en matière de repos [1]

**4. Équité et satisfaction des équipages** : Les compagnies aériennes cherchent également à équilibrer les affectations entre les membres d'équipage pour garantir une répartition équitable des vols et répondre aux préférences individuelles dans la mesure du possible, ce qui peut contribuer à la satisfaction et à la rétention du personnel [1]

**5. Adaptabilité** : L'appareillement de l'équipage doit être suffisamment flexible pour s'adapter aux changements de dernière minute, tels que les annulations de vol, les retards ou les besoins imprévus en personnel, tout en minimisant les perturbations pour les passagers et les membres d'équipage [1]

En résumé, l'appareillement de l'équipage est un processus essentiel pour garantir le bon fonctionnement des opérations aériennes, en équilibrant les impératifs opérationnels avec les exigences de sécurité, de réglementation et de bien-être du personnel [1]

### **I.3.1 Pour améliorer le processus de l'appareillement de l'équipage, quelques suggestions**

**1. Utilisation de technologies avancées** : Investir dans des logiciels de planification et d'optimisation de pointe qui peut prendre en compte une multitude de variables pour créer des paires d'équipages efficaces tout en respectant les réglementations et les préférences individuelles [1]

**2. Analyse des données** : Collecter et analyser des données historiques sur les opérations, les performances des équipages et les préférences du personnel pour améliorer la précision des prévisions et des allocations [1]

**3. Modèles de prévision avancés** : Développer des modèles de prévision avancés pour anticiper les besoins en personnel en fonction de facteurs tels que les saisons, les événements spéciaux, les tendances de réservation et les conditions météorologiques [1]

**4. Formation continue du personnel** : Offrir une formation continue aux planificateurs de l'appareillement de d'équipage pour qu'ils puissent mieux comprendre les nuances opérationnelles et réglementaires et utiliser efficacement les outils disponibles [1]

**5. Communication transparente** : Établir des canaux de communication transparents entre les départements opérationnels, le personnel de vol et les équipes de planification pour faciliter la résolution rapide des problèmes et des changements de dernière minute [1]

**6. Prise en compte des retours d'expérience** : Collecter les retours d'expérience des membres d'équipage et des planificateurs pour identifier les points d'amélioration potentiels et ajuster continuellement les processus en conséquence [1]

**7. Équilibre entre efficacité opérationnelle et bien-être du personnel** : Trouver un équilibre entre la maximisation de l'efficacité opérationnelle et le respect du bien-être et de la satisfaction des membres d'équipage, en tenant compte de facteurs tels que la fatigue, les préférences individuelles et la qualité de vie au travail[1]

En intégrant ces stratégies, les compagnies aériennes peuvent améliorer la planification du l'appareillement de d'équipage, ce qui peut conduire à une meilleure satisfaction du personnel, à des opérations plus fluides et à une plus grande efficacité globale [1]

### **I.3.2 La gestion efficace du l'appareillement de d'équipage implique plusieurs étapes et pratiques clés**

**1. Définition des objectifs :** Définir clairement les objectifs de la planification du l'appareillement de d'équipage, tels que maximiser l'efficacité opérationnelle, respecter les réglementations en matière de repos des équipages, répondre aux préférences du personnel, et maintenir la sécurité des vols [1]

**2. Utilisation d'outils spécialisés :** Investir dans des logiciels de planification du l'appareillement de d'équipage avancés qui permettent d'optimiser l'allocation des équipages en tenant compte de multiples contraintes et préférences[1]

**3. Affectation proactive :** Planifier les affectations d'équipage suffisamment à l'avance pour permettre une gestion efficace des ressources et pour donner aux équipages le temps nécessaire pour se préparer [1]

**4. Flexibilité :** Être prêt à ajuster les affectations en fonction des changements opérationnels, des besoins de l'entreprise et des préférences des équipages, tout en minimisant les perturbations autant que possible [1]

**5. Communication transparente :** Assurer une communication transparente entre les départements opérationnels, les équipes de planification du l'appareillement de d'équipage et le personnel navigant pour faciliter la coordination et résoudre rapidement les problèmes [1]

**6. Gestion de la fatigue :** Mettre en place des politiques et des procédures visant à gérer la fatigue des équipages, en respectant les limites réglementaires en matière de temps de service et de repos, et en encourageant une culture de sécurité qui met l'accent sur le repos et la récupération[1]

**7. Analyse et optimisation continue :** Analyser régulièrement les données opérationnelles et les performances des équipages pour identifier les opportunités d'amélioration et ajuster les processus de planification en conséquence [1]

**8. Formation du personnel :** Former régulièrement le personnel de planification du l'appareillement de d'équipage pour qu'il puisse utiliser efficacement les outils et

les meilleures pratiques de planification, ainsi que pour se tenir au courant des évolutions réglementaires et opérationnelles [1]

En mettant en œuvre ces pratiques de gestion du l'appareillement de d'équipage, les compagnies aériennes peuvent optimiser l'utilisation de leurs ressources humaines, améliorer la satisfaction du personnel et maintenir des opérations sûres et efficaces [1]

### I.3.3 Rôles et rentabilités

Dans l'industrie aérienne, le personnel navigant est essentiel au bon déroulement des opérations aériennes et se divise en deux catégories principales : le Personnel Navigant Technique (PNT) et le Personnel Navigant Commercial (PNC). Voici une définition claire de leurs rôles et responsabilités :

Personnel Navigant Technique (PNT) :

**Rôles** : Le PNT comprend les pilotes qui sont responsables de la conduite de l'avion. Ils préparent le plan de vol, vérifient les systèmes de l'avion, assurent la navigation et la communication avec le contrôle aérien.

**Responsabilités** : Ils doivent s'assurer que toutes les procédures de sécurité sont suivies et sont chargés de prendre des décisions cruciales en cas d'urgence pour garantir la sécurité des passagers et de l'équipage [2]

Personnel Navigant Commercial (PNC) :

**Rôles** : Le PNC inclut les hôtesses de l'air et les stewards qui assurent la sécurité et le confort des passagers pendant le vol.

**Responsabilités** : Ils veillent au respect des règles de sécurité en cabine, présentent les équipements de sécurité aux passagers, et interviennent en cas d'incident ou d'accident. De plus, ils ont une mission commerciale, veillant à la qualité du service rendu, accueillant les passagers et s'occupant du service à bord [2]

Les personnels navigants, tels que les pilotes et les membres d'équipage de cabine, font face à des défis spécifiques :

1. Charge de Travail Élevée : Les personnels navigants travaillent souvent dans des conditions exigeantes, avec des horaires irréguliers et des vols long-courriers. La fatigue et le stress peuvent affecter leur performance et leur bien-être

2. Stress et Conflits : Les interactions avec les passagers, les retards, les problèmes techniques et les situations d'urgence peuvent générer du stress. Les personnels navigants doivent gérer ces situations avec professionnalisme et calme

3. Risques pour la Santé : Les rayonnements solaires et cosmiques, la contamination de l'air des cabines et les horaires décalés exposent les personnels navigants à des risques pour leur santé. Des études ont montré que ces facteurs peuvent avoir des effets néfastes à long terme [2]

### **I.3.4 travail vie personnelle**

L'équilibre entre la vie professionnelle et la vie privée est un aspect crucial pour le personnel navigant, qui inclut les pilotes et le personnel de cabine. Voici quelques points clés sur l'importance de cet équilibre et son impact sur la planification des équipages :

**Prévention de l'Épuisement Professionnel** : Un équilibre sain aide à prévenir l'épuisement professionnel, un risque particulièrement élevé dans les métiers exigeants comme ceux du personnel navigant [2]

**Bien-Être et Productivité** : Un bon équilibre travail-vie personnelle favorise le bien-être général et permet un travail plus concentré et productif pendant les heures de travail [2]

**Croissance Personnelle** : Il offre des opportunités de croissance personnelle et de soins personnels, contribuant ainsi à l'épanouissement général de la vie [2]

**Planification des Équipages** : La planification des équipages doit tenir compte des besoins individuels pour maintenir cet équilibre. Cela peut inclure la gestion des horaires atypiques et irréguliers, et la prise en compte des temps de repos suffisants entre les vols [2]

**Horaires Flexibles** : Des horaires flexibles peuvent aider le personnel navigant à mieux gérer leurs obligations familiales et personnelles, réduisant ainsi le stress et augmentant la satisfaction au travail.

**Impact sur la Satisfaction et la Rétention du Personnel** : Un équilibre travail-vie personnelle bien géré peut améliorer la satisfaction et la fidélisation du personnel, ce qui est bénéfique pour la compagnie aérienne à long terme.

En résumé, l'équilibre travail-vie personnelle est essentiel pour le personnel navigant en raison des horaires irréguliers et des exigences du métier. Une planification efficace des équipages qui prend en compte cet équilibre peut conduire à une meilleure performance, une plus grande satisfaction au travail et une réduction du turnover du personnel [2]

### **1.3.5 L'optimisation du l'appareillement de d'équipage a une influence significative sur le personnel navigant, qui peut être à la fois positive et négative**

**1. Satisfaction et bien-être** : Une planification efficace du l'appareillement de d'équipage peut contribuer à améliorer la satisfaction et le bien-être du personnel navigant en tenant compte de leurs préférences individuelles, telles que les jours de congé préférés, les préférences d'itinéraire et les besoins en repos. Cela peut conduire à une meilleure qualité de vie au travail et à une réduction du stress lié à la planification irrégulière ou imprévisible [3]

**2. Prévention de la fatigue** : Une gestion appropriée des temps de repos et des heures de service grâce à une planification du l'appareillement de d'équipage optimisée peut contribuer à prévenir la fatigue chez le personnel navigant, ce qui est crucial pour assurer la sécurité des vols et le bien-être des équipages

**3. Réduction de l'incertitude** : Une planification du l'appareillement de d'équipage cohérente et prévisible peut réduire l'incertitude et l'anxiété du personnel navigant concernant leurs affectations futures, ce qui peut favoriser un environnement de travail plus stable et plus positif [3]

**5. Opportunités de développement professionnel :** Une planification du l'appareillement de d'équipage efficace peut offrir aux membres d'équipage des opportunités de développement professionnel en leur permettant d'acquérir de l'expérience sur différents types d'avions, itinéraires et horaires, ce qui peut enrichir leur parcours professionnel et leurs compétences [3]

**6. Rétention du personnel :** En répondant aux besoins et aux préférences du personnel navigant, l'optimisation du l'appareillement de d'équipage peut contribuer à améliorer la rétention du personnel en réduisant le taux de rotation et en favorisant un environnement de travail positif et satisfaisant [3]

Cependant, une mauvaise planification du l'appareillement de d'équipage peut également avoir des effets négatifs sur le personnel navigant, tels que l'augmentation de la fatigue, du stress et de l'insatisfaction, ce qui peut compromettre la sécurité des vols et entraîner une baisse de la performance et de la productivité. Par conséquent, il est essentiel que les compagnies aériennes tiennent compte des besoins et des préoccupations du personnel navigant lors de l'optimisation de leurs processus de planification du l'appareillement de d'équipage [3]

### **1.3.6 L'optimisation du l'appareillement de d'équipage peut avoir un impact significatif sur la minimisation des coûts et l'augmentation des revenus d'une compagnie aérienne de plusieurs façons**

**1. Minimisation des coûts de main-d'œuvre :** En optimisant l'allocation des équipages, les compagnies aériennes peuvent réduire les coûts liés aux heures supplémentaires et aux ressources excédentaires, tout en maximisant l'utilisation des équipages disponibles [4]

**2. Réduction des coûts opérationnels :** Une meilleure planification du l'appareillement de d'équipage peut contribuer à réduire les coûts opérationnels liés aux retards, aux annulations de vols et aux modifications de dernière minute en assurant une couverture adéquate des vols avec un minimum de perturbations [4]

**3. Optimisation de la productivité** : En assignant les équipages de manière plus efficace, les compagnies aériennes peuvent augmenter la productivité de leur personnel navigant [4]

**4. Amélioration de la satisfaction client** : Une meilleure planification du l'appareillement de d'équipage peut permettre d'offrir des services plus fiables et ponctuels aux passagers, ce qui peut se traduire par une augmentation de la fidélité client et des revenus générés par les ventes de billets et les services auxiliaires

**5. Réduction des pénalités réglementaires** : En respectant les réglementations en matière de temps de service et de repos des équipages, les compagnies aériennes peuvent éviter les pénalités réglementaires et les amendes associées, ce qui contribue à réduire les coûts globaux d'exploitation

**6. Optimisation des revenus** : Une planification efficace du l'appareillement de d'équipage peut également permettre d'exploiter pleinement les opportunités de revenus en optimisant les horaires de vol pour maximiser les taux de remplissage des avions et en offrant des services supplémentaires aux passagers

En combinant une planification stratégique du l'appareillement de d'équipage avec d'autres initiatives visant à améliorer l'efficacité opérationnelle et à maximiser les revenus, les compagnies aériennes peuvent réaliser des économies significatives et renforcer leur compétitivité sur le marché [4]

### **I.3.7 Pour approfondir, quelques points supplémentaires sur l'impact de l'optimisation du l'appareillement de d'équipage sur les coûts et les revenus des compagnies aériennes**

**1. Économies de carburant** : Une planification efficace du l'appareillement de d'équipage peut contribuer à réduire la consommation de carburant en minimisant les vols vides ou les déplacements inutiles des équipages, ce qui permet des économies supplémentaires sur les coûts d'exploitation

**2. Réduction des frais de formation** : En optimisant l'utilisation des équipages, les compagnies aériennes peuvent réduire les coûts associés à la formation et à la



certification de nouveaux membres d'équipage, car elles auront besoin de moins de personnel pour couvrir les mêmes vols

**3. Amélioration de l'efficacité des opérations au sol :** Une meilleure planification du l'appareillement de d'équipage peut également avoir un impact positif sur les opérations au sol, en permettant une meilleure coordination entre les équipages et les équipes au sol, ce qui peut réduire les temps d'attente et les coûts associés

**4. Analyse des données pour l'optimisation continue :** Les compagnies aériennes peuvent utiliser les données générées par la planification du l'appareillement de d'équipage pour identifier les tendances, les opportunités d'amélioration et les domaines où des économies supplémentaires peuvent être réalisées, ce qui permet une optimisation continue des processus

**5. Gestion proactive des imprévus :** Une planification efficace du l'appareillement de d'équipage peut aider les compagnies aériennes à mieux gérer les imprévus tels que les conditions météorologiques défavorables, les pannes d'avions ou les changements de dernière minute dans les horaires de vol, ce qui peut réduire les coûts associés à ces événements

En intégrant ces aspects dans leur stratégie globale de gestion des opérations, les compagnies aériennes peuvent améliorer leur rentabilité et leur compétitivité sur le marché, tout en offrant des services de qualité et en maintenant des normes élevées de sécurité et de satisfaction client [4]

### **I.4 Gestion des redevances et dépenses d'une compagnie aérienne**

La gestion des redevances et des dépenses pour une compagnie aérienne peut être réalisée de plusieurs manières. Voici quelques étapes générales :

#### **1. Suivi des redevances :**

- Identifier les différentes redevances liées à l'exploitation aérienne telles que les frais d'atterrissage, les frais de navigation, les frais de stationnement, etc.

- Établir un système de suivi pour enregistrer ces redevances de manière précise, en attribuant des codes ou des catégories pour chaque type de redevance.

- Automatiser autant que possible ce processus pour réduire les erreurs humaines et améliorer l'efficacité. [5]

## **2. Suivi des dépenses :**

- Catégoriser les dépenses en fonction de leur nature, comme les dépenses opérationnelles (carburant, entretien des avions, équipage), les dépenses administratives, les dépenses marketing, etc.

- Mettre en place des procédures pour que toutes les dépenses soient d'abord approuvées avant d'être engagées.

- Utiliser des logiciels de comptabilité ou des systèmes de gestion financière pour enregistrer et suivre toutes les dépenses de manière détaillée [5]

## **3. Contrôle des coûts :**

- Examiner régulièrement les dépenses pour identifier les domaines où des économies peuvent être réalisées sans compromettre la sécurité ou la qualité des services.

- Négocier avec les fournisseurs pour obtenir des tarifs préférentiels ou des remises sur les redevances et les fournitures [5]

## **4. Analyse financière :**

- Élaborer des rapports financiers réguliers pour évaluer la performance financière de la compagnie aérienne, en incluant des analyses des coûts par segment d'activité.

- Comparer les performances actuelles avec les objectifs fixés et identifier les écarts à corriger [5]

## **5. Gestion des flux de trésorerie :**

- Surveiller de près les flux de trésorerie pour s'assurer que la compagnie dispose des liquidités nécessaires pour couvrir ses obligations financières à court terme.

- Mettre en place des politiques de gestion des liquidités pour optimiser l'utilisation des fonds disponibles [5]

## **6. Conformité réglementaire :**

- Veiller à ce que toutes les redevances et dépenses soient en conformité avec les réglementations en vigueur dans les juridictions où la compagnie opère.

En mettant en œuvre ces pratiques de gestion, une compagnie aérienne peut améliorer sa rentabilité et sa viabilité financière tout en assurant une exploitation efficace et conforme aux normes [5]

## **Informations supplémentaires sur la gestion des redevances et des dépenses pour une compagnie aérienne**

### **1. Redevances aéroportuaires :**

- Les redevances aéroportuaires sont des frais que les compagnies aériennes paient pour utiliser les infrastructures aéroportuaires telles que les pistes, les aérogares et les services de manutention des bagages.

- Ces redevances peuvent varier en fonction de la taille de l'avion, du temps passé sur le terrain et de la politique tarifaire de chaque aéroport [5]

### **2. Redevances de navigation :**

- Les redevances de navigation sont des frais associés à l'utilisation de l'espace aérien contrôlé, y compris les frais de navigation aérienne et les frais de services de contrôle du trafic aérien.

- Ces redevances sont généralement basées sur la distance parcourue et le poids de l'aéronef [5]

### **3. Redevances de stationnement :**

- Les redevances de stationnement sont des frais pour le stationnement des avions sur les aires de stationnement des aéroports.

- Ces frais peuvent être calculés en fonction du temps passé sur le terrain ou de la taille de l'avion [5]

### **4. Dépenses opérationnelles :**

- Les dépenses opérationnelles comprennent les coûts liés à l'exploitation quotidienne de la compagnie aérienne, tels que le carburant, l'entretien des avions, les salaires de l'équipage, les frais de location d'équipements, etc.

- Ces dépenses représentent une part importante des coûts totaux d'une compagnie aérienne et nécessitent une gestion rigoureuse pour maintenir la rentabilité [5]

### **5. Dépenses administratives :**

- Les dépenses administratives englobent les coûts associés à la gestion générale de l'entreprise, y compris les salaires du personnel administratif, les frais de bureau, les frais juridiques et comptables, etc [5]

### **6. Dépenses marketing :**

- Les dépenses marketing sont liées aux activités de promotion et de marketing de la compagnie aérienne, telles que la publicité, les campagnes de marketing en ligne, les promotions spéciales, etc.

- Ces dépenses visent à attirer de nouveaux clients et à fidéliser les clients existants.

En surveillant attentivement ces types de redevances et de dépenses, une compagnie aérienne peut optimiser ses coûts et améliorer sa rentabilité tout en maintenant des normes élevées de sécurité et de qualité de service [5]

## **I.5 Problème l'appariement de d'équipage aérien (CPP) (crew pairing problem)**

Le problème de couplage d'équipage (crew pairing Problem, CPP) dans les compagnies aériennes est un défi majeur de l'optimisation. Son objectif est de trouver un ensemble de séquences de vols (appelées appariements d'équipage) qui couvrent tous les vols dans l'horizon de planification d'une compagnie aérienne, tout en minimisant les coûts d'équipage. Étant donné que les coûts d'équipage sont la deuxième plus grande dépense opérationnelle directe après les coûts de carburant, la résolution efficace du CPP est essentielle pour les compagnies aériennes [1].

Les objectifs de L'appariement de d'équipage (CPP) sont de minimiser les coûts en respectant tous les critères légaux (temps de service de l'équipage et périodes de repos), en couvrant tous les vols du programme de vol et en garantissant une utilisation optimale de toutes les ressources pour produire des solutions de haute qualité .

Le pairage d'équipage désigne une série de vols, à savoir des allers-retours, commençant et se terminant à la base d'attache. L'appariement des équipages est également la phase déterminante des coûts de la planification des équipages. Pour les avions de ligne, l'optimisation du couplage des équipages dans la planification des vols est vitale puisque ce processus est utilisé pour minimiser les coûts opérationnels de l'équipage tout en maximisant l'utilisation efficace de l'équipage. Un couple d'équipage acceptable doit répondre aux restrictions légales de la SHGM (Direction générale de l'aviation civile), aux règles de la FAA (Federal Aviation Administration) et aux restrictions spéciales fixées par les compagnies aériennes. Compte tenu de ces restrictions et règles, l'objectif principal de l'optimisation est de déterminer le couple d'équipage le plus rentable comprenant tous les vols du programme de vol.

Les limites à respecter pour garantir la légalité d'un service ou d'un équipage sont composées de la période de repos, du temps de correspondance, du temps de vol et du temps de service. Les temps de connexion pour une période de service doivent se situer dans une certaine plage (minimum et maximum). Le temps de vol total faisant référence au temps passé au cours d'une période de service, le temps bloc faisant référence aux temps de vol au cours d'un service et le nombre de segments de vol ne

doivent pas dépasser la plage donnée. Un certain temps est également prévu pour le briefing avant chaque période de service et le débriefing à la fin de chaque période de service. L'horizon de planification de quatre jours comprend 41 vols (figure 1 pour un horaire de vol). Cette figure montre les tâches et les appariements générés par ces vols. Chaque paire se compose de quatre tâches comme sur cette figure.

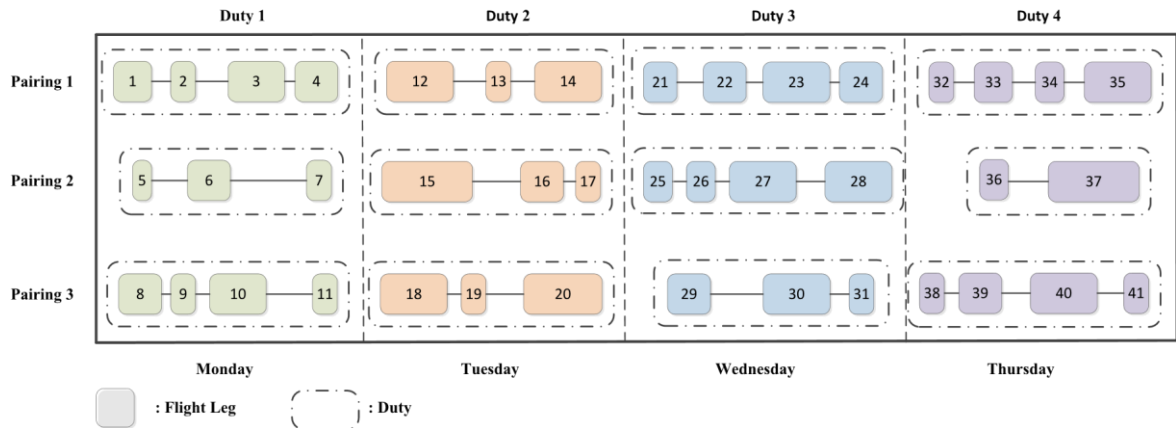


Figure 1: exemple d'horaire de vol

## I.6 Détermination du modèle mathématique

La planification des équipages des compagnies aériennes peut être modélisée comme un problème de couverture d'ensemble (SC) ou un problème de partitionnement d'ensemble (SP) dans la littérature. Il est prouvé que les deux sont NP-complets.

Chaque vol doit être couvert par au moins un binôme d'équipage. De plus, les solutions au problème dans le modèle SP peuvent être impossibles, alors qu'une solution réalisable pourrait être trouvée dans le modèle SC. Le problème de couverture d'ensemble pour les problèmes d'appariement d'équipage peut être défini comme suit :

### Set de couverture pour l'appariement des équipages

$$\text{Min}(z) = \sum_{j=1}^p C_j X_j \quad [1]$$

$$\sum_{j=1}^p a_{ij} * X_j \geq 1 \quad \forall i \in F$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in p \quad (2)$$

$X_j = \begin{cases} 1 & \text{si l'appariement } j \text{ est sélectionné ;} \\ 0 & \text{sinon ;} \end{cases}$

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'étape de vol } i \text{ est couverte par l'appariement } j ; \\ 0 & \text{sinon ;} \end{cases}$

Éq. [1] montre la fonction objective pour calculer le coût total.

Éq. (2), indique la contrainte qui garantit que tous les vols (lignes) sont couverts au moins une fois. Si cette équation est égale à ( $= 1$ ), alors elle devient un modèle SP. De plus, lorsque l'équation. (2) a une valeur supérieure à ( $> 1$ ) pour tout vol, ceci indique que le vol est deadhead vol.

F= Ensemble de tous les vols

P= Ensemble de tous les appariements

Rh=duré de vol de la liste (mensuelle)

Oh=durée de vol optimale

## I.7 Points clés concernant le CPP

### I.7.1 Complexité et méthodologie de résolution

- Le CPP est un problème NP-difficile, ce qui signifie qu'il est difficile à résoudre de manière exacte pour de grandes instances.

- Lorsque l'échelle et la complexité du CPP sont raisonnables, les métaheuristiques sont utilisés, principalement les algorithmes génétiques (GAs). Cependant, les GAs ont leurs limites en termes de taille d'instance traitable.

- Pour des instances plus grandes, des techniques de programmation linéaire en nombres entiers basées sur la génération de colonnes (CG) sont utilisées [1]

### **I.7.2 Fondements du l'appareillement de d'équipage**

- Un appareillement de l'équipage (pairing) est une séquence de vols connectables au sein de la même flotte, commençant et se terminant à la même base d'équipage (où l'équipage réside). Les pairages durent généralement d'un à cinq jours.

- L'objectif est de générer un ensemble de pairages couvrant autant de vols que possible sur une période de planification, tout en minimisant les coûts.

- Les pairages légaux doivent satisfaire diverses contraintes, notamment les règles syndicales, les réglementations gouvernementales et les accords contractuels [6]

### **I.7.3 Formulation du Problème**

- Le CPP peut être modélisé comme un problème de programmation linéaire binaire (BLP), en considérant tous les sous-ensembles de vols dans la période de planification. Cependant, le nombre de variables de décision peut devenir intensif en calcul.

- Les méthodes pratiques consistent à résoudre le problème de manière séquentielle en deux phases :

- **\*\*Phase 1\*\*** : Générer autant de pairages légaux que possible.

- **\*\*Phase 2\*\*** : Sélectionner le meilleur sous-ensemble de pairages avec le coût le plus faible.

- Les contraintes incluent les définitions de l'appareillement de l'équipage, les réglementations de la sécurité et les règles spécifiques à l'entreprise

### **I.7.4 Caractéristiques du CPP**

- Les pairages d'équipage peuvent être quotidiens, hebdomadaires ou datés.

- La version la plus courante est le problème quotidien.

- Le problème suppose un horaire de vol fixe pour chaque jour



### **I.7.5 Algorithmes d'Optimisation**

- Les chercheurs ont développé divers algorithmes pour résoudre efficacement le CPP :

- Approche de Relaxation : Créer une nouvelle combinaison de pairages, formuler un problème de relaxation linéaire, le résoudre et vérifier les coûts réduits pour décider quels pairages conserver.

- Algorithmes Axés sur l'Optimisation : Ces algorithmes gèrent les instances à grande échelle du CPP en intégrant l'affectation de flotte et le pairage d'équipage. Ils exploitent des structures de réseau et de coûts spécifiques.

En résumé, le problème de pairage d'équipage aérien joue un rôle crucial dans l'optimisation de l'utilisation de l'équipage tout en respectant les réglementations de sécurité et les accords contractuels. Les compagnies aériennes cherchent à trouver des pairages rentables pour couvrir tous les vols avec un minimum de difficultés opérationnelles [5]

### **I.7.6 Méthodes de Résolution**

- Le CPP peut être abordé de différentes manières, en fonction de la complexité et de la taille de l'instance du problème :

- Approche de Relaxation : Cette méthode consiste à créer de nouveaux pairages en combinant des vols existants. Ensuite, on formule un problème de relaxation linéaire pour évaluer les coûts réduits. Les pairages les plus rentables sont conservés.

- Algorithmes Axés sur l'Optimisation : Ces algorithmes sont conçus pour gérer des instances de grande taille. Ils intègrent l'affectation de flotte (assigner des avions à des vols) et le pairage d'équipage. Ils exploitent des structures de réseau et de coûts spécifiques pour trouver des solutions efficaces [3]

### **I.7.7 Contraintes et Règles**

- Les pairages d'équipage doivent respecter diverses contraintes :

- Règles Syndicales et Contractuelles : Les accords collectifs et les règles syndicales définissent les limites des pairages.

- Réglementations de Sécurité : Les règles de sécurité de l'aviation, telles que celles établies par la FAA (Federal Aviation Administration), doivent être respectées.

- Contraintes Opérationnelles : Les compagnies aériennes cherchent à minimiser les temps d'attente entre les vols et à éviter les longs pairages qui peuvent entraîner des difficultés opérationnelles [3]

### **I.7.8 Objectif**

- L'objectif ultime est de trouver les pairages les plus rentables pour couvrir tous les vols avec un minimum de difficultés opérationnelles. Cela permet d'optimiser l'utilisation de l'équipage tout en respectant les règles et réglementations(3)

### **I.7.9 Complexité**

- Le CPP est NP-difficile, ce qui signifie qu'il n'existe pas d'algorithme efficace pour résoudre tous les cas en temps polynomial. Cependant, les méthodes heuristiques et les approches de relaxation sont utilisées pour obtenir des solutions proches de l'optimalité.

En résumé, le CPP est un défi majeur pour les compagnies aériennes, car il nécessite une planification minutieuse pour maximiser l'efficacité de l'équipage tout en respectant les contraintes légales et opérationnelles

## **I.8 Les termes liés au (l'appareillement de d'équipage)**

**Vol (flightleg ou leg) :**

- Période de temps entre le décollage et l'atterrissage de l'aéronef (AC) [7]

**Service (duty) :**

- Période de temps constituée d'un ou plusieurs vols. Elle inclut également le temps de briefing (période de préparation pour le service) et le temps de débriefing (période de préparation de l'AC pour l'équipage du vol suivant).

- Exemple de règle : Les pilotes de ligne ou le personnel de cabine ne peuvent pas voler plus de 8 heures, et le temps total de service ne peut pas dépasser 14 heures sur une période de 24 heures

**Pairage d'équipage (l'appareillement de l'équipage):**

- Période de temps constituée d'un ou plusieurs services. Les pairages d'équipage incluent également des périodes de repos entre les services

**Temps de connexion (connection time) :**

- Le temps entre deux vols consécutifs au cours d'un service est appelé temps de connexion. Les compagnies aériennes considèrent généralement des temps de connexion minimum et maximum, généralement entre 30 minutes et 3 heures (parfois 4 heures)

**Repos (rest) :**

- Une période de repos entre deux périodes de service est appelée repos, escale ou connexion de nuit

**Briefing :**

- Le temps écoulé avant le premier vol du service

**Débriefing :**

- Le temps écoulé après le dernier vol du service

Ces termes sont essentiels pour la planification efficace des équipages aériens, car ils permettent de respecter les règles légales et opérationnelles tout en optimisant l'utilisation de l'équipage

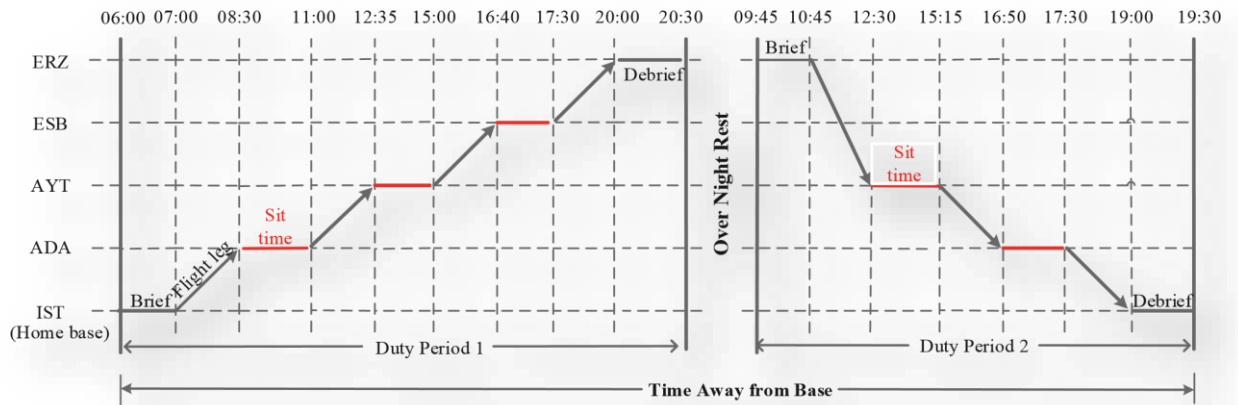


Fig. 1. Example of crew pairing with IST airport as crew base.

### Figure 2: exemple de jumelage d'équipage

Le problème de l'appariement de d'équipage (CPP) dans les compagnies aériennes vise à trouver un ensemble de séquences de vols (appelées appariements d'équipage) qui couvrent tous les vols dans l'horizon de planification d'une compagnie aérienne, tout en minimisant les coûts. Les coûts d'équipage sont la deuxième plus grande dépense opérationnelle directe après les coûts de carburant. Le CPP est donc essentiel pour optimiser l'utilisation des ressources internes d'une compagnie aérienne [8]

## 1.8.1 Quelques éléments clés concernant le CPP

### 1.8.1.1 Définition du CPP :

- Un appariement d'équipage est une séquence de vols connectables, au sein de la même flotte, qui commence et se termine à la même base d'équipage (où l'équipage réside réellement).

- Un appariement est parfois appelé un itinéraire pour l'équipage affecté à ce voyage. Il s'étend généralement sur une période de un à cinq jours [9]

### 1.8.1.2 Complexité computationnelle :

- Pour une grande compagnie aérienne, le nombre de vols dans l'horizon de planification peut être très élevé, rendant la planification des appariements très intensive en calcul.

- Bien qu'il soit possible de modéliser le CPP comme un problème de programmation linéaire binaire (BLP) en considérant tous les sous-ensembles de

l'ensemble des vols dans l'horizon de planification, le nombre de variables de décision pourrait facilement dépasser les capacités de la technologie informatique actuelle [10]

### **I.8.1.3 Méthodologie de résolution :**

- La méthode la plus courante consiste à résoudre le problème de manière séquentielle en deux phases :

1. Générer autant d'appariements légaux que possible.
2. Sélectionner le meilleur sous-ensemble en termes de coût minimal.

- La méthode séquentielle réduit la complexité computationnelle, car le nombre d'appariements légaux est beaucoup moins élevé que le nombre total de sous-ensembles possibles [11]

### **I.8.1.4 Contraintes :**

- Les contraintes pour former un appariement légal incluent non seulement la définition de l'appariement, mais aussi des règles syndicales, des réglementations gouvernementales et des accords contractuels.

En somme, le CPP est un problème crucial pour les compagnies aériennes, et sa résolution efficace permet d'optimiser les coûts d'équipage tout en garantissant la



## **CHAPITRE 2 : Modélisation mathématique et résolution algorithmique du problème**

### **II.1 Introduction**

La modélisation mathématique du problème de l'appareillement de d'équipage ainsi que le choix des algorithmes et des méthodes de résolution nécessaire sont des étapes cruciales qui permettent de transformer les défis opérationnels en un format mathématique et algorithmique solvable. Ces étapes doivent capturer la complexité des contraintes et des objectifs de l'optimisation des équipages aériens. Ce chapitre présente l'approche proposé.

### **II.2 Modélisation du problème**

#### **Une méthode de prévision et d'optimisation des coûts**

La modélisation des coûts est une technique puissante qui permet d'estimer et d'optimiser les coûts de divers projets, produits ou services. Elle implique la création d'une représentation mathématique de la structure des coûts et du comportement d'un système basée sur les entrées, les sorties, les ressources et les activités impliquées. Voici les étapes clés de la modélisation des coûts :

- La modélisation des coûts vous permet d'analyser l'impact de différents scénarios, hypothèses et décisions sur les performances en matière de coûts et la rentabilité de votre système.

- La modélisation des coûts repose sur la création d'un modèle mathématique qui représente la structure des coûts et le comportement du système [2]

#### **Comprendre les facteurs de coûts :**

- Identifiez les éléments et paramètres pertinents du système.

- Définissez la portée et les limites du modèle de coûts [2]

**Collecte et analyse de données :**

- Rassemblez des données sur les coûts, les ressources et les activités.
- Analysez ces données pour comprendre les relations entre les différents facteurs de coûts

**Créer un modèle de coûts :**

- Utilisez les données collectées pour construire un modèle mathématique.
- Ce modèle représente la manière dont les coûts varient en fonction des entrées et des activités

**Validation du modèle de coût :**

- Vérifiez que le modèle reflète correctement la réalité.
- Testez-le avec des données historiques ou des scénarios hypothétiques

**Prédire les coûts avec le modèle :**

- Utilisez le modèle pour estimer les coûts futurs.
- Analysez l'impact de différentes décisions sur les coûts

**Optimiser les coûts grâce à l'analyse de scénarios :**

- Explorez différentes options pour réduire les coûts.
- Identifiez les scénarios les plus avantageux

**Mise en œuvre de la modélisation des coûts en entreprise :**

- Appliquez les résultats de la modélisation dans la prise de décision.
- Suivez les performances réelles par rapport aux prévisions



La modélisation des coûts est un outil précieux pour les entreprises cherchant à optimiser leurs dépenses et à améliorer leur rentabilité. Elle permet d'évaluer les conséquences financières de différentes stratégies et de prendre des décisions éclairées. N'hésitez pas à explorer des études de cas et des exemples de réussite pour approfondir vos connaissances dans ce domaine

L'objectif de la modélisation d'optimisation des coûts dans la gestion de l'appareillement de d'équipage est de trouver des solutions efficaces pour réduire les dépenses tout en maintenant ou améliorant la qualité des services. Voici quelques points clés concernant cet objectif :

### **Réduction des coûts:**

- L'objectif principal est de minimiser les dépenses liées à la gestion des équipages, telles que les salaires, les heures supplémentaires et les frais de déplacement.

- Cela peut être réalisé en optimisant les affectations d'équipage, en réduisant les temps d'attente et en évitant les doublons de tâches [2]

### **Amélioration de l'efficacité :**

- La modélisation d'optimisation des coûts vise à améliorer l'utilisation des ressources disponibles.

- Elle permet d'identifier les meilleures combinaisons d'équipages pour les vols, en tenant compte des contraintes de disponibilité, des qualifications et des réglementations

### **Équilibre entre coûts et qualité :**

- L'objectif n'est pas seulement de réduire les coûts, mais aussi de maintenir un niveau de service optimal.

- Il s'agit de trouver le juste équilibre entre les économies réalisées et la satisfaction des passagers

## II.3 Paramètres de calcul

### II.3.1 Fonction objectif (Coûts des pairings)

Coûts des  $C_k^{Pairing} = \sum \text{coûts des périodes de service } C_j^{Ps} + \sum \text{coûts des périodes de repos}$

$$C_k^{Pairing} = \sum_{j=1}^d b_{jk} C_j^{Ps} + \sum_{j=1}^d \sum_{q=1}^d b_{jk} b_{qk} h_{jq} C_{jq}^{Tr} \quad \forall k= 1, 2, \dots, p$$

$i= 1, 2, \dots, f$  ( $f \in F$  ensemble de tous les segments de vols)

$j= 1, 2, \dots, d$  ( $d \in D$  ensemble de toutes les périodes de vols légales)

$k= 1, 2, \dots, p$  ( $p \in P$  ensemble de tous les s légales)

**Coûts d'une période de service  $P_s$  :**

**Coûts d'une période de service  $C_j^{Ps} = \sum \text{coûts des vols} + \sum \text{coûts des temps de connections}$**

$$C_j^{Ps} = \sum_{i=1}^f a_{ij} c_i^v + \sum_{i=1}^f \sum_{u=1}^f a_{ij} a_{iu} c_{iu}^{Tc} \quad \forall j = 1, 2, \dots, d$$

### II.3.2 Contraintes

1- Type du problème:

a) Journalier

b) Hebdomadaire

c) Mensuel

2- Contrainte du foyer (home base) : le doit se commencer et se terminer au même home base. Chaque compagnie aérienne doit avoir au moins un home base

3- Contrainte de l'optimisation : le meilleur doit couvrir tous les vols du calendrier

4- La contrainte des villes consécutives : la ville de départ d'un vol et la même de l'arrivée du vol précédent

## CHAPITRE II : Modélisation mathématique et résolution algorithmique du problème

5- contrainte du nombre de vols :

$$K_j^{Ps} = \sum_{j=1}^f a_{ij} \quad \forall j=1,2,\dots,d \quad 1 \leq k_j^{Ps} \leq 4$$

6- contrainte de temps de connexion :

$$30 \text{ min} \leq T_c \leq 180 \text{ min}$$

$$M_{Tc}^{min} \leq M_{il}^{Tc} \leq M_{Tc}^{max}$$

7- contrainte du temps totale de Ps :

$$Ps \leq 14h$$

$$M_j^{Tps} = \sum_{i=1}^f \sum_{i=1}^f (a_{ij} M_i^{Tps} + a_{ij} a_{il} u_{il} M_{il}^{Tc}) + \text{brief} + \text{debrief} \leq 14h \quad \forall j = 1, 2, \dots, d$$

$$\text{Brief} = 30 \text{ min}, \text{debrief} = 180 \text{ min}$$

Heur de début du Ps ( )	1-4 atterrissage	1-5 atterrissage
05 :00 – 14 :00	14h	13h
14 :01 – 17 :00	13h	12h
17 :01 – 04 :59	12h	11h

8 - temps de bloc totale :

$$M_j^{Tpv} = \sum_{i=1}^f (a_{ij} M_i \leq M_{\sum Tpv}^{max}, a_{ij} = 1 \text{ ou } 0, \forall j= 1,2,\dots,d$$

$$M_{\sum Tpv}^{max} = 8h$$

Si  $M_i \geq 6h$  le vol est on extended range (ER)

ER= temps de vol  $M_i \geq 6h$  ou  $4h$  du fuseau horaires doivent être traversés.

9- contrainte du pairing :

**CHAPITRE II : Modélisation mathématique et résolution algorithmique du problème**

$$1 \text{ Ps} \leq P \leq 4\text{Ps} \quad (4)$$

$$Z_{\Sigma K}^{PAIRING} = \sum_{i=1}^d b_{jk} \quad \forall k=1,2,\dots, p \text{ et } 1 \leq Z_{\Sigma K}^{PAIRING} \leq 4$$

10- le doit se commencer et se terminer au même home base

$$start=A \text{ et } finish=A$$

11- contrainte du temps totale d'une période de service : (max par jour)

$$M_k^{pairing} = \sum_{j=1}^d \sum_{q=1}^d (b_{jk} M_j^{tft} + b_{jk} b_{qk} h_{jq} M_{jq}^{pr}) + brief + debrief \leq 24h / \text{jour} \quad \forall k = 1, 2, \dots, p$$

12- temps de repos minimum après une période de service :

Le temps minimum de repos dépend du temps total de vol dans une période de sévices il est entende range ou non

Temps de vol dans la période de service	Tr min après la Ps	
	Home base/tomporary base	Layover station
<= 6h (1 seule atterrissage)	12h	8h
<= 11h	12h	10h
>11h	12h	12h
12-14h, ou time zone différence >3H	14h	14h
Vol Extended range	24h	

13 - après un court layover, le trajet se termine en retournant au home base.

14 - Pas de changement d'avion dans une station internationale : il ne devait y avoir aucun changement d'avion dans une station internationale pendant un service.

15- temps de repos maximal avec une escale (layover) international dans une période de service : pour les escales (layover) non-domestique, une durée maximale de 42h est autorisée, avec certaines stations ayant des exceptions de 8h pendant la saison estivale (l'objectif de cette règle étant de limiter le temps d'escale dans les aéroports internationaux)

### **II. 4 Processus d'optimisation**

L'optimisation de l'exploitation du personnel navigant est un levier stratégique pour augmenter les bénéfices d'une compagnie aérienne. Cette démarche consiste à améliorer la gestion des équipages afin de maximiser leur productivité tout en respectant les réglementations et en assurant leur bien-être

La gestion efficace du personnel navigant peut entraîner une réduction significative des coûts opérationnels. En optimisant les plannings, en minimisant les temps d'inactivité et en assurant une utilisation optimale des compétences de chaque membre, les compagnies peuvent réaliser des économies substantielles. De plus, cela peut contribuer à une meilleure satisfaction du personnel, réduisant ainsi le taux de turnover et les coûts associés au recrutement et à la formation.

Les compagnies aériennes doivent jongler avec de nombreuses contraintes lors de la planification des services du personnel navigant, telles que les limites de temps de vol, les exigences de repos, les qualifications des équipages et les préférences individuelles. L'objectif est de trouver le meilleur équilibre entre les besoins opérationnels et les contraintes réglementaires et humaines.

L'optimisation de l'exploitation du personnel navigant est essentielle pour améliorer la rentabilité d'une compagnie aérienne. Elle nécessite une approche holistique qui intègre la technologie, la gestion des données et une compréhension approfondie des besoins humains et opérationnels

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.

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  $g(x)$

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

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

$f(x^*) = \min \text{ (ou max) } f(x)$

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

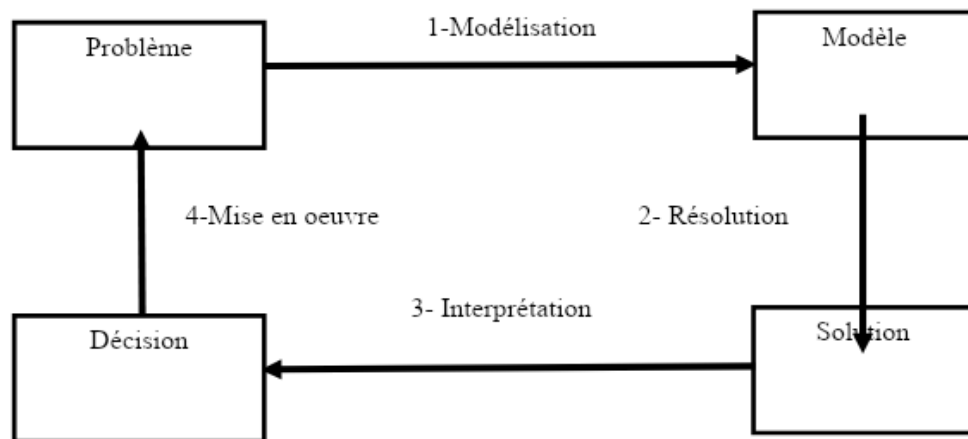


Figure 3 : schéma de processus d'optimisation

### II.4.1 Algorithme utilisé pour la résolution du problème

L'introduction des algorithmes d'optimisation dans la résolution des problèmes de l'appareillement de d'équipage a révolutionné la manière dont les compagnies aériennes planifient et gèrent leurs équipages. Avec l'avènement de nouvelles

technologies et méthodologies, le potentiel pour des améliorations continues demeure vaste, promettant des économies substantielles et une meilleure satisfaction du personnel navigant

Parmi les diverses techniques d'optimisation, l'algorithme de recherche en profondeur (DFS) se distingue par sa simplicité et sa capacité à explorer systématiquement l'espace des solutions. Bien que traditionnellement utilisé pour le parcours de graphes, le DFS peut être adapté pour traiter les contraintes spécifiques du l'appareillement de d'équipage.

### II.4.1.1 La Recherche en Profondeur (DFS)

La recherche en profondeur, ou DFS (Depth First Search), est un algorithme fondamental pour l'exploration de structures de données de graphes ou d'arbres. Il commence au nœud racine et explore aussi loin que possible le long de chaque branche avant de revenir en arrière.

### II.4.1.2 Fonctionnement de DFS

Le DFS fonctionne selon le principe suivant :

1. Commencer par mettre l'un des sommets du graphe sur le dessus d'une pile.
2. Prendre le sommet supérieur de la pile, l'ajouter à la liste des visités.
3. Créer une liste des nœuds adjacents de ce sommet.
4. Ajouter ceux qui ne sont pas dans la liste des visités au sommet de la pile.
5. Répéter les étapes 2 à 4 jusqu'à ce que la pile soit vide.

Et si nous voulons expliquer les étapes en couleurs elles sont les suivantes

1. On commence par un sommet initial et on le marque comme gris.
2. On suit un chemin depuis ce sommet jusqu'à atteindre un cul-de-sac ou un sommet déjà visité (gris ou noir).

3. On revient en arrière jusqu'au dernier sommet ayant des voisins non explorés et on continue l'exploration.

4. Lorsqu'un sommet n'a plus de voisins blancs, on le marque comme noir.

**La coloration des sommets** aide à suivre l'état de l'exploration :

**Blanc** : sommet non découvert.

**Gris** : sommet découvert avec des voisins non explorés.

**Noir** : sommet entièrement exploré.

La liste d'attente pour le parcours en profondeur, c'est une pile (LIFO - Last In, First Out) ou une récursion [13]

**Approche** : Chemin par chemin

**II.4.2 Structure de données** : 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.

On Utilise une pile (LIFO - Last In, First Out) ou la récursivité. 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 couleur qui associe à chaque sommet sa couleur (blanc, gris ou noir).

On va en plus mémoriser pour chaque sommet si :

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



## CHAPITRE II : Modélisation mathématique et résolution algorithmique du problème

Fin [si] = date de fin de traitement de si (passage en noir)

Où l'unité de temps est une itération.

La date courante est mémorisée dans la variable tps.

Algorithme de parcours en profondeur des sommets accessibles depuis s0  
DFS(S, A, s0)

Init\_pile(P)

Pour tout sommet si ∈ S faire

Π [si] ← nil

Couleur [si] ← 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

Finis

Fin tant

Fin DFS

### II.4.3 Avantages de DFS

- **Simplicité** : DFS est simple à comprendre et à implémenter.

- **Efficacité** : Il est efficace en termes de mémoire car il nécessite peu d'espace supplémentaire, principalement pour la pile.

- **Adaptabilité** : Il peut être adapté pour résoudre de nombreux problèmes, y compris l'appariement de d'équipage [13]

### II.4.4 Complexité de DFS

La complexité temporelle de DFS est représentée par  $O(V + E)$ , où  $V$  est le nombre de sommets et  $E$  le nombre d'arêtes. La complexité spatiale est de  $O(V)$ , ce qui est linéaire par rapport à la taille du graphe.

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

## CHAPITRE II : Modélisation mathématique et résolution algorithmique du problème

$O(n^2)$  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,  $s_0$ )

Dec [ $s_0$ ]  $\leftarrow$  tps

Tps  $\leftarrow$  tps + 1

Couleur [ $s_0$ ]  $\leftarrow$  gris

Pour tout  $s_j \in \text{succ}(s_0)$  faire

Si couleur [ $s_j$ ]=blanc alors

$\Pi[s_j] \leftarrow s_0$

DFSrec(S, A,  $s_j$ )

Finsi

Finfaire

Couleur [ $s_0$ ]  $\leftarrow$  noir

Fin [ $s_0$ ]  $\leftarrow$  tps

Tps  $\leftarrow$  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  $si \in S$  faire

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

Couleur  $[si] \leftarrow \text{blanc}$

Fin pour

Tps  $\leftarrow 0$

Fin

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

**Ordre de visite** : Suit un chemin jusqu'au bout avant de revenir en arrière pour explorer d'autres chemins.

**Utilisation** : Explorer complètement un graphe, trouver des composantes fortement connexes, détecter des cycles.

DFS est un outil puissant pour l'exploration de graphes et peut être particulièrement utile dans l'optimisation du l'appareillement de d'équipage. Sa capacité à parcourir systématiquement toutes les possibilités en fait une méthode de choix pour générer des solutions optimales tout en respectant les contraintes spécifiques à l'aviation

## II.5 Applications du parcours en profondeur

### II.5.1 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 :[14]

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.5.2 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 [**Sj**]=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  $S_i$  [14]

## II.6 Amélioration de l'Algorithme DFS

L'efficacité de l'algorithme de recherche en profondeur (DFS) pour le problème de l'appareillement de d'équipage peut être significativement améliorée par diverses techniques d'optimisation et d'adaptation

### II.6.1 Techniques d'Amélioration

- **Élagage** : L'élagage des branches non prometteuses réduit l'espace de recherche, permettant au DFS de se concentrer sur les chemins plus susceptibles de mener à des solutions optimales.

- **Parallélisation**: L'exécution de DFS en parallèle sur plusieurs processeurs accélère le processus de recherche, en particulier pour les grandes instances de données.

- **Heuristiques** : L'intégration d'heuristiques pour guider la recherche peut améliorer la qualité des solutions trouvées et réduire le temps de calcul.

- **Incorporation des Coûts**: L'ajout de considérations de coût pendant la génération des s aide à orienter le DFS vers des solutions économiquement plus avantageuses.

### II.6.2 Adaptation au Contexte Aérien

- **Modélisation des Contraintes** : Adapter le DFS pour tenir compte des contraintes spécifiques de l'aviation, telles que les réglementations de l'aviation civile et les accords syndicaux.

- **Gestion des Changements** : Permettre une réoptimisation rapide en cas de changements imprévus, comme les retards de vols ou les annulations.

### II.6.3 Résultats et Performances

Des études récentes ont montré que ces améliorations peuvent conduire à des solutions de haute qualité pour l'appareillement de d'équipage, tout en réduisant les coûts opérationnels pour les compagnies aériennes. Les approches améliorées de DFS ont été appliquées avec succès dans des contextes industriels, démontrant leur applicabilité et leur efficacité.

Les améliorations apportées à l'algorithme DFS le rendent plus adapté aux défis complexes du l'appareillement de d'équipage dans l'industrie aérienne. En intégrant des techniques d'élagage, de parallélisation, d'heuristiques, et de gestion des coûts, le DFS amélioré offre une approche robuste et flexible pour l'optimisation des équipages.

### II.7 Étude de Cas

L'étude de cas présentée ici illustre l'application de l'algorithme DFS amélioré pour l'optimisation du l'appareillement de d'équipage dans une compagnie aérienne.

#### II.7.1 Contexte de l'Étude

La compagnie aérienne fournit un ensemble de données comprenant \*\*2000 vols\*\* sur une période donnée. L'objectif est de générer des pairings qui couvrent tous les vols avec le coût minimum possible, tout en respectant les contraintes de légalité.

#### II.7.2 Méthodologie

- **Génération de pairings** : Utilisation de la structure de réseau pour la génération de s et amélioration de l'algorithme DFS pour parcourir ce réseau.

- **Parallélisations** : Implémentation parallèle de DFS sur plusieurs processeurs pour accélérer la recherche.

- **Intégration des Coûts** : Incorporation des considérations de coût pendant la génération des pairings pour améliorer la performance de l'optimiseur.

#### II.7.3 Résultats

Les résultats démontrent que l'algorithme DFS amélioré, avec parallélisations et intégration des coûts, a réussi à générer des pairings de l'appareillement de d'équipage qui réduisent significativement les coûts opérationnels par rapport aux méthodes traditionnelles. Les pairings générés étaient légaux et couvraient tous les vols requis.

### II.8 Conclusion

L'optimisation de l'exploitation des personnels navigants pour minimiser les coûts des compagnies aériennes est un défi complexe et crucial. Dans ce mémoire, nous avons exploré l'application de l'algorithme de recherche en profondeur (DFS) au problème de l'appareillement de d'équipage, et voici les principaux points à retenir :

**1. Efficacité de DFS :** L'algorithme DFS, bien qu'initialement conçu pour le parcours de graphes, peut être adapté avec succès pour générer des s de crew. Sa capacité à explorer systématiquement toutes les combinaisons possibles tout en respectant les contraintes opérationnelles en fait une méthode puissante.

**2. Intégration des Coûts :** En incorporant des considérations de coût pendant la génération des s, nous pouvons améliorer la qualité des solutions tout en minimisant les dépenses pour les compagnies aériennes.

**3. Complexité et Améliorations :** Le problème de l'appareillement de d'équipage est NP-complet, mais des techniques telles que l'élagage, la parallélisations et l'utilisation d'heuristiques peuvent améliorer l'efficacité de DFS.

**4. Étude de Cas :** Nous avons présenté une étude de cas basée sur des données réelles, montrant comment l'algorithme DFS amélioré peut générer des solutions optimales pour des compagnies aériennes de taille moyenne à grande.

En conclusion, l'optimisation du l'appareillement de d'équipage est un domaine en constante évolution, et l'algorithme DFS continue d'être un outil précieux pour les compagnies aériennes cherchant à réduire leurs coûts tout en maintenant la conformité avec les réglementations. Les perspectives futures incluent l'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique pour des solutions encore plus efficaces et robustes.



## CHAPITRE III : Résultat et discussion

### III.1 Introduction

L'optimisation des équipages aériens, ou l'appareillement de d'équipage, est une composante essentielle de la planification opérationnelle des compagnies aériennes. Elle consiste à créer des séquences de vols connectables, appelées s, qui débutent et se terminent à la même base d'équipage, tout en minimisant les coûts associés. Ce processus complexe doit respecter une multitude de contraintes réglementaires, syndicales et opérationnelles, rendant l'optimisation à la fois cruciale et difficile.

L'appareillement de d'équipage suit immédiatement la phase d'assignation de la flotte et précède la phase de rostering de l'équipage. Un typique peut s'étendre de un à cinq jours et doit couvrir autant de jambes de vol que possible dans un horizon de planification, avec des coûts aussi réduits que possible

### III.2 considérations

En se basant sur un fichier csv qui contient un calendrier de vol calculé :

Génération des périodes de service légales :

Les temps de vol qui égale à la différence entre l'heure (et la date) de l'arrivée et l'heure (et la date) de départ, vérifier que les points de départ et d'arrivées sont différents.

Calculer le temps de connexion qui est la différence entre l'heure (et la date) de prochain départ et l'heure (et la date) d'arrivée, en vérifiant que le point de l'arrivée et le même que celui du prochain départ. En vérifiant aussi que le temps de connexion respecte les normes déclaré en dessus.

Ensuite en se basant sur les temps de vol et de connexions calculé générer les périodes de services légales.

Vérifier que tout ce qui a été calculé respecte les contraintes et les formules mathématiques dans l'énoncé.

Génération des appareillements légaux :

### CHAPITRE III : résultats et discussion

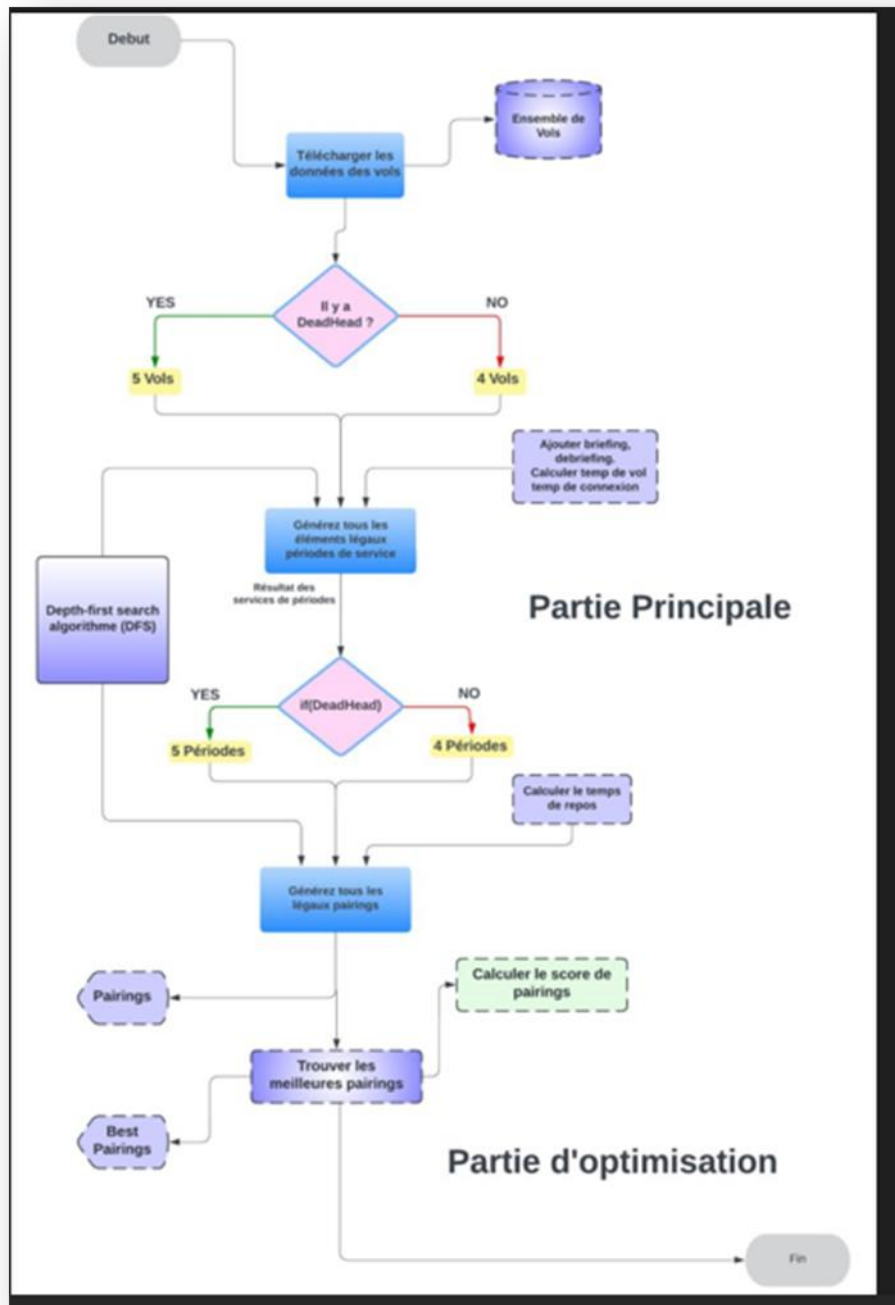
On se basant sur les périodes de services légales générées et sur les contraintes de calculs des périodes de repos en fonctions de temps de vol totales dans chaque

Période de service, générer les appareilllements légale possible en utilisant le DFS algorithme.

Optimisation des appareilllements

On choisir les 2 meilleurs s en fonction de cout minimal (c'est à dire maximum périodes de services et minimum périodes de repos, on se basant sur la fonction objective.

## Un logigramme explicatif structure de travail



### III.2.1 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 éloignées...) 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 a 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.

### III.3 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 les développeurs.

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

Le python est le langage de programmation destiné aux grandes bases de données (big data).

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 d'accéder à des fonctionnalités avancées sans avoir à réinventer la roue.

### **III.4 étape 1 : Approches proposées pour la génération des périodes de services**

Dans cette étape nous allons proposer deux (02) algorithmes pour la génération des périodes de service. Le premier est un algorithme basique alors que le deuxième est algorithme DFS qui est un algorithme d'optimisation

#### **III.4.1 Approche basée sur un Algorithme simple**

Dans cette approche nous avons construit un algorithme basé sur des instructions directes qui traduisent le modèle mathématique en code exécutable. Cet algorithme ne suit aucune méthode ni modèle déjà connu.

##### **III.4.1.1 Algorithme en pseudocode**

1. Lire les données du fichier CSV.
2. Convertir les heures de départ et d'arrivée en format datetime.
3. Calculer les périodes de service.
4. Générer les périodes de service.

Début

Fonction Lire CSV (fichierChemin)

Ouvrir le fichier fichierChemin en lecture

Lire les en-têtes du fichier

Initialiser une liste vide Données

Tant que ligne dans fichier

Lire ligne

Ajouter ligne à Données

Fin Tant que

Fermer le fichier

Retourner Données

Fin Fonction

Fonction Convertir Temps (données)

Pour chaque ligne dans données

Ligne ['heure\_depart'] = ConvertirEnDatetime (ligne ['heure\_depart'])

Ligne ['heure\_arrivee'] = ConvertirEnDatetime (ligne ['heure\_arrivee'])

Fin Pour

Retourner données

Fin Fonction

Fonction CalculerPériodesService (données)

Briefing = 30 minutes

Débriefing = 60 minutes

Initialiser une liste vide PériodesService

Pour chaque ligne dans données

Temps vol = ligne ['heure\_arrivee'] – ligne ['heure\_depart']

Début service = ligne ['heure\_depart'] - briefing

Fin service = ligne ['heure\_arrivee'] + débriefing

### CHAPITRE III : résultats et discussion

`durée_service = briefing + temps_vol + debriefing`

Ajouter à `PériodesService`:

```
{  
  
'Id_vol': ligne ['id_vol'],  
  
'Aéroport_depart': ligne ['aéroport_depart'],  
  
'Aéroport_arrivee': ligne ['aéroport_arrivee'],  
  
'Début_service': début_service,  
  
'Fin_service': fin_service,  
  
'Durée_service': durée_service  
  
}
```

Fin Pour

Retourner `PériodesService`

Fin Fonction

Fonction `GénérerPériodesService` (fichierChemin)

`Données = LireCSV` (fichierChemin)

`Données = ConvertirTemps` (données)

`PériodesService = CalculerPériodesService` (données)

Retourner `PériodesService`

Fin Fonction

`FichierChemin = "chemin_vers_votre_fichier_csv.csv"`

PériodesService = GénérerPériodesService (fichierChemin)

Afficher PériodesService

Fin

### III.4.1.2. Explication des étapes en pseudo-code :

**LireCSV (fichierChemin)** : Lit les données du fichier CSV et les stocke dans une liste.

Ouvre le fichier en mode lecture.

Lit les en-têtes et initialise une liste vide pour stocker les données.

Parcourt chaque ligne du fichier, ajoute chaque ligne à la liste Données.

Ferme le fichier et retourne la liste des données.

**ConvertirTemps (données)** : Convertit les chaînes de caractères représentant les heures de départ et d'arrivée en objets datetime.

Parcourt chaque ligne dans données.

Convertit les valeurs des champs heure\_depart et heure\_arrivee en objets datetime.

**CalculerPériodesService (données)** : Calcule les périodes de service en ajoutant les durées de briefing et de débriefing.

Initialise les durées de briefing et de débriefing.

Parcourt chaque ligne dans données.

Calcule la durée du vol, le début et la fin du service, et la durée totale du service.

Ajoute ces informations à une liste Périodes Service.



**GénérerPériodesService (fichierChemin)** : Fonction principale qui combine toutes les étapes précédentes.

Lit les données du fichier CSV.

Convertit les temps de départ et d'arrivée.

Calcule les périodes de service.

Retourne les périodes de service.



```
+ Code + Texte

import pandas as pd
from datetime import timedelta, datetime
from google.colab import files

def lire_csv(non_fichier, encodage):
    return pd.read_csv(non_fichier, delimiter=';', encoding=encodage)

def detecter_encodage(non_fichier):
    encodages = ['utf-8', 'ISO-8859-1', 'ISO-8859-9']
    for encodage in encodages:
        try:
            with open(non_fichier, 'r', encoding=encodage) as fichier:
                fichier.readlines()
            return encodage
        except UnicodeDecodeError:
            continue
    return None

def generer_periodes_service(donnees, DH, max_heures_vol):
    briefing = timedelta(minutes=30)
    debriefing = timedelta(minutes=60)
    max_periode_service = timedelta(hours=14)

    periodes_service = []

    i = 0
    while i < len(donnees):
        periode_service = []
        periode_vol = timedelta(0)
        depart_initial = pd.to_datetime(donnees.iloc[i]['date depart']) + briefing
        arrivee_finale = pd.to_datetime(donnees.iloc[i]['date arrive'] +
```

Figure 4: code de l'algorithme simple pour générer les périodes de services

```

Saving instancia23.csv to instancia23.csv
Detected Encoding: ISO-8859-1
DataFrame Columns: Index(['flight-id', 'org
                        'date arrivé', 'heure arrivé'],
                        dtype='object')
Is there a deadhead (1 for Yes, 0 for No)?
Service Period 1:
Start          | 2023-01-02 06:30:00
End            | 2023-01-02 19:05:00
Flights:
Flight | Origin | Destination | Departu
1      | B      | D            | 01/02/202
2      | D      | A            | 01/02/202
3      | A      | C            | 01/02/202
4      | C      | A            | 01/02/202
Total Flight Time | 6h 25min 0sec

Service Period 2:
Start          | 2023-01-02 10:30:00
End            | 2023-01-02 21:15:00

```

Figure 5: résultat de l'algorithme simple

### III.4.2 Approche basé sur l'utilisation de l'algorithme DFS

L'algorithme DFS est appliqué pour explorer l'espace des solutions générées par le modèle mathématique L'algorithme DFS (Depth-First Search) utilisé dans ce code vise à générer des périodes de service pour les vols, en respectant certaines contraintes de temps de vol et de connexion. Voici une description détaillée de son fonctionnement

#### III.4.2.1 Initialisation

Les paramètres et constantes sont définis, notamment les durées de briefing, de débriefing, la durée maximale d'une période de service, et les temps de connexion minimum et maximum.

Une liste vide `periodes_service` est initialisée pour stocker les périodes de service valides.

### III.4.2.2 Fonction Réursive DFS :

La fonction dfs est définie avec les paramètres :

Index : l'index courant dans la liste des vols.

Periodes\_service : la liste des vols dans la période de service actuelle.

Periode\_vol : la durée totale de vol dans la période de service actuelle.

Depart\_initial : le moment de départ du premier vol dans la période de service.

Arrivee\_finale : le moment d'arrivée du dernier vol dans la période de service.

DH : un indicateur de deadhead (0 pour non, 1 pour oui).

### III.4.2.3 Condition de Terminaison :

Si la longueur de periode\_service atteint 5 vols (avec deadhead) ou 4 vols (sans deadhead), que la durée totale de vol n'excède pas 10 heures, et que la période totale de service (y compris briefing et débriefing) n'excède pas 14 heures, alors la période de service est ajoutée à la liste periodes\_service.

### III.4.2.4 Récursion :

La fonction dfs boucle à travers les vols à partir de l'index courant.

Pour chaque vol, les heures de départ et d'arrivée sont extraites et converties en objets datetime.

Si periode\_service est vide ou si la destination du dernier vol dans periode\_service correspond à l'origine du vol courant, alors :

Si ce n'est pas le premier vol, le temps de connexion entre le dernier vol et le vol courant est calculé.

Si le temps de connexion est compris entre 30 et 180 minutes, le vol est ajouté à periode\_service et la durée totale de vol est mise à jour.

La fonction dfs est appelée récursivement avec l'index suivant, la nouvelle période de service, la nouvelle durée de vol, le moment de départ initial, et le moment d'arrivée final.

#### **III.4.2.5 Retour des Périodes de Service :**

Après avoir exploré toutes les combinaisons possibles de vols, la liste `periodes_service` contenant les périodes de service valides est retournée.

#### **III.4.2.8 Pseudocode:**

Fonction DFS (index, `periodes_service`, `periode_vol`, `depart_initial`, `arrivee_finale`, DH):

Si la longueur de `periodes_service` est égale à 5 (avec DH) ou 4 (sans DH) ET la durée de `periode_vol` est inférieure ou égale à 10 heures ET la période totale de service n'excède pas 14 heures:

Ajouter la période de service à la liste des `periodes_service`

Retourner

Si l'index est supérieur ou égal à la taille des données:

Retourner

Pour chaque vol à partir de l'index courant:

Extraire les informations du vol (heure de départ et d'arrivée)

Si `periodes_service` est vide ou si la destination du dernier vol dans `periodes_service` correspond à l'origine du vol courant :

Si `periodes_service` n'est pas vide :

Calculer le temps de connexion entre le dernier vol et le vol courant

Si le temps de connexion est compris entre 30 et 180 minutes:

Ajouter le vol à `periodes_service`

## CHAPITRE III : résultats et discussion

Mettre à jour la durée totale de vol

Appeler récursivement DFS avec l'index suivant, la nouvelle `periodes_service`, la nouvelle durée de vol, le départ initial et l'arrivée finale

Fonction Principale `main ()`:

Charger le fichier CSV

Détecter l'encodage du fichier

Lire les données du fichier CSV

Demander si un `deadhead` est présent

Générer les périodes de service en appelant DFS avec les données, l'indicateur DH et la durée maximale de vol

Afficher les périodes de service générées

```
periodes_service = []

def dfs(index, periode_service, periode_vol, depart_initial, arrivee_finale, DH):
    if len(periode_service) == (5 if DH else 4) and periode_vol <= timedelta(hours=10) and (arrivee_finale -
depart_initial + briefing + debriefing) <= max_periode_service:
        periode_service.append({
            'debut_service': depart_initial - briefing,
            'fin_service': arrivee_finale + debriefing,
            'vols': periode_service.copy(),
            'temps_total_periode_service': (arrivee_finale - depart_initial + briefing + debriefing)
        })
        return # Ne pas poursuivre la recherche après avoir trouvé une période valide

    if index >= len(donnees):
        return

    for i in range(index, len(donnees)):
        vol = donnees.iloc[i]
        depart_vol_str = f"{vol['date depart']} {vol['heure depart']}"
        arrivee_vol_str = f"{vol['date arrivé']} {vol['heure arrivé']}"

        depart_vol = datetime.strptime(depart_vol_str, '%d/%m/%Y %H:%M:%S')
        arrivee_vol = datetime.strptime(arrivee_vol_str, '%d/%m/%Y %H:%M:%S')
```

Figure 6: code de l'algorithme en profondeur (DFS) pour générer les périodes de services

```
Flights:
Flight | Origin | Destination | Departure | Arrival | Connection Time | Flight Time
1 | B | D | 01/02/2023 07:00:00 | 01/02/2023 08:00:00 | | 1:00:00
2 | D | A | 01/02/2023 10:05:00 | 01/02/2023 11:20:00 | 2:05:00 | 1:15:00
3 | A | B | 01/02/2023 13:00:00 | 01/02/2023 14:00:00 | 1:40:00 | 1:00:00
4 | B | A | 01/02/2023 15:00:00 | 01/02/2023 16:00:00 | 1:00:00 | 1:00:00
Total Flight Time | 4:15:00
Total Service Period | 10:30:00

Service Period 2:
Start | 2023-02-01 05:30:00
End | 2023-02-01 15:00:00
Flights:
Flight | Origin | Destination | Departure | Arrival | Connection Time | Flight Time
1 | A | B | 01/02/2023 06:00:00 | 01/02/2023 07:00:00 | | 1:00:00
2 | B | A | 01/02/2023 09:00:00 | 01/02/2023 10:00:00 | 2:00:00 | 1:00:00
3 | A | B | 01/02/2023 11:00:00 | 01/02/2023 12:00:00 | 1:00:00 | 1:00:00
4 | B | A | 01/02/2023 13:00:00 | 01/02/2023 14:00:00 | 1:00:00 | 1:00:00
Total Flight Time | 4:00:00
Total Service Period | 9:30:00

Service Period 3:
Start | 2023-02-01 05:30:00
End | 2023-02-01 17:00:00
Flights:
Flight | Origin | Destination | Departure | Arrival | Connection Time | Flight Time
```

Activer Windk  
Accédez aux para

**Figure 7: résultat de l'algorithme DFS**

### Considération

Après la comparaison des résultats obtenus par l'utilisation de chaque algorithme nous avons décidé d'utiliser les périodes de service générés par l'algorithme DFS parce qu'elles sont optimisées en matière de temps d'exécution et de la qualité du résultat lui-même.

### III.4.3 Etape 2 : Application de l'algorithme DFS pour Générer les pairings légaux

Le code est conçu pour générer des "pairings" (des séquences) On se basant sur les périodes de services légales générées et sur les contraintes de calculs des périodes de repos en fonctions de temps de vol totales dans chaque Période de service. Générer les appariements légaux possibles en utilisant l'algorithme DFS de recherche en profondeur. Le pairing doit respecter certaines règles, comme l'enchaînement logique des vols et la limitation du nombre de périodes de service dans une séquence.

### III.4.3.1 Algorithme en pseudocode

#### Fonction generer\_ (service periods, DH)

Cette fonction génère toutes les combinaisons valides de périodes de service en utilisant l'algorithme DFS.

#### Paramètre:

Service\_periods: Une liste de dictionnaires représentant les périodes de service.

Deadhead: Un booléen indiquant si le peut contenir 5 périodes de service (si vrai) ou 4 (si faux).

#### Variables et Fonctions Internes:

Une liste pour stocker les s valides.

Is\_same\_day (period1, period2): Vérifie si deux périodes de service se déroulent le même jour.

Dfs (index, paire, service\_sum, rest\_times): Fonction récursive utilisant l'algorithme DFS pour explorer les combinaisons de périodes de service.

Index: L'index actuel dans la liste service\_periods.

Paire: La liste courante de périodes de service dans le pairing.

Service\_sum: La somme totale du temps de service pour le courant.

Rest\_times: La liste des temps de repos entre les périodes de service dans le courant.

#### Logique de dfs\_:

Détermine le nombre maximum de périodes de service basé sur DH.

Si le nombre de périodes dans paire atteint ce maximum et que le premier et le dernier vol se déroulent le même jour et commencent et se terminent au même endroit, ajoute le pairing à la liste des pairings.

Si l'index dépasse la longueur de service\_periods, termine la récursion.

Pour chaque période de service, vérifie si elle peut suivre logiquement la dernière période de pair en comparant les destinations et origines des vols.

Calcule le temps de repos entre les périodes et continue la récursion avec les nouvelles valeurs.

### **Retour:**

Renvoie la liste des s valides.

### **Fonction adjust\_\_dates(s)**

Cette fonction ajuste les dates des pairings pour qu'elles soient cohérentes sur plusieurs jours.

### **Paramètre:**

Pairings: La liste des pairings générés par generer\_.

### **Logique:**

Pour chaque, crée une nouvelle structure avec des dates ajustées.

Décale les dates des périodes de service en ajoutant un jour supplémentaire pour chaque période après la première.

### **Retour:**

Renvoie la liste des s avec les dates ajustées.



```

def generer_pairing(service_periods, DH):
    pairing = []

    def is_same_day(period1, period2):
        return (period1['debut_service'].date() == period2['debut_service'].date() and
                period1['fin_service'].date() == period2['fin_service'].date())

    def dfs_pairing(index, paire, service_sum, rest_times):
        max_periods = 5 if DH else 4 # Determine the maximum number of service periods based on deadhead

        if len(paire) == max_periods:
            first_service_period = paire[0]
            last_service_period = paire[-1]
            if (first_service_period['vols'][0]['orgine'] == last_service_period['vols'][-1]['destination'] and
                is_same_day(first_service_period, last_service_period)):
                pairing.append({
                    'service_periods': paire.copy(),
                    'total_service_sum': service_sum,
                    'rest_times': rest_times.copy()
                })
            return

        if index >= len(service_periods):
            return

        for i in range(index, len(service_periods)):

```

Figure 8: code de l’algorithme dfs pour générer les pairings

**Pairing 1:**  
 Total Service Sum: 1 day, 19:40:00

**Service Period 1:**

Start: 2023-02-01 05:30:00

End: 2023-02-01 15:00:00

Total Service Period Time: 9:30:00

	orgine	destination	heure départ	heure arrivé
1	A	B	06:00:00	07:00:00
2	B	A	09:00:00	10:00:00
3	A	B	11:00:00	12:00:00
4	B	A	13:00:00	14:00:00

Rest Time until next period: 12:00:00

**Service Period 2:**

Start: 2023-02-02 05:30:00

End: 2023-02-02 17:00:00

Figure 9: résultat de l’algorithme DFS pour générer les pairings

Pour présélectionner les deux meilleurs pairings parmi les pairings légal on applique le dfs :

### III.4.4 Application de l'algorithme DFS pour la sélection des meilleurs pairing

Selon la fonction objectif du problème de l'appareillement de l'équipage un meilleur pairing et celui qui a le cout le plus minimal possible et qui couvre tous les vols du calendrier.

Ce code contient deux fonctions principales : `find_best pairings` et `displays`. La première sélectionne les meilleurs pairings parmi une liste donnée, tandis que la seconde affiche ces pairings .Voici une explication détaillée de chaque fonction.

#### III.4.4.1 Fonction `find_best pairings (pairings, count)`

Cette fonction sélectionne les meilleurs pairings en fonction d'un score calculé pour chaque pairing.

##### **Paramètre :**

`Pairings` : Une liste de dictionnaires représentant les pairings.

`Count` : Le nombre de meilleurs pairings à retourner.

##### **Logique :**

##### **`Calculate_pairing_score (pairing) :`**

Calcule un score pour chaque pairing en soustrayant le temps total de repos du temps total de service.

##### **Variables :**

`Total_service_time_seconds` : Le temps total de service en secondes.

`Total_rest_time_seconds` : Le temps total de repos en secondes.

`Score` : La différence entre le temps total de service et le temps total de repos.

Trie les s en fonction de leur score, du plus élevé au plus bas.

Sélectionne les count meilleurs pairings.

**Retour :**

Renvoie une liste des count meilleurs pairings triés par score.

```

def find_best_pairings(pairings, count):
    def calculate_pairing_score(pairing):
        total_service_time_seconds = pairing['total_service_sum'].total_seconds()

        total_rest_time_seconds = 0
        for rest_time in pairing['rest_times']:
            total_rest_time_seconds += rest_time.total_seconds()

        score = total_service_time_seconds - total_rest_time_seconds
        return score

    sorted_pairings = sorted(pairings, key=calculate_pairing_score, reverse=True)
    best_pairings = sorted_pairings[:count]
    return best_pairings

def display_pairings(pairings, output_widget):
    with output_widget:
        output_widget.clear_output()
        display(HTML(f"<h1>Best Tow Pairings :</h1>"))
        for idx, pairing in enumerate(pairings):
            display(HTML(f"<h2>Pairing {idx + 1}:</h2>"))
            display(HTML(f"Total Service Sum: {pairing['total_service_sum']}"))

            for i, service_period in enumerate(pairing['service_periods']):
                display(HTML(f"<h3>Service Period {i + 1}:</h3>"))
                display(HTML(f"<h4>Start: {service_period['debut_service']}</h4> <h4>End: {service_p

```

**Figure 10:** code pour l'algorithme d'optimisation



Figure 11: résultat d'optimisation

### III.5 Conclusion

L'utilisation du DFS dans la génération des périodes de service ainsi que les pairings légaux donne des solutions initiales du problème de l'appariement de l'équipage déjà optimisé, ce qui offre un avantage significatif en termes de collaboration et d'efficacité. Les résultats obtenus peuvent être une référence pour des travaux d'optimisés au future

## Conclusion Générale

L'optimisation des coûts d'une compagnie aérienne par l'appareillement de d'équipage revêt une importance cruciale pour les compagnies aériennes par ce qu'en résulte la réduction des coûts. En optimisant les itinéraires d'équipage, les compagnies aériennes minimisent les dépenses liées aux salaires, aux heures supplémentaires et aux frais de déplacement. Des économies significatives peuvent être réalisées, contribuant à la rentabilité globale de la compagnie. Pour l'efficacité opérationnelle, des équipages bien planifiés garantissent une meilleure gestion des vols, les retards et les annulations sont réduits, améliorant l'expérience des passagers.

L'appareillement de d'équipage tient compte des règles syndicales, des temps de vol maximum et des exigences légales. Une planification précise évite les conflits et les pénalités.

En respectant la qualité de service, Des équipages satisfaits et bien reposés offrent un meilleur service à bord. Cela renforce la réputation de la compagnie et fidélise les clients.

Nous résoudrons le problème de l'optimisation L'appareillement de d'équipage par ces étapes clés

### . 1. Compréhension du problème :

- Définition du L'appareillement de d'équipage : Un pairing est une séquence de vols connectables, effectués par la même flotte, et partant et arrivant à la même base d'équipage.

- Objectif : Générer des pairings couvrant autant de vols que possible dans une période de planification, tout en minimisant les coûts.

### 2. Modélisation :

- Formulation : Le problème peut être modélisé comme un programme linéaire binaire (BLP) où chaque vol est une variable de décision.

- La fonction objective : minimiser les dépenses tout en respectant les contraintes opérationnelles et réglementaires

- Contraintes : Les pairings doivent respecter les règles syndicales, les réglementations gouvernementales et les politiques de la compagnie.

### 3. Algorithmes :

- Phase 1 : algorithme basique qui calcule les périodes de services à l'aide d'une base de données contient 38 vols

- Phase 2 : algorithme qui génère autant de pairings légaux que possible.

- Phase 3 : algorithme qui optimise les pairings par rapport le temps de repos minimale et qui sélectionner le sous-ensemble optimal avec le coût le plus faible.

### 4. Résultats finaux :

Deux pairings optimal qui couvrent tous le vol avec un temps de repos minimal et respectant la condition de home base

Les compagnies aériennes obtiennent des itinéraires d'équipage efficaces, minimisant les coûts tout en respectant les contraintes et aussi les économies de coûts peuvent atteindre 3 à 15 %.

## **Perspective**

La recherche sur l'appareillement de d'équipage est essentielle car elle résout un problème complexe. Les compagnies aériennes doivent gérer des milliers de vols, des contraintes légales et des règles syndicales tout en minimisant les coûts. Cette recherche combine l'informatique, les mathématiques et la logistique. Elle nécessite des compétences en modélisation, en algorithmes et en gestion opérationnelle.

Les résultats de la recherche ont un impact direct sur les opérations aériennes. Des itinéraires d'équipage bien planifiés améliorent la ponctualité, la sécurité et la satisfaction des passagers

Cette recherche n'est que des résultats initiaux dont on peut les optimiser en utilisant plusieurs approches telles que les algorithmes génétiques.

## Reference

- [1] Zeren, B., & Özkol, I. (2016). A novel column generation strategy for large scale airline l'appareillement de d'équipage problems. *Expert Systems with Applications*, 55, 133-144.
- [2] Aggarwal, D., Saxena, D. K., Bäck, T., & Emmerich, M. (2023, March). Real-world airline l'appareillement de d'équipage optimization: customized genetic algorithm versus column generation method. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (pp. 518-531). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [3] Lu, D., & Gzara, F. (2015). The robust l'appareillement de d'équipage problem: model and solution methodology. *Journal of Global Optimization*, 62, 29-54.
- [4] Rosat, S. (2016). Méthodes pour favoriser l'intégralité de l'amélioration dans le simplexe en nombres entiers—application aux rotations d'équipages aériens. *Ecole Polytechnique, Montréal (Canada)*.
- [5] Aimeur, N. E. H. (2022). L'«adaptation inversée» à l'épreuve du développement professionnel des entreprises multinationales: le cas du personnel navigant de Turkish Airlines (Doctoral dissertation, Paris, HESAM).
- [6] Gillet, M. (2015). Le programme «Ciel unique européen»... au détriment du climat.
- [7] Deveci, M., & Demirel, N. C. (2018). A survey of the literature on airline l'appareillement de d'équipage scheduling. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 74, 54-69.
- [8] Kornilakis, H., & Stamatopoulos, P. (2002, March). L'appareillement de d'équipage optimization with genetic algorithms. In *Hellenic conference on artificial intelligence* (pp. 109-120). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [9] Agustin, A., Juan, A., Pardo, E.G., 2017. A variable neighborhood search approach for the l'appareillement de d'équipage problem. *Electron. Notes Discrete Math.* 58, 87–94.
- [10] AhmadBeygi, S., Cohn, A., Weir, M., 2009. An integer programming approach to generating airline l'appareillement de d'équipages. *Comput. Oper. Res.* 36 (4), 1284–1298.
- [11] Aickelin, U., 2002. An indirect genetic algorithm for set covering problems. *J. Oper. Res.Soc.* 53 (10), 1118–1126.
- [12] Akbari, M., Rashidi, H., Alizadeh, S.H., 2017. An enhanced genetic algorithm with new operators for task scheduling in heterogeneous computing systems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 61, 35–46
- [13] Aksoy, N., 2010. Pricing by local search in column generation for the airline l'appareillement de d'équipage problem. Submitted to the Graduate School of Engineering and Natural Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science. Sabanci University. August.
- [14] Aksu, Inayet Ozge, Çoban, Ramazan, 2013. Training the multifeedback-layer neural