



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES

## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de  
**Master En Mathématiques**

Option :

**Recherche Opérationnelle**

Thème

*Modélisation et résolution du problème  
d'affectation du personnel navigant*

Présenté par :

M<sup>lle</sup> BOUIEF SALIHA

M<sup>lle</sup> HEMICI MERIEM

Encadré par :

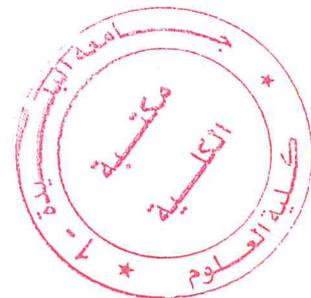
M<sup>me</sup> S.ARRACHE

Devant le jury :

Président : M<sup>r</sup> M.BLIDIA

Examinatrice : M<sup>me</sup> F.ADLI

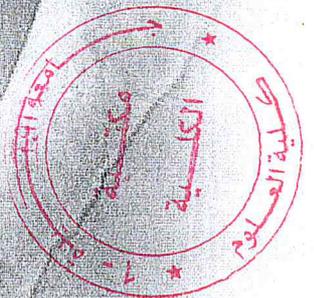
Promotrice : M<sup>me</sup> S.ARRACHE



## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à  
Mes très chers parents.  
Mes très chères sœurs.  
Mes très chers frères.  
A toute la famille.*

*Département des mathématiques,  
Tous mes amis, ainsi que toute la promotion du  
Master 2 en  
Recherche opérationnelle 2016/2017 de  
l'université de Blida.  
Mes très chères amies ainsi que Saliha.*



**Meriem**

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail à  
Mes très chers parents.  
Mes très chères sœurs.  
Mes très chers frères.  
A toute la famille.*

*Département des mathématiques.  
Tous mes amis, ainsi que toute la promotion du  
Master 2 en  
Recherche opérationnelle 2016/2017 de  
l'université de Blida.  
Mes très chères amies ainsi que Meriem.*

**Saliha**

# REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout ALLAH de nous avoir donné la volonté et le courage de finir ce mémoire.*

*Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.*

*Ces remerciements vont tout d'abord au corps enseignant et administratif du département des Mathématiques, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

*Toutes nos pensées de gratitude se dirigent vers notre promotrice Madame S.ARRACHE, qui en tant que directrice de mémoire, s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Nous sommes également reconnaissantes à Madame K.BEHADID et Madame H.CHAIB de la compagnie aérienne Air Algérie pour leur aide dans la description du problème traité ainsi que pour la mise à disposition de données réelles.*

*Nous tenons aussi à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre mémoire.*

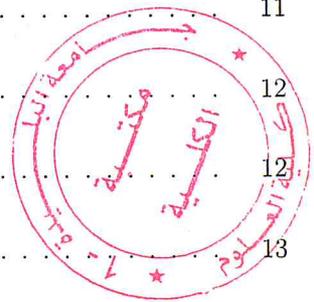
*Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos collègues et nos amis qui partagent avec nous les bons moments d'étude pendant cinq années.*

*Nous exprimons notre gratitude à tous nos proches qui nous ont toujours soutenues et encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Enfin, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire et que nous ne pouvons malheureusement citer, trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.*

## Table des matières

INTRODUCTION . . . . .	5
<b>I CONCEPTS DE BASE . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1 Introduction . . . . .	8
1.2 Présentation de la direction programme et surveillance des vols (DPSV) . . . . .	8
1.2.1 Structure de la DPSV . . . . .	8
1.2.2 Mission de la DPSV . . . . .	9
1.3 Notions de base . . . . .	11
1.3.1 Rotation . . . . .	11
1.3.2 La base . . . . .	12
1.3.3 Le personnel navigant (PN) . . . . .	12
1.3.4 La qualification machine . . . . .	13
1.3.5 Les alertes . . . . .	14
1.4 Conclusion . . . . .	17
<b>II PROBLÉMATIQUE . . . . .</b>	<b>18</b>
2.1 Introduction . . . . .	18
2.2 Construction d'un planning pour le personnel navigant . . . . .	18
2.2.1 Plan du travail d'une compagnie aérienne . . . . .	20



2.2.2	Création de rotation . . . . .	22
2.2.3	Affectation de rotations . . . . .	22
2.3	Problème d'affectation du personnel navigant de la compagnie aérienne «Air Algérie» . . . . .	23
2.3.1	Position du problème . . . . .	23
2.3.2	Régime de travail . . . . .	23
2.3.3	Etude de l'existant . . . . .	26
2.4	Objectifs . . . . .	27
2.5	Conclusion . . . . .	28
<b>III</b>	<b>MODÉLISATION DU PROBLÈME . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1	Introduction . . . . .	29
3.2	Notations et définitions . . . . .	29
3.2.1	Définition des variables . . . . .	30
3.2.2	Définition des contraintes . . . . .	30
3.3	La fonction objectif . . . . .	32
3.4	Le modèle mathématique . . . . .	32
3.5	Description du modèle . . . . .	33
3.6	Conclusion . . . . .	34
<b>IV</b>	<b>MÉTHODES DE RÉOLUTION . . . . .</b>	<b>35</b>
4.1	Introduction . . . . .	35

4.2	Classification des méthodes de résolution . . . . .	35
4.2.1	Les heuristiques . . . . .	36
4.2.2	Les méta-heuristiques . . . . .	38
4.3	Conclusion . . . . .	43
<b>V</b>	<b>RÉSOLUTION DU PROBLÈME . . . . .</b>	<b>44</b>
5.1	Introduction . . . . .	44
5.2	Choix des méthodes de résolution . . . . .	44
5.2.1	Génération de la solution initiale . . . . .	46
5.2.2	Amélioration de la solution initiale . . . . .	48
5.2.3	Organigramme de l'algorithme génétique . . . . .	48
5.3	Conclusion . . . . .	57
<b>VI</b>	<b>IMPLÉMENTATION ET RÉSULTATS . . . . .</b>	<b>58</b>
6.1	Introduction . . . . .	58
6.2	Environnement logiciel . . . . .	58
6.3	Présentation de l'application . . . . .	59
6.4	Les données . . . . .	59
6.5	Lancement de l'application . . . . .	60
6.6	Résultats obtenus . . . . .	81
6.7	Commentaires . . . . .	84
6.8	Conclusion . . . . .	84

CONCLUSION .....	86
ANNEXE1 .....	86
ANNEXE2 .....	87
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	88

## Introduction générale

La gestion du personnel navigant dans une compagnie aérienne représente un enjeu économique très important car la qualité des programmes de vols de chaque personnel navigant influe directement sur la rentabilité de l'activité de la compagnie.

Comme la gestion de ce dernier exige une grande organisation, la majorité des compagnies aériennes s'intéressent particulièrement au problème d'affectation du personnel navigant, connu également dans l'industrie du transport aérien sous le nom de « programme équipage », qui consiste à affecter à chaque navigant, de manière optimale si possible, un ensemble d'activités à savoir : les rotations (crew route), les alertes, les jours de repos, ou d'autres activités sur un horizon temporel (d'habitude un mois), tout en respectant le régime de travail de la compagnie.

Le cadre applicatif retenu ici est celui de l'affectation du personnel navigant technique et commercial au sein de la compagnie aérienne « Air Algérie ». Notre mission consiste à développer une solution, mathématique et informatique palliative aux inconvénients et aux défaillances du système actuel.

Nos objectifs se résument comme suit :

- Etablir un planning personnalisé équitable dans le but de couvrir le programme de vol du mois traité et présenter une solution réalisable qui intègre l'ensemble des contraintes relatives au régime de travail de la compagnie.

Compte tenu de la taille considérable du modèle mathématique de notre problème, la résolution par une méthode exacte s'avère inapplicable. De ce fait, nous avons opté pour des approches de résolution. L'approche de résolution que nous avons choisi comporte deux étapes:

La première étape consiste à utiliser deux heuristiques à savoir : « personnel navigant par personnel navigant » et « rotation par rotation », pour la génération d'une solution de départ. La solution obtenue peut être améliorée, à la seconde étape, par les performances de l'algorithme génétique. Pour mieux intégrer la méthode de résolution proposée, nous avons développé une application nommée « Affectation du personnel navigant » permettant l'affectation automatique des activités nécessaires au personnel navigant, et de créer un planning personnalisé pour chaque navigant. Cette application a été implémentée à l'aide du logiciel MATLAB, et testée sur une série de données réelles de la compagnie aérienne « Air Algérie ».

Le présent mémoire sera organisé autour de six chapitres :

Le premier chapitre se veut, une introduction générale de la compagnie « Air Algérie », objet de notre étude. Certains concepts liés à notre étude y seront également définis.

Nous aborderons dans le second chapitre la problématique dans deux cas : cas général et cas particulier de la compagnie « Air Algérie » : Le régime de travail, présentation du logiciel AIMS et de ses inconvénients, ainsi que les objectifs posés.

Dans le troisième chapitre, nous procéderons à la modélisation mathématique du problème selon le régime de travail de la compagnie et l'objectif à atteindre.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation générale des heuristiques que nous avons choisies pour la résolution de notre problème.

Dans le cinquième chapitre, nous présenterons toutes les étapes de réalisation de la méthodologie développée, basée sur l'algorithme génétique.

Le dernier chapitre sera consacré à la description du logiciel que nous

avons réalisé pour mettre en œuvre la solution développée.

Et enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

On trouvera en annexe un certain nombre d'outils qui nous ont été nécessaires pour la réalisation de ce travail ainsi que les différents documents réalisés.

# CHAPITRE I

## CONCEPTS DE BASE

### *1.1 Introduction*

Ce chapitre se veut une définition de quelques termes utilisés dans notre recherche en donnant une description générale des tâches et des missions de la direction programme et surveillance des vols, objet de notre étude.

### *1.2 Présentation de la direction programme et surveillance des vols (DPSV)*

#### **1.2.1 Structure de la DPSV**

La DPSV est structurée comme suit:

- Département flotte composé de deux services:
  - Service conception flotte.
  - Service suivi flotte.
- Département surveillance des vols.
- Département transport.
- Département conception personnel navigant commercial.
- Département conception personnel navigant technique.
- Service suivi personnel navigant.
- Cellule AIMS.

### 1.2.1.1 Organigramme de la DPSV

Le schéma suivant décrit l'organigramme de la DPSV:

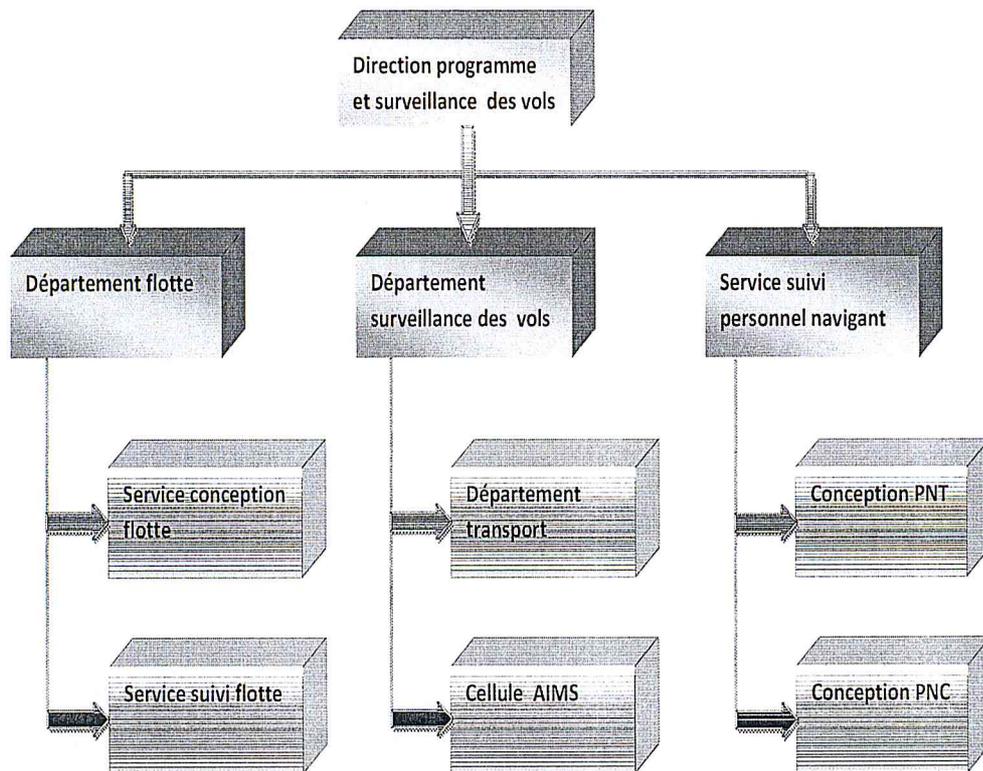


Fig1: Organigramme de la DPSV.

### 1.2.2 Mission de la DPSV

La DPSV a pour mission de :

- Mettre en œuvre un programme d'exploitation optimal.
- Elaborer des plannings individuels du personnel navigant (programme équipage) à partir de:
  - Construction des rotations équipages appelées aussi «Aircraf route» (recouvrement des vols).
  - Affectation des rotations du personnel navigant appelées aussi Crew route «Crew route».

- Contrôler le programme des vols des équipages.
- Utiliser la base de données des avions et des équipages.
- Evaluer le programme d'exploitation.
- Obtenir des créneaux horaires de la compagnie.
- Suivre le personnel navigant.

Le schéma ci-dessous illustre les différentes fonctions de la DPSV:

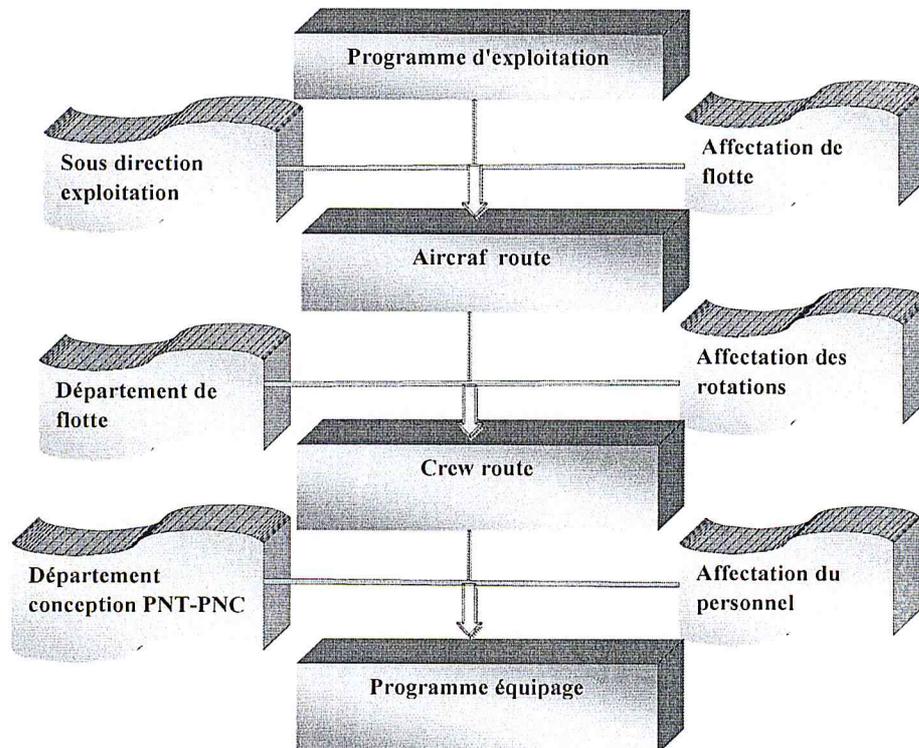


Fig2: Cheminement de travail de la DPSV.

### 1.3 Notions de base

### 1.3.1 Rotation

ou encore crew route est l'activité aérienne qui consiste à effectuer un ou plusieurs services de vols avec retour à la base d'affectation. Un crew route peut se caractériser par:

- Le numéro du crew route (son identifiant).
- Le secteur d'avion du crew route. On distingue:
  - Les gros porteurs (GP): B767, A335, A332, A330.
  - Les moyens porteurs (MP): B738, B737, B736, B148, B144.
  - Les petits porteurs (PP): AT72, ATR6.
- La longueur du crew route (donnée en jour).
- Les dates et les heures de départ et d'arrivé.
- La fréquence de rotation (crew route) (par semaine).
- Une capacité (nombre de navigants nécessaire pour couvrir un crew route).

On peut encore citer les différents types de rotation (crew route) (voir Tab1):

Type du crew route	Définition
<b>Crew route tardif</b>	Est un crew route dont la fin d'activité de vol est au-delà de 21 :00h.
<b>Crew route matinal</b>	Est un crew route dont le début d'activité de vol est effectué entre 5.00h et 7.00h.
<b>Crew route très matinal</b>	Est un crew route dont le début d'activité de vol est effectué entre 00.00h et 4.00h.
<b>Crew route de nuit</b>	Est un crew route dont la période est sur deux jours ou plus.
<b>Crew route multi</b>	Est un crew route qui peut s'effectuer sur plusieurs types d'avion.
<b>Les night stop</b>	Est un crew route d'une période de deux jours dont la totalité ou une partie d'activité de vol s'effectue entre 21.00h et 5.00h.

Tab1: Les différents types du crew route.

### 1.3.2 La base

La base est le point de départ et de retour pour un personnel navigant effectue un crew route.

Actuellement, la compagnie «Air Algérie» utilise quatre bases suivantes: Alger (ALG), Annaba (AAE), Constantine (CZL), Oran (ORN).

### 1.3.3 Le personnel navigant (PN)

Le personnel navigant (PN) appelé aussi équipage est divisé en deux catégories:

#### 1. Personnel navigant technique (PNT)

C'est le personnel qui se trouve dans la cabine de pilotage de l'avion afin d'assurer la conduite de celui-ci et le retour à destination. Il est composé de:

- Le commandant de bord (CP).
- Le copilote (FO).
- Le mécanicien navigant (FE).
- Le radio navigant (RN).

## 2. Personnel navigant commercial (PNC)

C'est le personnel qui se trouve dans la cabine de bord. Il est composé de:

- Chef de cabine principale (PC).
- Chef de cabine (CC).
- Les stewards et les hôtesse de bord (flight attendant) (FA).

### 1.3.4 La qualification machine

Est l'aptitude d'un navigant à assurer les différentes activités à un secteur d'avion. On distingue:

- a La qualification primaire : C'est la qualification principale d'un navigant définie par: son expérience, sa compétence, sa formation, etc.
- b La qualification secondaire : Elle permet au même navigant d'assurer ses activités dans les autres secteurs.

#### 1.3.4.1 Répartition de l'ensemble du personnel

La répartition du PN se fait par secteur suivant leur qualification primaire. Un navigant appartient à un secteur donné selon sa qualification primaire peut aussi opérer dans un autre secteur.

1.3.4.2 Répartition de l'ensemble du personnel navigant technique et commercial (PNT-PNC)

Pour bien comprendre comment se fait la répartition du PNT-PNC de la compagnie «Air Algérie», le tableau suivant illustre les différentes répartitions du PNT-PNC par secteur:

Secteur PN		GP				MP				PP		
		B767	A330	A332	A335	B738	B737	B736	B148	B144	AT72	ATR6
P N T	CP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	FE											
	RN											
P N C	PC		✓	✓	✓							
	CC					✓	✓	✓	✓	✓		
	FA		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tab2: Répartition du PNT-PNC par secteur.

1.3.5 Les alertes

Les alertes représentent les périodes durant laquelle le PN est à la disposition de la compagnie pour effectuer un crew route. On dénote:

- Les alertes du type «A»: Appelées alertes terrain se caractérisent par la présence du navigant alerté sur le terrain pendant quatre heures. Ce type d'alertes est établi par le service surveillance des vols.
- Les alertes du type «S»: Appelées alertes maison se caractérisent par la présence du navigant alerté à sa maison en attente d'un

appel et ce durant quatorze heures. Ce type d'alertes est établi par le service suivi dans le cas où l'indisponibilité du navigant est donnée en quelques jours auparavant.

- La fin d'amplitude «->»: définit le chevauchement de l'alerte sur le jour suivant.

Généralement, elle est recommandée pour effectuer des crew route d'une période de deux ou trois jours.

La compagnie «Air Algérie» utilise une structure spécifique pour programmer les alertes. On distingue deux types de structure d'alertes:

- Une structure de la forme «S» pour le PNT tel que:
  - Une alerte du type «S» doit être affectée à un navigant le premier jour.
- Une structure de la forme «AS->» pour le PNC tel que:
  - Une alerte du type «A» doit être affectée à un navigant le premier jour.
  - Une alerte du type «S» doit être affectée à un navigant le deuxième jour.
  - Une fin d'amplitude «->» doit être affectée à un navigant le troisième jour.

#### *1.3.5.1 Répartition des alertes*

Les alertes sont aussi réparties selon le secteur associé au PN (PNC-PNT) (voir Tab3 et Tab4):

TYPE	Alertes Terrain «A»						
	Secteur\PN	5:00h	7:00h	11:00h	15:00h	19:00h	
P	PC	GP	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous
		MP					
		PP					
N	CC	GP					
		MP	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous
		PP					
C	FA	GP	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous
		MP	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous
		PP	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous

Tab3: Répartition des alertes du type «A» par secteur.

Type d'alertes		Alertes Maison «S»					
Heures d'alertes		5:00h			13:00h		
Secteur d'avion		GP	MP	PP	GP	MP	PP
P N T	CP	A330-A332-A335	Tous	Tous		Tous	AT72
	FO	A330-A332-A335	Tous	Tous		Tous	AT72
	FE						
	RN						
P N C	PC	Tous			Tous		
	CC		Tous			Tous	
	FA	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous	Tous

Tab4: Répartition des alertes du type «S» par secteur.

#### *1.4 Conclusion*

Ce chapitre introductif présente toutes les notions de base utilisées dans l'élaboration de ce mémoire.

## CHAPITRE II

### PROBLÉMATIQUE

#### *2.1 Introduction*

Dans ce chapitre nous allons présenter le problème de construction de plannings pour le personnel navigant d'une manière générale. En particulier, le problème d'affectation du personnel navigant au sein de la compagnie aérienne « Air Algérie », activité accomplie moyennant le logiciel AIMS.

Nous allons également présenter le logiciel AIMS ainsi que ses inconvénients. Enfin nous allons exposer nos objectifs qui visent à développer une solution permettant de pallier aux insuffisances du logiciel actuel et offrant un outil plus performant.

#### *2.2 Construction d'un planning pour le personnel navigant*

Comme la planification et la gestion des ressources humaines jouent un rôle très important dans la productivité et la compétitivité des entreprises, ce problème attire considérablement l'attention des compagnies aériennes et fait l'objet d'intérêt de la recherche opérationnelle.

Ce problème appartient à la classe NP-difficile, car il n'est pas facile d'obtenir une solution exacte en temps raisonnable.

Néanmoins, avec le développement des performances des ordinateurs, des études ont été établies dans le domaine de la programmation mathématique (programmation linéaire, programmation entière, . . .) et dans le domaine de l'intelligence artificielle (programmation logique, recuit simulé, algorithme génétique, . . .).

### 2.2.0.2 Les différents types de plannings

On distingue deux types de plannings les plus utilisés par les compagnies aériennes :

#### 1. Le tableau de service:

Le tableau de service est le programme de travail de chaque employé sur une période de temps donnée (en général un mois) (voir Tab5).

PN \ Jour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Personnel navigant 1	M	M	S	M	N	N	R	R	N	S	M	S	S	R	S
Personnel navigant 2	M	N	S	N	R	M	M	S	M	M	N	R	R	S	N
Personnel navigant 3	M	S	N	R	N	S	S	S	N	R	M	S	N	N	N
Personnel navigant 4	S	M	S	S	N	R	N	N	N	S	S	R	M	M	M

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
M	M	S	M	N	N	R	R	N	S	M	S	S	R	S
M	N	S	N	R	M	M	S	M	M	N	R	R	S	N
M	S	N	R	N	S	S	S	N	R	M	S	N	N	N
S	M	S	S	N	R	N	N	N	S	S	R	M	M	M

(M=matin; S=soir; R=repos)

Tab5: Exemple du tableau de service.

#### 2. Le tableau de grille de travail

Le tableau de grille de travail est le programme de travail et de repos non nominatif sur un nombre entier de semaines, si les horaires individuels sont périodiques (cycliques) on obtient «tableau de grille de travail cyclique » sinon acyclique (voir le Tab6).

Semaine	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
1	M	M	S	M	N	R	R
2	S	N	S	N	R	M	M
3	M	S	N	R	R	S	S
4	N	R	R	M	S	M	S

(M=matin; S=soir; R=repos)

Tab6: Exemple du tableau de grille de travail cyclique.

### 2.2.1 Plan du travail d'une compagnie aérienne

La création de plannings est une problématique complexe, d'une part à cause de sa grande taille et d'autre part à cause de la complexité des contraintes de la réglementation du travail.

Pour diminuer cette complexité, la plupart des compagnies aériennes ont divisé ce problème en deux sous-problèmes : problème de création de rotations («crew pairing», en anglais) et problème d'affectation de ces dernières au personnel navigant («crew rostering» en anglais).

Chacun de ces deux sous-problèmes doit respecter les contraintes imposées par le code du travail d'une compagnie aérienne. Ces contraintes peuvent être divisées en deux catégories suivant leur importance : contraintes dures et contraintes souples.

- Les contraintes dures: sont pour fixer le code du travail et la validité de plannings, donc elles doivent être respectées impérativement.
- Les contraintes souples: sont pour améliorer la qualité de plannings.

Le problème de construction de planning couvre un horizon temporel typiquement un mois calendaire et concerne tout le personnel navigant

d'une compagnie aérienne et tous les vols à effectuer au cours de ce mois.

Pour mieux comprendre la problématique de planification dans les réseaux aériens, le schéma suivant illustre le plan de travail d'une compagnie aérienne.

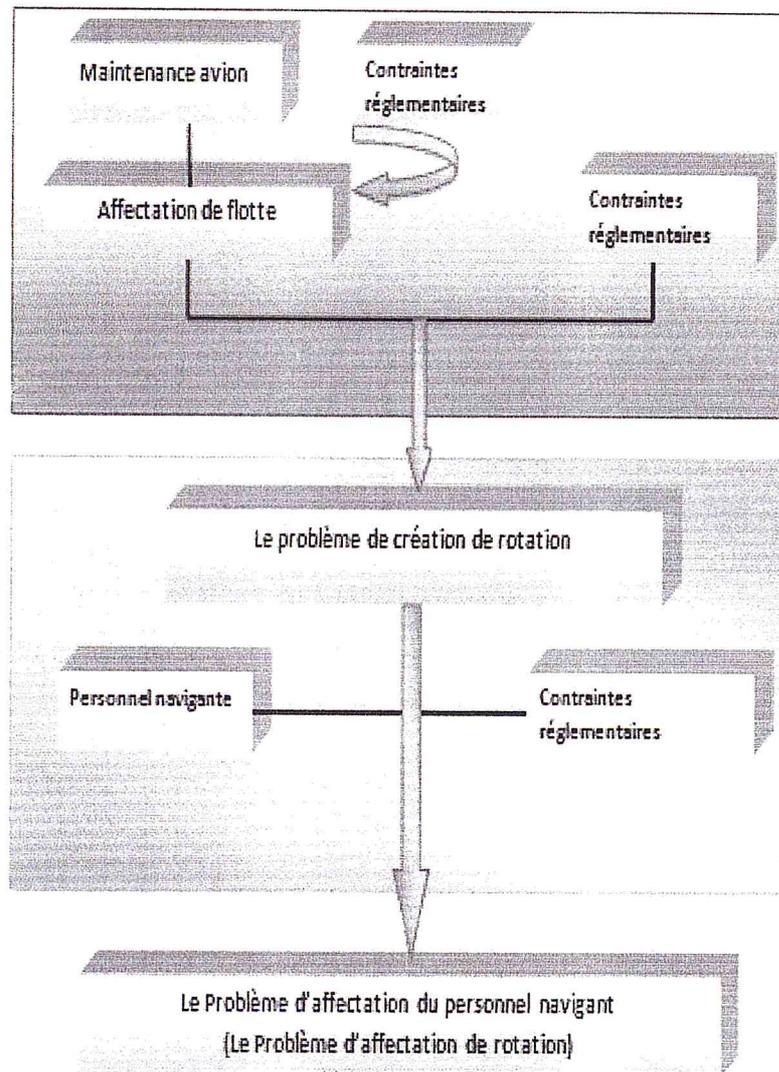


Fig3: Schéma général du problème de planification.

### 2.2.2 Création de rotation

Création de rotations est un problème qui consiste à créer de rotations à partir d'une liste de vols programmée sur une période de temps donnée. Ce problème est complexe, habituellement résolu en deux étapes principales:

- La première étape: sert à grouper les vols programmés par la compagnie aérienne dans des journées de travail ou période de service.
- La seconde étape: enchaîne les journées de travail de façon à générer des rotations.

Le problème de rotation est un problème complexe, sa complexité est exponentielle. Dans la littérature, il a été modélisé comme un problème linéaire en variables mixtes et entières et résolu par la méthode de «génération de colonnes ». L'objectif de ce problème est de trouver des rotations couvrant tous les vols de la compagnie aérienne dont la qualité de rotation est jugée selon le nombre de rotation créées, la durée totale de rotation en le nombre de vol de mise en place utilisé [1].

### 2.2.3 Affectation de rotations

Le problème d'affectation de rotation consiste principalement à affecter aux personnels navigants toutes les rotations programmées, issues de la résolution du problème de création des rotations, sur un intervalle de temps donné de manière à respecter les contraintes réglementaires et la disponibilité des navigants, en prenant en considération leurs activités pré-affectées (réunion, congé de maladie, périodes de stage ou formation, . . . ), leurs qualifications et parfois même leurs préférences, ceci en fixant certains objectifs à atteindre. Dans la littérature, de nombreuses modélisations et techniques de résolution ont été établies pour l'étude

et la résolution de ce genre du problème.

### **2.3 Problème d'affectation du personnel navigant de la compagnie aérienne «Air Algérie»**

Notre travail s'est focalisé sur le problème d'affectation du personnel navigant.

#### **2.3.1 Position du problème**

L'affectation du personnel navigant de la compagnie Air Algérie est effectuée mensuellement. Ce qui constitue l'essentiel de l'activité du département «conception personnel navigant»; activité accomplie moyennant le logiciel AIMS.

En veillant que tous les crew routes (rotations) soient couverts exactement une fois et que la distribution de la charge de travail entre les différents membres du personnel navigant soit équitable, tout en respectant au mieux le régime de travail de la compagnie aérienne.

#### **2.3.2 Régime de travail**

Représente l'ensemble des règles auxquelles est régi le personnel navigant.

- Les repos légaux

Dans un repos légal, le navigant est dispensé de tout service. On distingue quatre types de repos :

##### **1. Repos légal hebdomadaire (RH):**

C'est une durée de repos de 24h durant laquelle le membre du personnel navigant ne peut être programmé. Un navigant dispose d'un repos légal hebdomadaire (RH) dans les cas suivants :

- pendant le mois, il doit disposer sept jours de repos (RH) dont deux vendredis.

- Après une période de travail de six jours successifs, le jour suivant est un RH.
- S'il est en visite médicale, il dispose d'un RH le jour précédant et suivant cette visite.

2. Le temps de repos post-récupération :

D'une durée de 24 heures, ce temps de repos est accordé le jour suivant l'exécution d'un crew route d'une durée minimale de trois jours.

Il est décompté dès la fin de la période de service de vol ramenant le PN à sa base d'affectation.

3. Le temps de repos pré-récupération :

D'une durée de 24 heures, ce temps de repos est accordé au PN le jour précédent l'exécution d'un crew route très matinal (dont le début de service de vol est entre 00.00h et 4.00h). Il est décompté avant la période de service de vol.

4. Le temps de repos entre deux crew route successifs:

Ce temps est accordé à la fin d'un crew route ou d'une alerte programmée. Il est d'une durée minimale de:

- 13 heures consécutives s'il s'agit d'un crew route tardif (dont la fin de service de vol est après 21.00h).
- 11 heures consécutives s'il s'agit d'un crew route ordinaire.

La période de récupération:

C'est une période de repos de 24 heures durant laquelle le navigant peut effectuer avec son accord un éventuel crew route.

Les contraintes règlementaires:

Le personnel navigant est soumis à une réglementation qui lui assure certaines normes de sécurité. Soient quelques contraintes importantes:

- Un PN ne doit en aucun cas être programmé pour deux couchés consécutifs.
- Pour chaque PN le nombre de structures d'alertes ne doit pas dépasser quatre par mois.
- L'affectation du PN à un crew route dépend de ses qualifications machine (primaires et secondaires). Son traitement dépend des contraintes liées aux différents secteurs.
- Tenir compte de l'ensemble des règles relatives au régime du travail:
  - Le PN doit bénéficier de sept jours de repos (RH) pendant le mois dont un vendredi et un samedi pour le PNT et deux vendredis pour le PNC.
  - Après une période de six jours de travail successifs, le PNT doit bénéficier deux jours de repos et le PNC doit bénéficier d'un jour de repos.
  - S'il est en visite médicale, il dispose d'un RH le jour précédant cette visite médicale ainsi que le jour suivant.
  - Prendre en considération le temps de repos nécessaire entre deux crew route consécutifs.
  - Accorder un jour de repos post-récupération à l'issue d'un crew route d'au moins trois jours.
  - Accorder un jour de repos pré-récupération avant l'exécution d'un crew route très matinal.

### 2.3.3 Etude de l'existant

L'affectation du personnel navigant de la compagnie «Air Algérie» est effectuée mensuellement. Ce qui constitue l'essentiel de l'activité du service «conception personnel navigant», activité accomplie moyennant le logiciel AIMS.

Le logiciel AIMS acquis depuis les années 80.

Actuellement, le logiciel AIMS s'avère inapplicable en raison de non-respect du règlement de travail.

#### 2.3.3.1 Fonction du logiciel AIMS

Les différentes étapes de l'adaptation du logiciel AIMS sont les suivantes:

- Accrochage entre le mois  $m$  et  $m+1$ .
- Introduction des données: visites médicales, congés, desiderata. . . .
- Couverture de vols particuliers (EX: JED, DAM, SVO, DBX, BKO. . . .
- Affectation automatique des crew route au PN (lancement du logiciel).
- Correction manuelle des erreurs produites pendant le lancement:  
Arrivées tardives, night stop successifs, repos regroupés. . . .
- Couverture manuelle des vols dépourvus (que le logiciel n'a pas affecté aux vols supplémentaires).
- Finition du programme: équilibre manuel des:
  - Night stop.
  - Heures de vols.
  - Vols nationaux \ internationaux.

- Remise des programmes aux chefs de secteurs.
- Validation des programmes.
- Affichage.
- Traitement des réclamations du PN.

#### *2.3.3.2 Les inconvénients du logiciel AIMS*

- Non-respect des contraintes: On peut citer quelques contraintes violées par le logiciel AIMS par exemple: les night stop successifs, les arrivées tardives.
- Non-équité des heures de vol : le programme équipage crée n'est pas équitable au plan de la distribution du temps de vol. Par exemple, certains PN ont plus d'heures de vol que d'autres.
- La surcharge de travail: chaque étape de l'élaboration du programme équipage nécessite un certain délai. Pour respecter ces délais, on est obligé de violer certaines contraintes. Par exemple: au lieu d'accorder deux vendredi de libre à un PN, on lui accorde un seul vendredi.
- Traitement manuelle: l'affectation du PN se fait manuellement. A chaque fois, le département est obligé de corriger les affectations résultantes du logiciel AIMS.

Ainsi, le logiciel AIMS se retrouve, actuellement, réduit à l'utilisation d'une seule fonctionnalité, à savoir le stockage de données, quant à l'affectation, elle est effectuée manuellement.

## **2.4 Objectifs**

Notre mission consiste à développer une solution palliative aux insuffisances et aux défaillances du système actuel. Cette solution ne saurait être efficace que si elle intègre l'ensemble des paramètres et des

contraintes inhérents au système actuel, en incluant ceux non supportés, à savoir :

- La gestion des alertes afin d'assurer le bon déroulement du programme prévu.
- Les contraintes relatives aux qualifications du PN (qualifications primaires et secondaires. Voir chapitre I).

De plus, cette solution devra assurer :

- La couverture de l'ensemble des activités : crew route, alertes, périodes de repos, congés annuels, périodes de formation, réunions syndicales . . . par le personnel navigant correspondant fixé par la compagnie.
- Notre objectif consiste également à réaliser un programme PN équitable et équilibré pour un meilleur rendement à savoir :

La répartition équitable des heures de vols, des « night stop » et des vols intérieurs et internationaux.

## *2.5 Conclusion*

Ce chapitre a été consacré à la présentation générale du problème de planification du personnel navigant. En particulier, le problème d'affectation du personnel navigant au sein de la compagnie aérienne Air Algérie qui fait l'objet de notre recherche ainsi que le régime de travail et les objectifs fixés.

## CHAPITRE III

### MODÉLISATION DU PROBLÈME

#### *3.1 Introduction*

A l'issue de la présentation descriptive du problème d'affectation du personnel navigant posé par la compagnie «Air Algérie», nous exposerons ultérieurement la modélisation du problème en question [2].

Nous allons d'abord définir les paramètres et les variables relatives à notre problème. Ensuite, nous allons énumérer les contraintes à respecter ainsi que l'objectif à atteindre.

#### *3.2 Notations et définitions*

##### 1. Notation des indices

- $i$  : un personnel navigant.
- $j$  : un crew route (rotation).
- $l$  : un jour du mois.

##### 2. Notation des ensembles

- $N$  : ensemble des personnels navigants  $N = \{1, 2, \dots, n\}$ .
- $M$  : ensemble des crew route  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ .
- $L$  : ensemble de jours du mois  $L = \{1, 2, \dots, l\}$ .
- $K$  : ensemble des alertes programmées dans le mois.
- $S$  : ensemble des crew route chevauchés.

### 3. Notation des paramètres:

$C_j$  : le nombre du personnel navigant nécessaire pour effectuer  $j$ .

$d_j$  : le temps de vol du crew route  $j$ .

$d_{\max}$  : le temps de vol maximum par mois pour tous navigant.

$t_j$  : la longueur du crew route  $j$  (donnée en jour).

#### 3.2.1 Définition des variables

Soient les variables suivantes:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le personnel navigant } i \text{ est affecté au crew route } j. \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
$$q_{jl} = \begin{cases} 1 & \text{si la rotation } j \text{ commence le jour } l. \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$
$$\rho_{rs} = \begin{cases} 1 & \text{si la rotation } r \text{ chevauchée avec la rotation } s. \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

On définit la variable réelle :

$Y_{pq} \in R^+$  : qui représente la différence en temps de vol mensuel entre le navigant  $p$  et le navigant  $q$ .

#### 3.2.2 Définition des contraintes

##### 1. Contrainte de capacité

Cette contrainte assure que chaque crew route  $j$  est couvert en l'affectant à un nombre  $C_j$  du PN.

$$\sum_{i \in N} x_{ij} = C_j \quad \forall j \in M$$

On distingue deux cas:

- $C_j = 1$  pour le PNT.

- $C_j \geq 1$  pour le PNC.

## 2. Contrainte limitant le temps de vol

Cette contrainte assure que pour chaque PN le temps de vol mensuel ne doit pas dépasser  $d_{\max}$ .

$$\sum_{j \in M} d_j x_{ij} \leq d_{\max} \quad \forall i \in N.$$

## 3. Contrainte limitant le temps de repos

Cette contrainte assure que chaque PN qui travaille six jours consécutifs, doit être libre le septième jour.

$$\sum_{j \in M} t_j x_{ij} \sum_{l=p}^{p+6} q_{jl} \leq 6 \quad \forall p = \overline{1, 24} \quad \forall l = \overline{1, L} \quad \forall i = \overline{1, n}$$

## 4. Contrainte relative au non-chevauchement

Cette contrainte assure que deux crew route ne doivent pas être chevauchés.

$$x_{ij} \sum_{s \in S} \rho_{js} x_{is} (s - j) = 0 \quad \forall i \in N \quad \forall j \in M$$

## 5. Contrainte relative aux alertes

Cette contrainte assure que le nombre total des alertes programmées mensuellement ne doit pas dépasser quatre pour chaque personnel navigant.

$$\sum_{j \in K} x_{ij} \leq 4 \quad \forall i \in N$$

On distingue deux cas:

-Quatre alertes relatives au structure du type «S» pour le PNT.

-Quatre alertes relatives au structure du type «AS->» pour le PNC.

### 3.3 La fonction objectif

L'objectif est de minimiser la différence en temps de vol entre tous les couples de navigants.

L'expression de la fonction objectif est la suivante:

$$Min(Z) = \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{q=p+1}^n \left| \sum_{j=1}^m d_j (x_{pj} - x_{qj}) \right|$$

On introduit la variable réelle positive :

$$Y_{pq} = \left| \sum_{j=1}^m d_j (x_{pj} - x_{qj}) \right| \quad \text{Avec } p = 1 \dots (n - 1), q = (p + 1) \dots n.$$

Ainsi la fonction objectif est formulée sous la forme suivante :

$$Min(Z) = \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{q=p+1}^n Y_{pq}$$

### 3.4 Le modèle mathématique

Notre modèle peut s'écrire comme un programme linéaire à variables mixtes sous la forme suivante:

$$\left. \begin{aligned}
Min(Z) &= \sum_{p=1}^{n-1} \sum_{q=p+1}^n Y_{pq} \\
\sum_{i=1}^n x_{ij} &= C_j & \forall j = \overline{1, m} \\
\sum_{j=1}^m d_j x_{ij} &\leq d_{\max} & \forall i = \overline{1, n} \\
\sum_{j \in K} x_{ij} &\leq 4 & \forall i = \overline{1, n} \\
\sum_{j=1}^m t_j x_{ij} \sum_{l=p}^{p+6} q_{jl} &\leq 6 & \forall p = \overline{1, 24} \quad \forall l = \overline{1, L} \quad \forall i = \overline{1, n} \\
x_{ij} \sum_{s \in S} \rho_{js} x_{is} (s - j) &= 0 & \forall i = \overline{1, n} \quad \forall j = \overline{1, m} \\
\forall x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall \rho_{js} \in \{0, 1\}, \forall q_{jl} \in \{0, 1\}
\end{aligned} \right\}$$

### 3.5 Description du modèle

#### 1. Nature du problème

Etant donné que les contraintes et l'objectif sont linéaires, le problème du programme équipage conduit à un programme linéaire à variables mixtes: des variables binaires pour représenter le choix d'affectations et des variables réelles pour représenter les dates et les durées.

#### 2. Taille du problème

-Taille des variables

$$TV = m * (n + |S| + |L|).$$

-Taille des contraintes

$$TC = 2 * n * m * (|S| + 5) + n * (|K| + 3) + m.$$

#### 1. Exemple (cas du PNT)

- Le nombre des personnel navigant =57.
- Le nombre de rotations =583.
- Le nombre de jours du mois = 31.
- Le nombre d'alertes =93.

Le nombre des variables est: 105523.

Le nombre des contraintes est: 6680185

### 3.6 Conclusion

La résolution du problème de l'affectation du PN par une méthode exacte s'avère inapplicable vu l'espace mémoire nécessaire pour stocker les données et l'importance du temps d'exécution. De ce fait, nous avons choisi des méthodes approchées pour résoudre ce problème. Ces dernières permettant d'obtenir une bonne solution en un temps raisonnable.

## CHAPITRE IV

### MÉTHODES DE RÉOLUTION

#### *4.1 Introduction*

Le but de ce chapitre est de présenter d'une manière générale une classe de méthodes de résolution du problème de l'affectation du PN: les heuristiques et les méta-heuristiques.

#### *4.2 Classification des méthodes de résolution*

Les méthodes proposées pour la résolution de notre problème peuvent être schématisées comme suit:

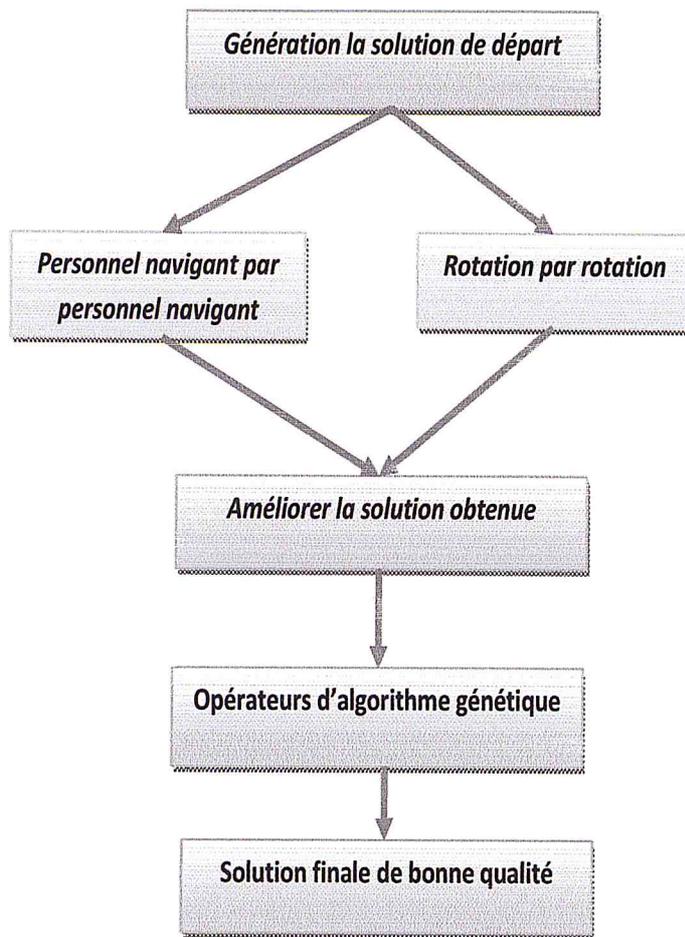


Fig4: Classification des méthode de résolution.

#### 4.2.1 Les heuristiques

Une méthode heuristique est un algorithme qui a pour but de générer une solution de départ tenant compte de la fonction objectif mais sans garantie d'optimalité.

Dans notre cas, deux heuristiques sont élaborées pour donner une solution de départ au problème en question:

- Heuristique «Personnel navigant par Personnel navigant».
- Heuristique «Rotation par Rotation».

#### 4.2.1.1 Heuristique «PN par PN»

Ou encore «Pilot by Pilot» [6], cette heuristique consiste à affecter mensuellement à chaque navigant les affectations possibles à partir d'une liste des individus organisée à l'avance, en se basant sur le principe de trouver la première affectation pour le premier navigant , puis la deuxième affectation pour le second,...et ainsi de suite. Cette procédure s'arrête lorsque les personnes de la liste correspondante sont tous affectés.

L 'algorithme suivant décrit le fonctionnement de cette méthode:

*Etape1:* Choisir un personnel navigant (PN) parmi la liste des navigants.

*Etape2:* Affecter le personnel navigant choisi aux rotations spécifiques en respectant les contraintes du travail.

*Etape3:* Eliminer ce personnel navigant et toutes les rotations effectuées par lui.

*Etape4:* Tester si les navigants de la liste sont tous affectés pour les rotations programmées. Stop, sinon aller à l'étape1.

Fig5: le fonctionnement de l'heuristique PN par PN.

#### 4.2.1.2 Heuristique «Rotation par Rotation»

Ou encore «Pairing by Pairing» [4], cette heuristique imite l'heuristique «PN par PN». Elle consiste à assigner la première rotation au premier personnel navigant qualifié puis d'assigner la deuxième rotation à un autre personnel navigant et ainsi de suite, tout en respectant la réglementation de travail.

La méthode «Rotation par Rotation» comporte les étapes suivantes:

*Etape 1:  $k=1$ .*

*Etape 2: Assigner la rotation  $k$  pour un personnel navigant actif choisi aléatoirement parmi la liste des navigants, en éliminant le personnel navigant affecté pour la rotation  $k-1$ , tout en respectant les contraintes.*

*Etape 3:  $k=k+1$ .*

*Etape 4: si  $k>n$  stop. Sinon, aller à l'étape 02.*

Fig6: le fonctionnement de l'heuristique Rotation par Rotation.

#### 4.2.2 Les méta-heuristiques

Par définition, une méta-heuristique est un ensemble de concepts qui peut être utilisée pour définir une méthode heuristique appliquée à un ensemble de différents problèmes.

##### 4.2.2.1 L'algorithme génétique

Cette classe de méthode a été inventée par Holland [3] dans les années soixante, pour imiter les phénomènes d'adaptation des êtres vivants. L'application aux problèmes d'optimisation a été développée en suite par Goldberg [5].

L'algorithme génétique est un algorithme d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle: sélection, mutation, croisement, inversement, etc.

Contrairement à la plupart des autres méthodes, l'algorithme génétique ne considère pas une seule configuration à la fois, mais toute une population de configuration.

Pour utiliser l'algorithme génétique, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- Un principe de codage de l'élément de population.
- Un mécanisme de génération de la population initiale.
- Une fonction à optimiser, appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.
- Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et l'exploration de l'espace d'état.
- Des paramètres de dimensionnement: taille de la population, critère d'arrêt, etc.

Schéma général

1. Initialisation: une population initiale de N chromosomes est tirée.
2. Evaluation: chaque chromosome est décodé puis évalué.
3. Sélection: la possibilité de l'inversement, mutation, croisement au sein de la population actuelle, et pris le reproduire.
4. Retour: à la phase d'évaluation jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

#### *4.2.2.2 Le codage*

Il est courant, pour les algorithmes génétiques, de distinguer deux types de codages: le codage binaire et le codage réel.

Pour les problèmes d'optimisation dans des espaces de grande dimension, le codage binaire peut rapidement devenir mauvais.

Généralement, chaque variable est représentée par une partie de la chaîne de bits et la structure du problème n'est pas bien reflétée, l'ordre

des variables a une importance dans la structure du chromosome alors qu'il n'en a pas forcément dans la structure du problème.

Ainsi les algorithmes génétiques utilisant le codage réel évitent ce problème en conservant les variables du problème dans le codage de l'élément de la population [5].

#### 4.2.2.3 *La fonction fitness*

Le choix de la fonction fitness de chaque individu de la population retenue est important et dépend du problème à résoudre et de l'espace de recherche qui en découle. En effet, ce choix dépend principalement l'objectif à atteindre du problème considéré.

Parfois, l'algorithme génétique peut créer des solutions non admissibles qui violent au moins l'une des contraintes du problème. Donc, pour traiter ce problème, il vaut mieux de définir une fonction fitness auparavant.

#### 4.2.2.4 *Les opérateurs*

##### 1. La sélection

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. Cet opérateur est plus important, car il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir.

On trouve essentiellement quatre types de méthodes de sélection différentes:

- La méthode de la «loterie biaisée» (roulette wheel) : elle consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis

on regarde quel est le segment sélectionné. Avec cette procédure les grands segments (les bons individus) seront plus souvent adressés que les petits.

- La méthode «élitiste»: elle consiste à sélectionner les  $n$  individus dont on a besoin pour la nouvelle génération  $P'$  en prenant les  $n$  meilleurs individus de la population  $P$  après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.
- La sélection par tournois: elle consiste à effectuer un tirage avec remise de deux individus de  $P$  et on les fait combattre. Celui qui a une fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité  $p$  comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus  $n$  fois de manière à obtenir les  $n$  individus de  $P'$  qui serviront de parents.

## 2. La mutation

L'opérateur «mutation» [5], est conçu pour apporter une certaine diversité dans la population et empêcher que celle-ci ne converge trop vite vers un même individu, ou vers un petit groupe d'individus. Cela indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. Ainsi, en toute rigueur, l'algorithme génétique peut converger sans croisement. Donc, sur le plan théorique, la convergence des algorithmes génétique dépend fortement de la mutation.

Le principe de la mutation est le suivant:

Dans les problèmes discrets, on choisit aléatoirement un gène du chromosome et on le remplace par une valeur aléatoire.

Dans les problèmes continus, on tire un gène du chromosome, auquel on ajoute un bruit généralement gaussien.

### 3. Le croisement

L'objectif du croisement est de recombinaison d'une certaine façon les chromosomes de deux (rarement plus) parents procréateurs afin de former les chromosomes d'un ou de deux (rarement plus) enfants. Le croisement s'inspire du mécanisme observé dans le «crossing over» [5] de la génétique (et est d'ailleurs aussi appelé ainsi).

On extrait une partie du chromosome associé à chacun des parents, et on réorganise ces parties entre elles de façon à former de nouveaux individus qui jouent le rôle des enfants. On rencontre dans la pratique trois types de croisement: le «croisement à un point», le «croisement à deux points» et le «croisement uniforme».

### 4. L'inversement

L'opérateur «inversement» [5] est peu rencontré. Il agit sur un chromosome en sélectionnant aléatoirement deux points dans celui-ci et en inversant l'ordre des gènes situés entre ces deux points.

#### 4.2.2.5 Les paramètres

Les opérateurs de l'algorithme génétique sont guidés par certain nombre de paramètres fixés à l'avance. Ces paramètres sont les suivants:

- La taille de la population  $N$ .
- La probabilité de croisement  $P_c$ , elle dépend de la forme de la fonction fitness. Son choix est en général approché, plus elle est élevée, plus la population subit de changements importants.
- La probabilité de mutation  $P_m$ . Ce taux est généralement faible, puisqu'un taux élevé risque conduire à une solution sous optimale.
- Critères d'arrêt et on distingue parmi les plus utilisés:

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé à priori.
- Un taux minimum qu'on désire atteindre d'adaptation de la population au problème.
- Un certain temps de calcul à n'est pas dépasser.
- Une combinaison de ces deux derniers points.
- On peut arrêter lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

### *4.3 Conclusion*

Les diverses approches citées plus haut de ce chapitre sont dédiées à la résolution de notre problème.

## CHAPITRE V

### RÉSOLUTION DU PROBLÈME

#### 5.1 *Introduction*

Dans ce chapitre, nous allons présenter les heuristiques que nous avons choisies pour la résolution de notre problème ainsi que la justification de chaque choix.

La résolution de notre problème peut être considérée en deux étapes comme suit:

- La première étape: Génération de la solution initiale.
- La seconde étape: Amélioration de la solution obtenue à la première étape.

#### 5.2 *Choix des méthodes de résolution*

Le modèle linéaire à variables mixtes obtenu peut être résolu par quelques méthodes exactes telles que:

les méthodes d'optimisation par coupe ainsi que les méthodes de décomposition des grands systèmes comme la méthode de «génération de colonnes» (elle est issue de la méthode de décomposition de BENDERS).

Toutefois, vu la taille considérable des contraintes de notre problème, on est arrivé à conclure que de telles méthodes étaient relativement inapplicables du moment qu'elles nécessiteraient un espace mémoire considérable afin de stocker la totalité des données du problème ainsi qu'un temps de calcul machine relativement conséquent.

De ce fait, on a écarté l'hypothèse d'utiliser une méthode exacte dans la résolution de notre problème et on s'est orienté vers des approches heuristiques de résolution telles que: l'algorithme génétique [8], l'algorithme génétique hybride [7], le recuit simulé [6], surtout que certaines d'entre elles ont pu prouver leur grande efficacité et donner des résultats promettant notamment pour des problèmes du moins similaires au notre.

## 5.2.1 Génération de la solution initiale

### 5.2.1.1 Adaptation de l'heuristique «PN par PN»

L'algorithme d'adaptation de l'heuristique «PN par PN» est le suivant:

- *Etape 0* : Ordonner les activités (les crew route, les alertes)  $k$  avec  $k = \{1, \dots, n\}$  par jour et selon l'ordre décroissant de leurs capacité. De plus ordonner les PN suivant l'ordre croissant de leur codification.
- *Etape 1* : Choisir un PN à affecter parmi la liste de navigants actifs (en partant du premier navigant jusqu'au dernier) et choisir une activité  $k$  de manière à respecter les conditions suivantes:
  - ✓ Si l'activité  $k$  est un crew route  $j$  :  
Le PN choisi doit avoir un temps de vol minimum.  
De plus :
    - Si le crew route  $j$  est un crew route national : Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols nationaux.
    - Si le crew route  $j$  est un crew route international: Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols internationaux.
    - Si le crew route  $j$  est un crew route très matinal: Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols matinaux.
  - ✓ Si l'activité  $k$  est une alerte.  
Le PN choisi doit avoir un nombre d'alertes minimum.
  - ✓ Si toutes les contraintes réglementaires (voir chapitre 3) sont respectées, affecter le PN choisi à l'activité  $k$ .
- *Etape 2* : Eliminer le PN Affecté et l'activité  $k$  choisie.
- *Etape 3* : Tester si les navigants de la liste correspondante sont tous affectés aux activités programmées. Stop. Sinon aller à l'étape 1.

Fig7: l'algorithme d'adaptation de l'heuristique PN par PN.

### 5.2.1.2 Adaptation de l'heuristique «Rotation par Rotation»

L'algorithme d'adaptation de l'heuristique «Rotation par Rotation» est le suivant:

- *Etape 0* : Ordonner les activités (les crew route, les alertes) k avec  $k = \{1, \dots, n\}$  par jour et selon l'ordre décroissant de leurs capacité. Poser  $k=1$ .
- *Etape 1* : Affecter l'activité k à un personnel navigant choisi aléatoirement parmi la liste des navigants, en éliminant le personnel navigant effectue la k-1 activité, tout en respectant les contraintes suivantes :
  - ✓ Si l'activité k est un crew route j :  
Le PN choisi doit avoir un temps de vol minimum.  
De plus :
    - Si le crew route j est un crew route national : Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols nationaux.
    - Si le crew route j est un crew route international: Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols internationaux.
    - Si le crew route j est un crew route très matinal: Le PN choisi doit avoir un nombre minimum de vols matinaux.
  - ✓ Si l'activité k est une alerte.  
Le PN choisi doit avoir un nombre d'alertes minimum.
  - ✓ Si toutes les contraintes réglementaires (voir chapitre III) sont respectées, affecter l'activité k au PN choisi.
- *Etape 2* : Eliminer l'activité k Affectée et le PN choisi.  $k=k+1$ .
- *Etape 3* : si  $k>n$  stop. Sinon aller à l'étape 01.

Fig8: l'algorithme d'adaptation de l'heuristique Rotation par Rotation.

## 5.2.2 Amélioration de la solution initiale

### 5.2.2.1 Adaptation de l'algorithme génétique

### 5.2.3 Organigramme de l'algorithme génétique

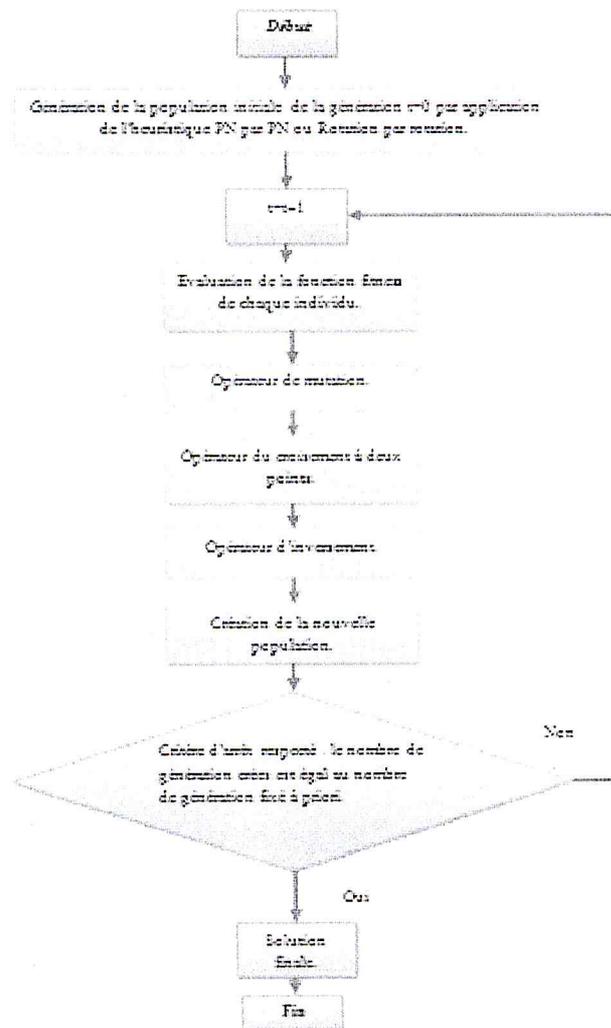


Fig9: Organigramme de l'algorithme génétique.

Nous avons adapté l'algorithme génétique réalisé par Walid El-Moudani [8] pour la résolution de notre problème.

### 5.2.3.1 Choix du codage

Nous avons choisi le codage entier pour la résolution de notre problème, car le numéro de l'activité est représenté par un nombre entier.

### 5.2.3.2 Choix de la fonction fitness

Nous avons défini pour chaque individu  $l$  (chromosome) de la population une fonction fitness de la forme suivante:

$$F(l) = \sum_{p=1}^{Taille-1} \sum_{q=p+1}^{Taille} |d_{p,l} - d_{q,l}| \quad \forall l = \overline{1, N}$$

$$\text{Avec: } Taille = \sum_{j=1}^m C_j.$$

$d_{p,l}$ : Le temps de vol du navigant  $p$  dans le jour  $l$ .

$d_{q,l}$ : Le temps de vol du navigant  $q$  dans le jour  $l$ .

### 5.2.3.3 Représentation chromosomique

L'algorithme génétique considère toute une population d'individus (chromosomes). Chaque chromosome représente un jour du mois, il est décomposé en un ensemble de  $m$  blocs tel que chaque bloc « $j$ » représente le  $j^{ième}$  crew route du mois traité et chaque bloc est décomposé lui-même en  $C_j$  gènes ( $C_j$  est le nombre de navigants nécessaire pour pouvoir couvrir le crew route « $j$ ») où chaque gène  $C_j$  correspond au navigant effectuant le crew route « $j$ » en question.

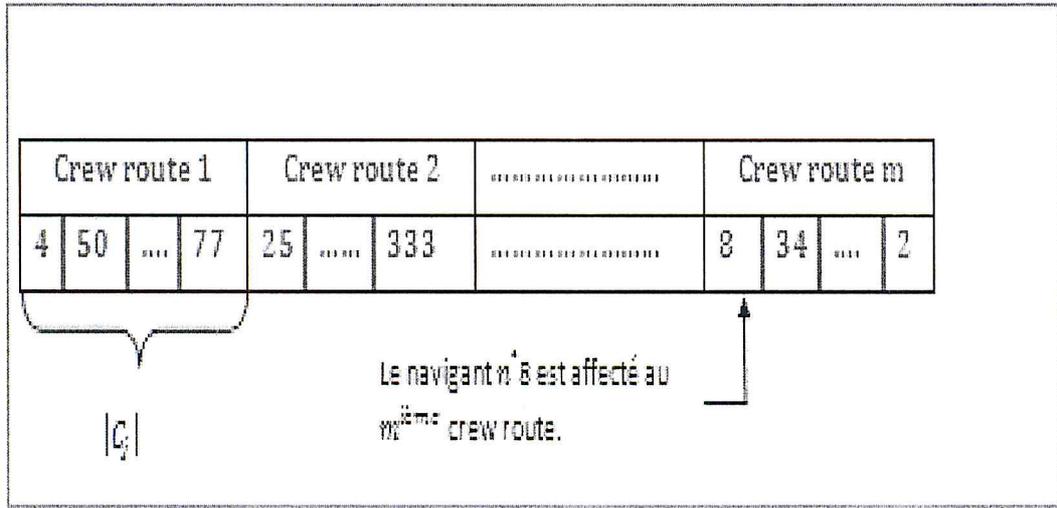


Schéma 1: Représentation chromosomique.

#### 5.2.3.4 Choix des opérateurs

Définition de quelques paramètres

$N$ : la taille de la population (le nombre de jours du mois traité).

$m$ : le nombre de crew route programmés.

$M$ : la moyenne en temps de vol mensuel.

$d_{i,t}$ : le temps de vol du PN  $i$  dans jour  $t$ .

$P_l$ : probabilité de chaque chromosome  $l$ .

Avec:  $P_l = \frac{F(l)}{N}$ .

$P_m$ : probabilité de mutation.

$P_c$ : probabilité du croisement.

$P_{inv}$ : probabilité de l'inversement.

$P_r$ : probabilité du crew route.

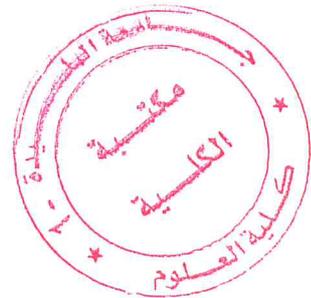
$P_j$ : probabilité de chaque crew route  $j$ .

Avec:  $P_j = \frac{j}{m}$ .

$P_g$ : probabilité du gène.

$P_i$ : probabilité de chaque gène  $i$ .

Avec:  $P_i = \frac{i}{Taille}$ .



L'heuristique de choix du navigant pour l'opérateur de mutation et inversement:

Pour garantir une bonne amélioration de la solution obtenue, l'ensemble des navigants sont réparties en deux sous-ensembles tels que:

$WL_H$ : ensemble de navigants dont leur temps de vol est supérieur à  $M$ .

$WL_L$ : ensemble de navigants dont leur temps de vol est inférieur à  $M$ .

Avec:  $M = \frac{\sum_{j=1}^m d_j}{m}$ .

**Etape 1:** sélectionner deux chromosomes différents A et B de la population P tel que :  
La probabilité de chaque chromosome soit inférieure ou égale à  $P_m$ .

**Etape 2:** choisir un crew routes  $j_1$  (respectivement  $j_2$ ) du chromosome A (respectivement B) tel que :  
La probabilité du crew route choisi soit inférieure ou égale à  $P_r$ .

**Etape 3:** sélectionner un PN (un gène) x dans le crew route  $j_1$  et un PN y dans le crew route  $j_2$  tel que :  
La probabilité des deux gènes x et y soit inférieure ou égale à  $P_g$ .

De plus :  $x \in WL_H$  et  $y \in WL_L$ .

**Etape 4:** muter ces deux gènes choisis et modifier le temps de vol des deux PN :

$$d'_x = d_x - d_{x,\lambda}$$

$$d'_y = d_y + d_{x,\lambda}$$

Fig 10: l'algorithme d'adaptation de l'heuristique Rotation par Rotation.

Le schéma suivant illustre le fonctionnement de la mutation:

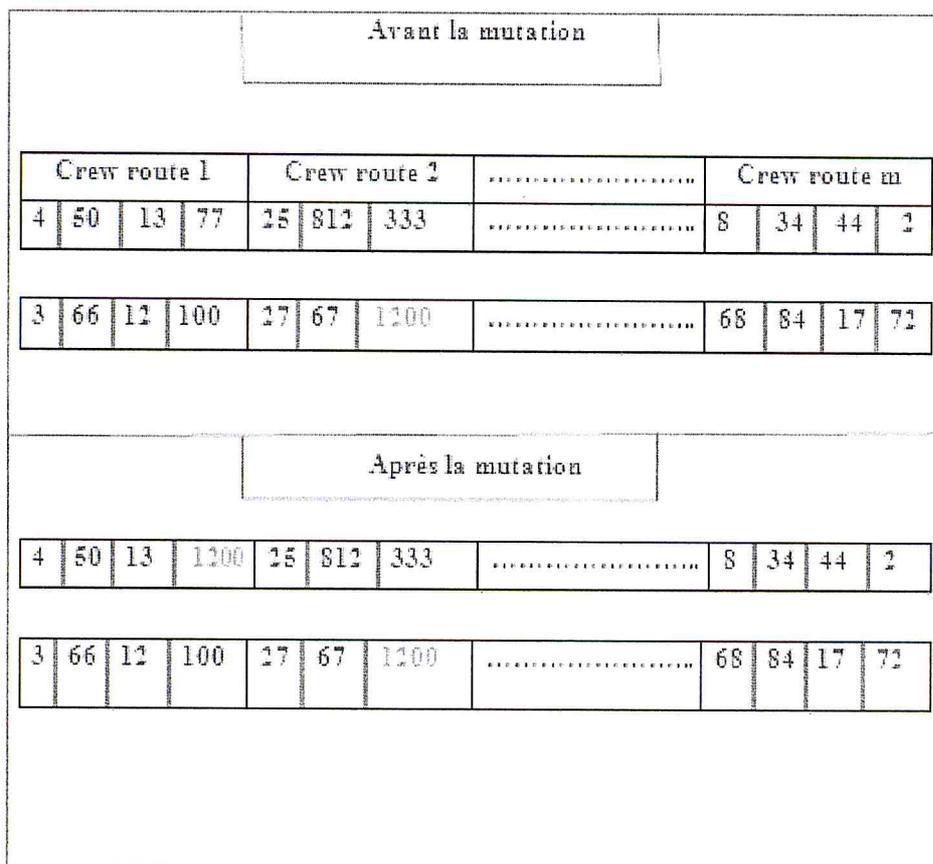


Schéma 2: Exemple d'illustration de l'opérateur «mutation».

Nous avons choisi d'utiliser «le croisement à deux points».

**Etape 1 :** sélectionner deux chromosomes différents A et B de la population P tel que:

La probabilité de chaque chromosome soit inférieure ou égale à  $P_c$ .

**Etape 2 :** tirer deux positions différentes aléatoirement (commune aux deux chromosomes sélectionnés).

**Etape 3 :** vérifier si La probabilité de chaque gène choisi soit inférieure ou égale à  $P_g$ .

De plus :

La longueur du crew route j1 choisi est égale à la longueur du crew route j2 choisi.

**Etape 4 :** échanger les gènes entre ces deux positions et modifier le temps de vol des PN correspondants:

$$d'_i = d_i - d_{i,A} + d_{i,B}$$

Fig 11: l'algorithme de croisement.

Le schéma suivant illustre le fonctionnement du croisement:

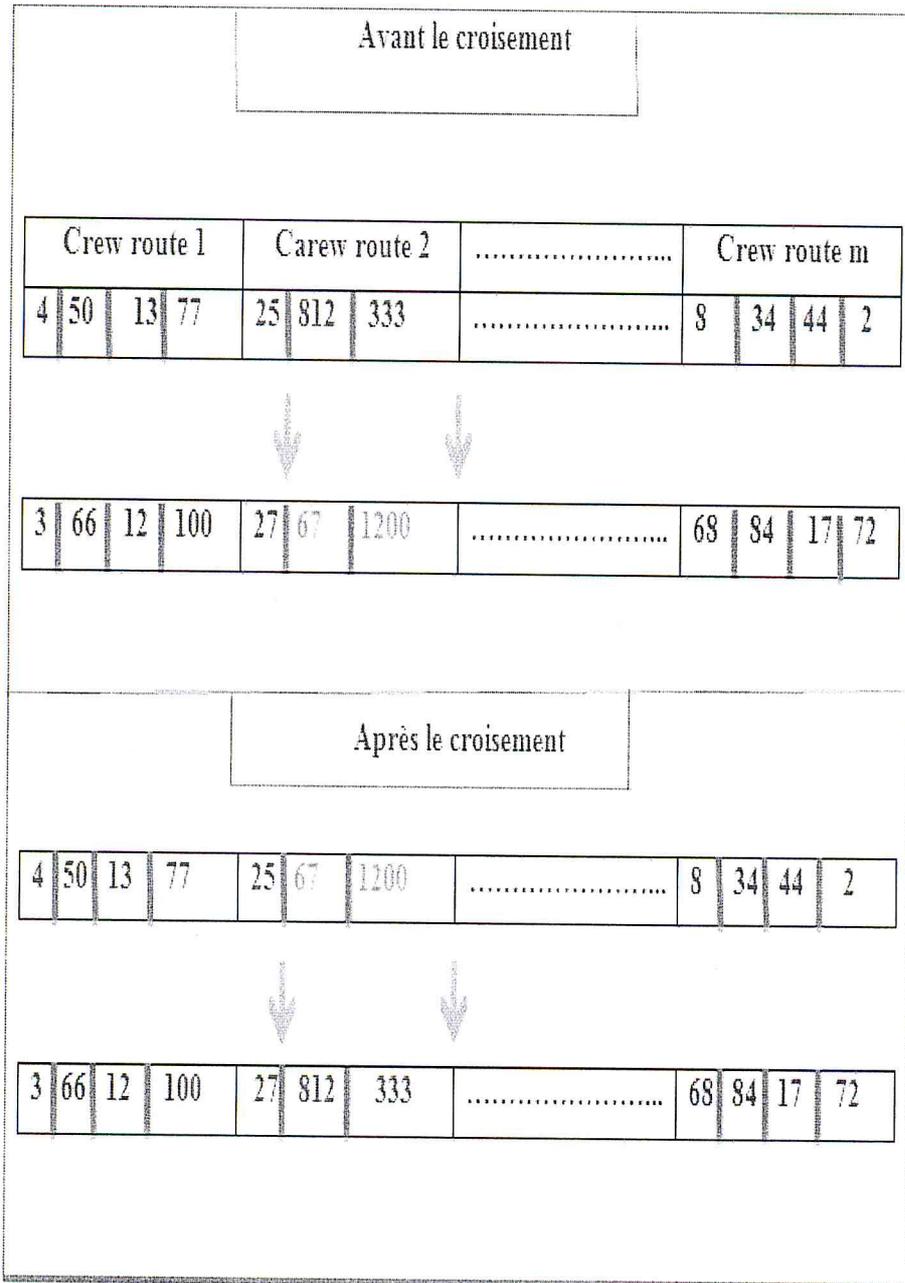


Schéma 3: Exemple d'illustration de l'opérateur «croisement».

*Etape 1* : sélectionner un chromosome A de la population P tel que :

La probabilité du chromosome A soit inférieure ou égale à  $P_{inv}$  .

*Etape 2* : choisir deux crew route j1 et j2 du chromosome A tel que :

La probabilité du crew route j1 (respectivement j2) soit inférieure ou égale à  $P_r$  .

*Etape 3* : sélectionner un PN (un gène) x dans le crew route j1 et un PN y dans le crew route j2 tel que :

La probabilité des deux gènes x et y soit inférieure ou égale à  $P_g$  .

De plus :  $x \in WL_{j1}$  et  $y \in WL_{j2}$  .

*Etape 4* : inverser ces deux gènes choisi et modifier le temps de vol des deux PN :

$$d'_x = d_x - d_{x,A} + d_{y,A}$$

$$d'_y = d_y - d_{y,A} + d_{x,A}$$

Fig 12: l'algorithme de l'inversement.

Le schéma suivant illustre le fonctionnement de l'inversement:

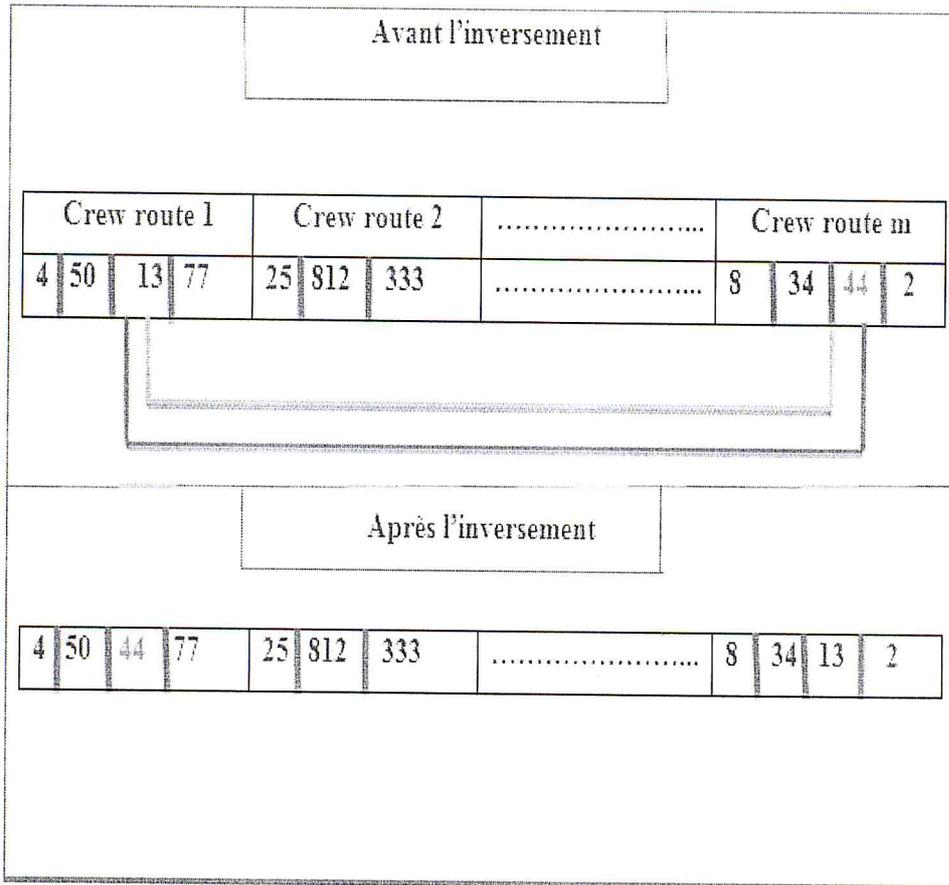


Schéma 4: Exemple d'illustration de l'opérateur «inversement».

#### 5.2.3.5 Justification de choix des opérateurs

-Afin d'élargir le champ de recherche à plusieurs espaces de solutions, on introduit l'opérateur «mutation».

-Afin d'obtenir une solution réalisable, on applique le «croisement à deux points» ou les navigant à échanger est les derniers déplacer par l'opérateur «mutation».

-L'inversement implique une variation dans le volume horaire en temps de vol entre les deux navigants concernés. Cela implique, par

conséquent, une variation du volume horaire total entre tous les navigants. Et dans le cas où cette différence en temps de vol diminuerait, la solution voisine obtenue par application de l'opérateur «inversement» sur la solution courante devient meilleure.

#### *5.2.3.6 Choix du critère d'arrêt*

Le critère d'arrêt est fixé en nombre d'itérations total effectué par l'algorithme génétique.

#### *5.2.3.7 Organigramme de l'algorithme génétique*

### **5.3 Conclusion**

Seuls les tests pratiques peuvent prouver l'efficacité de l'approche de résolution proposée pour la réalisation du «programme équipage», que nous allons présenter au dernier chapitre.

## CHAPITRE VI

### IMPLÉMENTATION ET RÉSULTATS

#### *6.1 Introduction*

Dans ce chapitre, nous allons présenter une application concrète au cas de la gestion du personnel navigant technique et commercial de la compagnie aérienne «Air Algérie» et qui utilise notre approche de résolution. Cette méthode a été testée sur une série de données réelles de la compagnie.

#### *6.2 Environnement logiciel*

MATLAB est un langage de programmation, qui permet de manipuler des matrices, d'afficher des courbes et des données, de mettre en œuvre des algorithmes, de créer des interfaces, et peut s'interfacer avec d'autres langages comme le C, C++, JAVA, et FORTRAN.

Le logiciel MATLAB, est construit autour du langage MATLAB. Une interface en ligne de commande, qui est un des éléments du bureau. MATLAB permet d'exécuter des commandes simples.

Des séquences de commandes peuvent être sauvegardées dans un fichier texte, typiquement avec l'éditeur MATLAB, sous la forme d'un « Script » ou encapsulé dans une fonction.

Face à ces arguments, et dans le but d'atteindre les objectifs fixés dans ce travail, la nécessité de développer une application efficace et rapide, nous a poussé à utiliser le langage de programmation MATLAB, dont l'interface garantit une facilité aux utilisateurs. Notre choix du langage MATLAB est donc justifié.

### *6.3 Présentation de l'application*

Dans cette partie, nous présentons le mode de fonctionnement de notre logiciel :

Nom : Affectation du personnel navigant

Outil de développement : MATLAB.

Version du logiciel : 7.8.0.347 (R2009 a).

Affectation du personnel navigant est un logiciel facile à manipuler, il guide et oriente l'utilisateur sur son mode de fonctionnement à chacune de ses étapes.

Le but de notre logiciel est de trouver une bonne affectation de vols au personnel navigant.

De manière schématique, Affectation du personnel navigant fonctionne à partir de données réelles fournies par notre entreprise d'accueil «Air Algérie»:

- Les identifiants des navigants composant l'ensemble du personnel navigant.
- Le secteur d'appartenance relatif à chaque navigant ainsi que les activités pré-affectées correspondantes et les restrictions PN spécifiques.
- Les alertes relatives aux différents secteurs.

### *6.4 Les données*

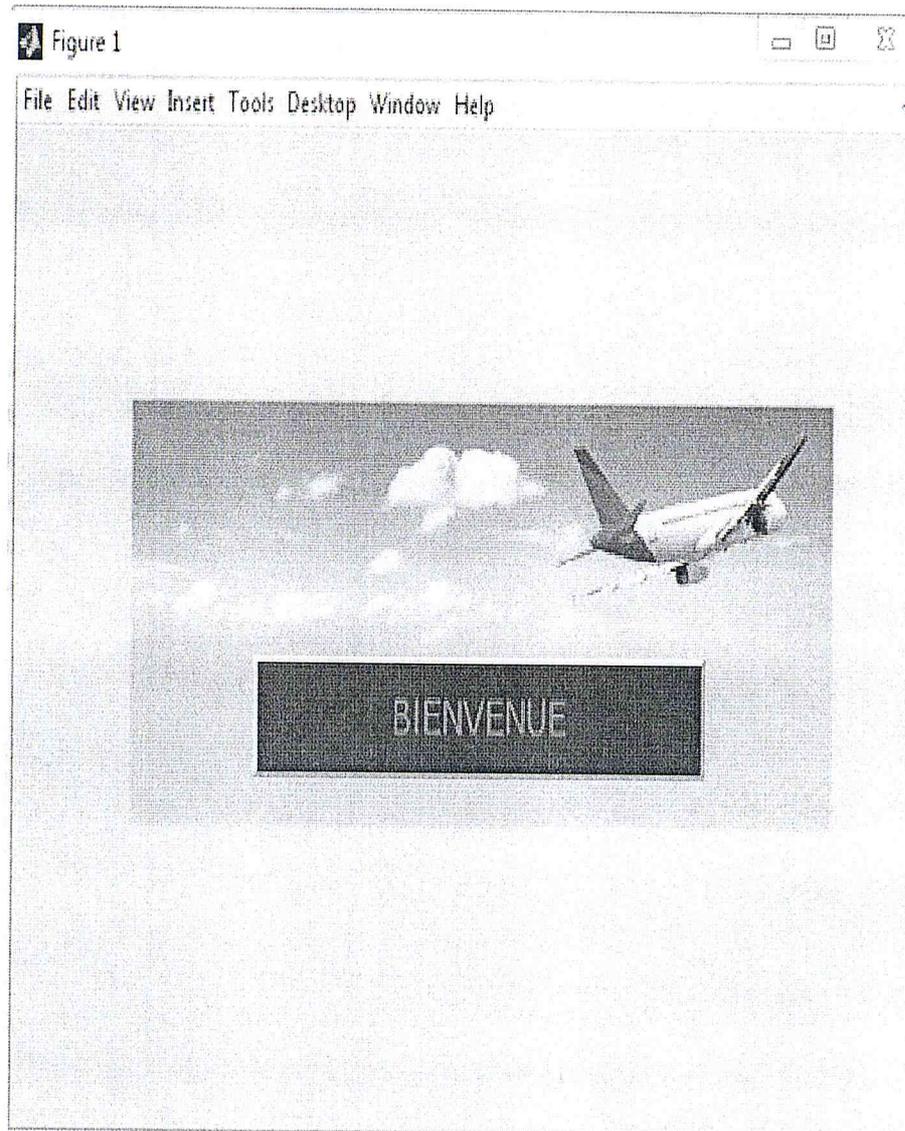
Avant le lancement de l'application, nous allons tout d'abord introduire toutes les informations nécessaires, utilisées durant l'implémentation de notre application. Nous avons utilisé des données réelles relatives à la compagnie aérienne « Air Algérie », ces données sont représentées dans le tableau suivant :

PN		Nombre du PN	Nombre du crew route	Nombre des alertes	Secteur avion	La base
PNT	CP	57	583	93	ATR6-AT72	ALG
PNC	PC	79	983	88	B767	ALG
	CC	101	983	126	B737	ALG
	FA	81	983	114	B148	ALG

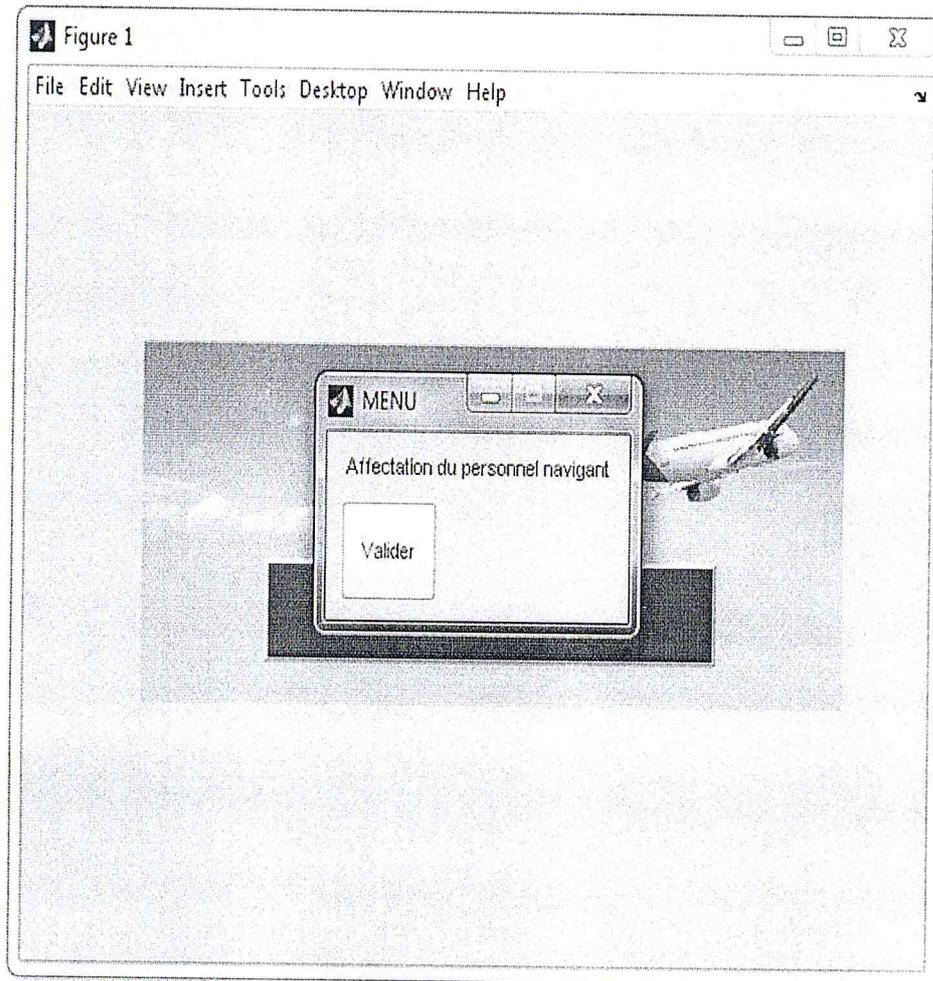
### *6.5 Lancement de l'application*

Pour une bonne présentation du logiciel, nous allons présenter toutes les fenêtres du logiciel, ainsi que l'utilité de chaque bouton.

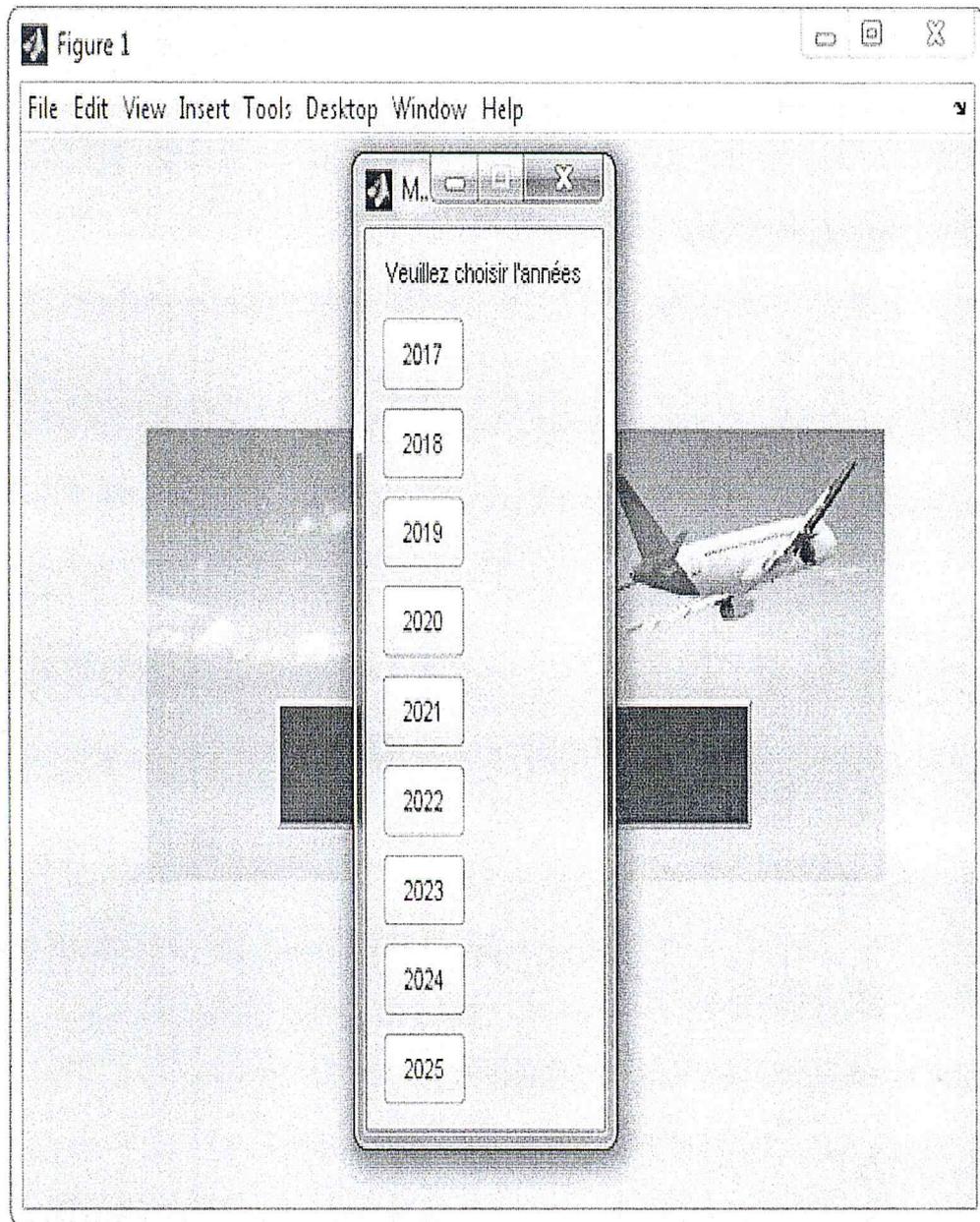
Au lancement de l'application, une fenêtre apparaît, c'est la fenêtre de démarrage, elle contient un bouton qui permet l'accès à l'application en cliquant sur «BIENVENUE».



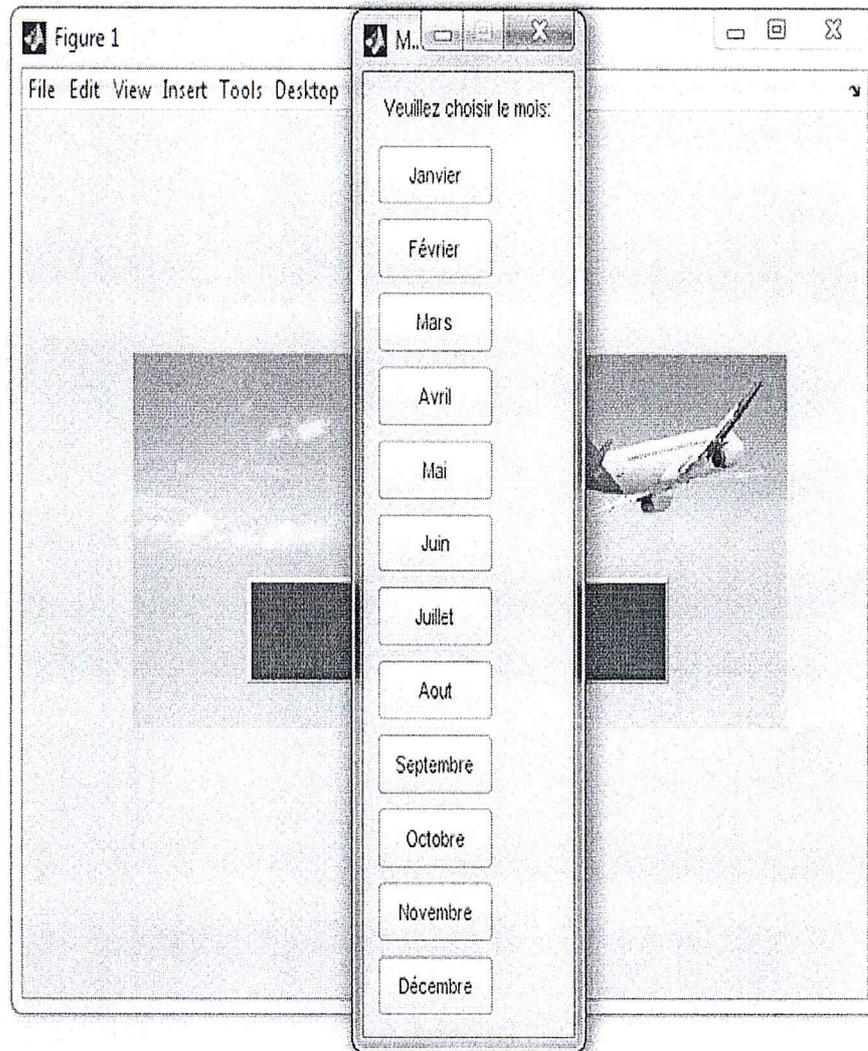
- Après avoir cliqué sur «BIENVENUE», un bouton apparaît, contient le nom de l'application.
- Cliquer sur «Valider» pour démarrer l'application.



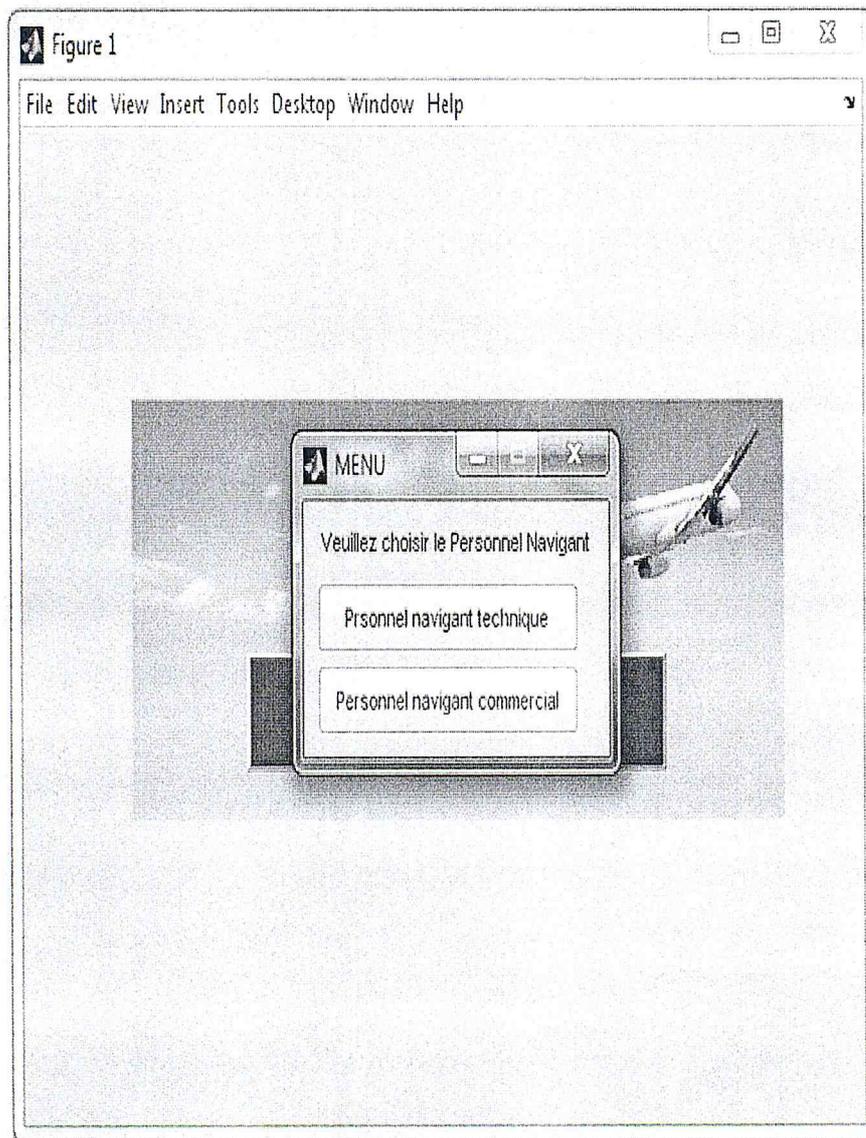
- On clique sur le bouton « Valider », une liste des années apparait.



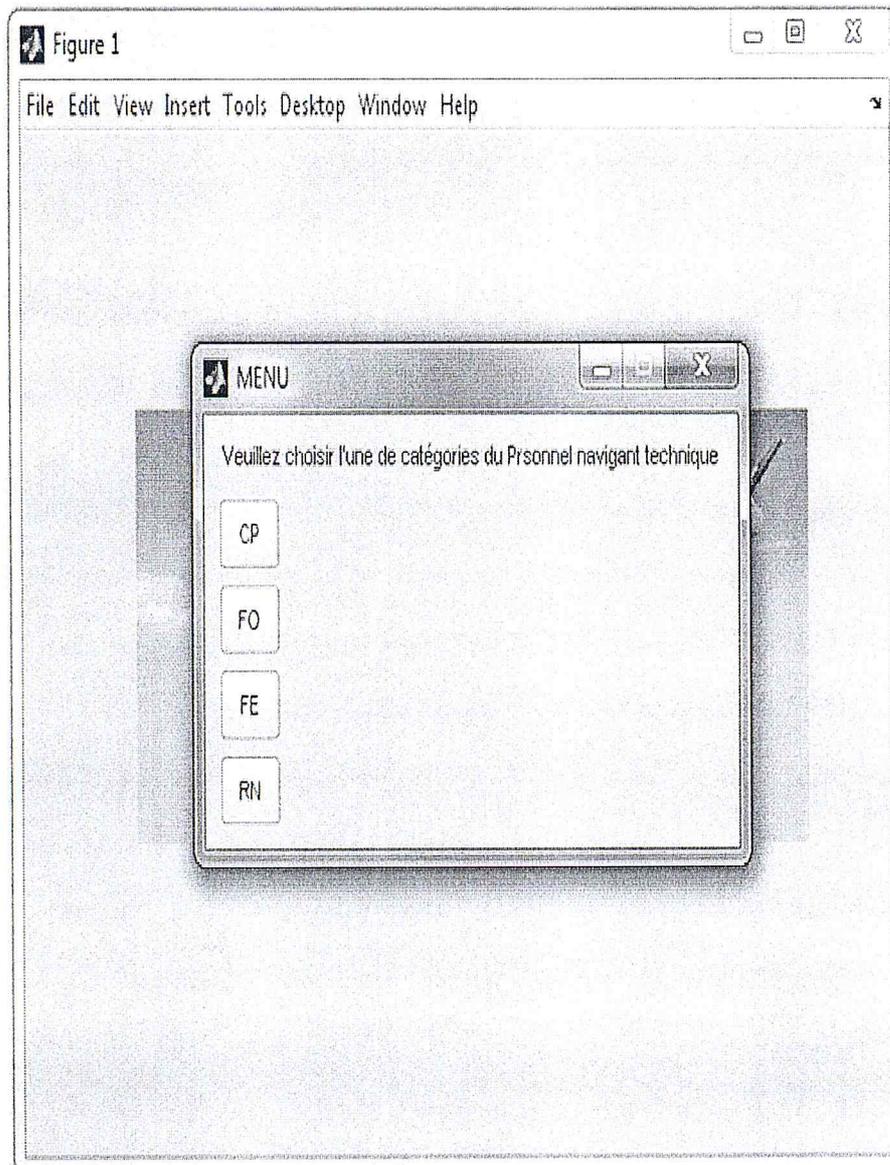
- Après avoir cliqué sur le bouton « Valider », veuillez choisir l'année pour laquelle vous désirez effectuer l'affectation.
- Après avoir identifié l'année de l'affectation, une liste de mois apparaît.



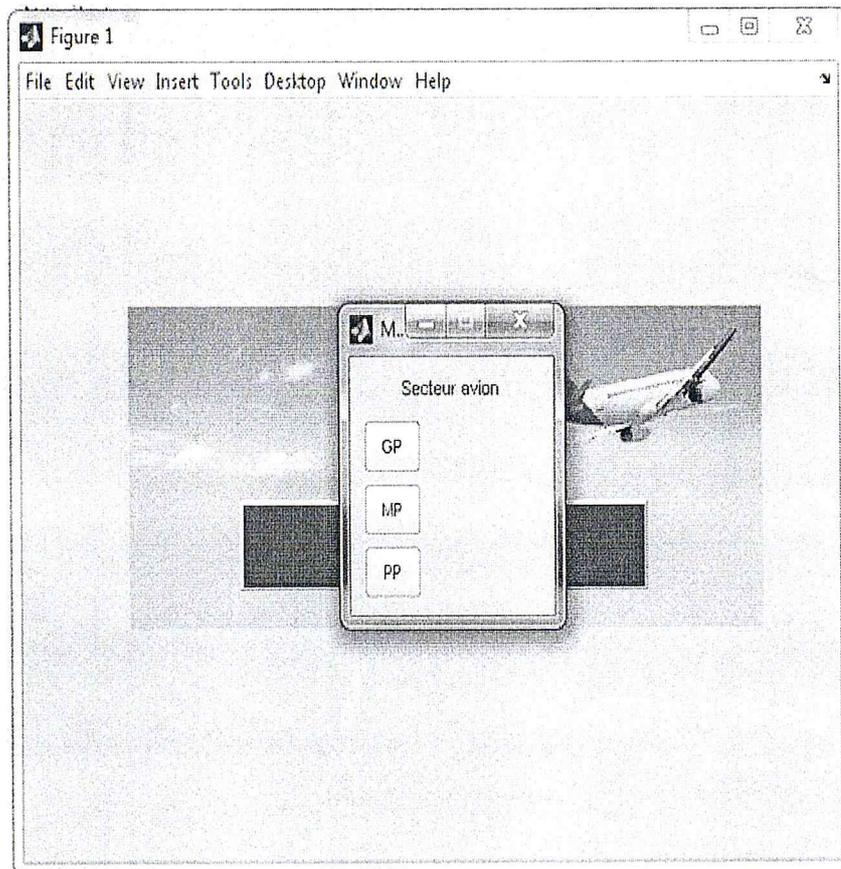
- Veuillez choisir le mois pour lequel vous voulez tester votre affectation.
- Après avoir choisi le mois traité, un bouton indiquant le choix de deux catégories du personnel navigant apparaît.



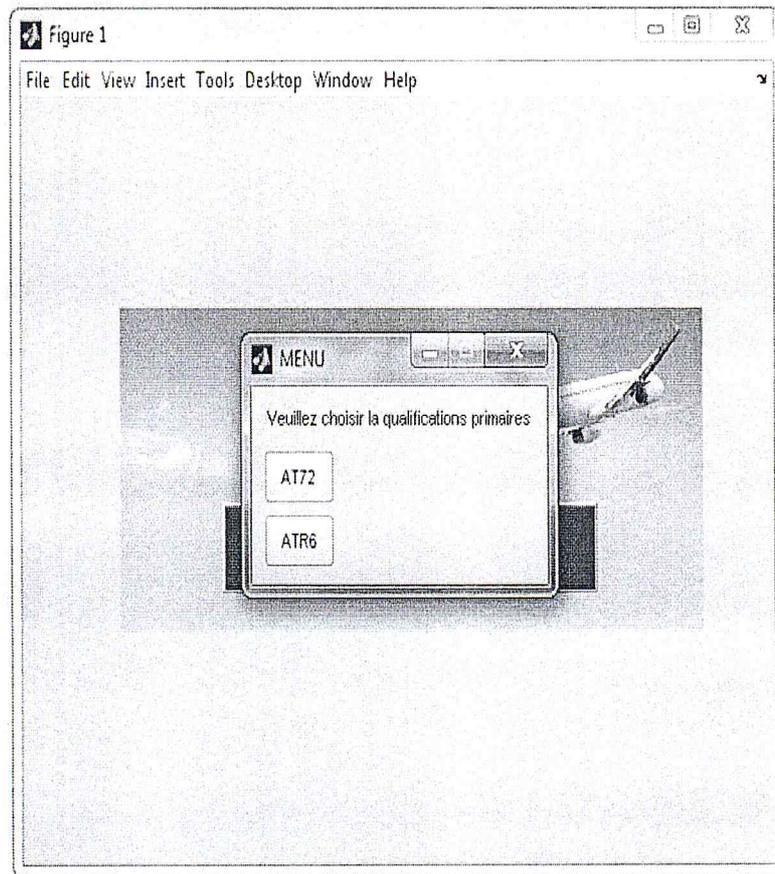
- Veuillez choisir l'une de catégories du personnel navigant.
- Après avoir cliqué sur le bouton du choix du personnel navigant. Une série de navigant appartenant à la catégorie prédéfinie apparaît.



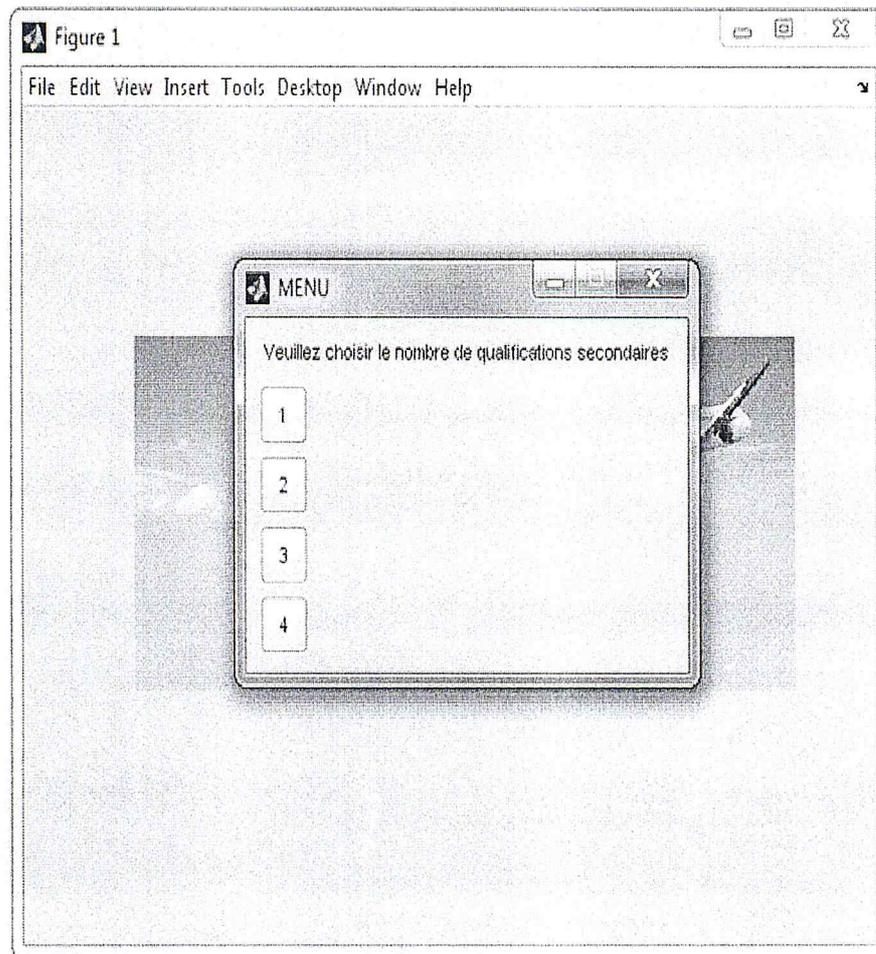
- Veuillez choisir une catégorie du personnel navigant que vous avez déjà précisé.
- Après avoir cliqué sur le bouton précédant, un bouton du choix de secteurs avion apparaît.



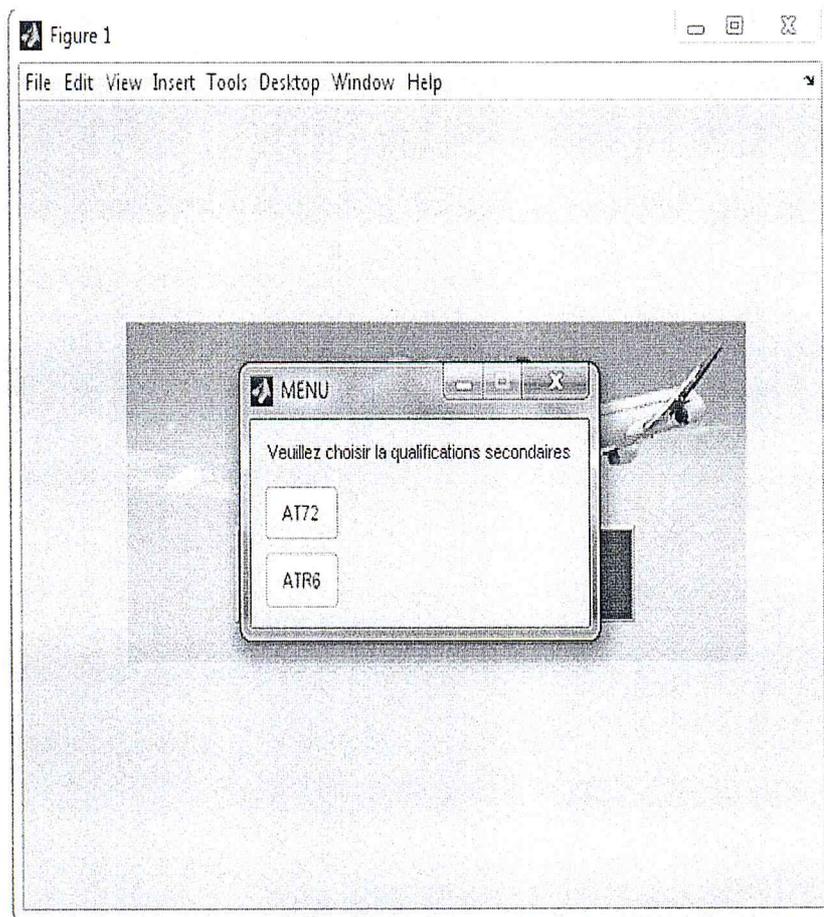
- Veuillez choisir n'importe quel secteur avion : GP (grand porteur),.....
- Après avoir cliqué sur ce bouton, une liste de qualifications primaires apparaît.



- Veuillez sélectionner la qualification machine primaire.
- Après avoir cliqué sur ce dernier bouton, un nombre de qualifications machine secondaires apparaît.

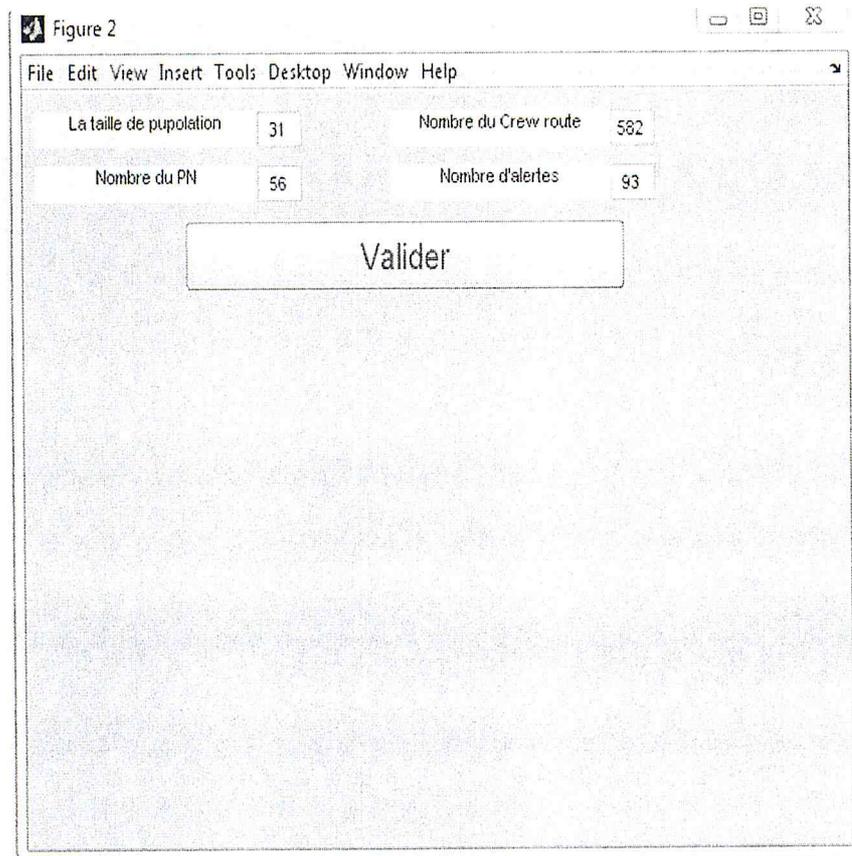


- Veuillez choisir n'importe quel nombre de qualifications machine secondaires.
- Après avoir cliqué sur ce bouton, une liste de qualification machine secondaire apparaît.

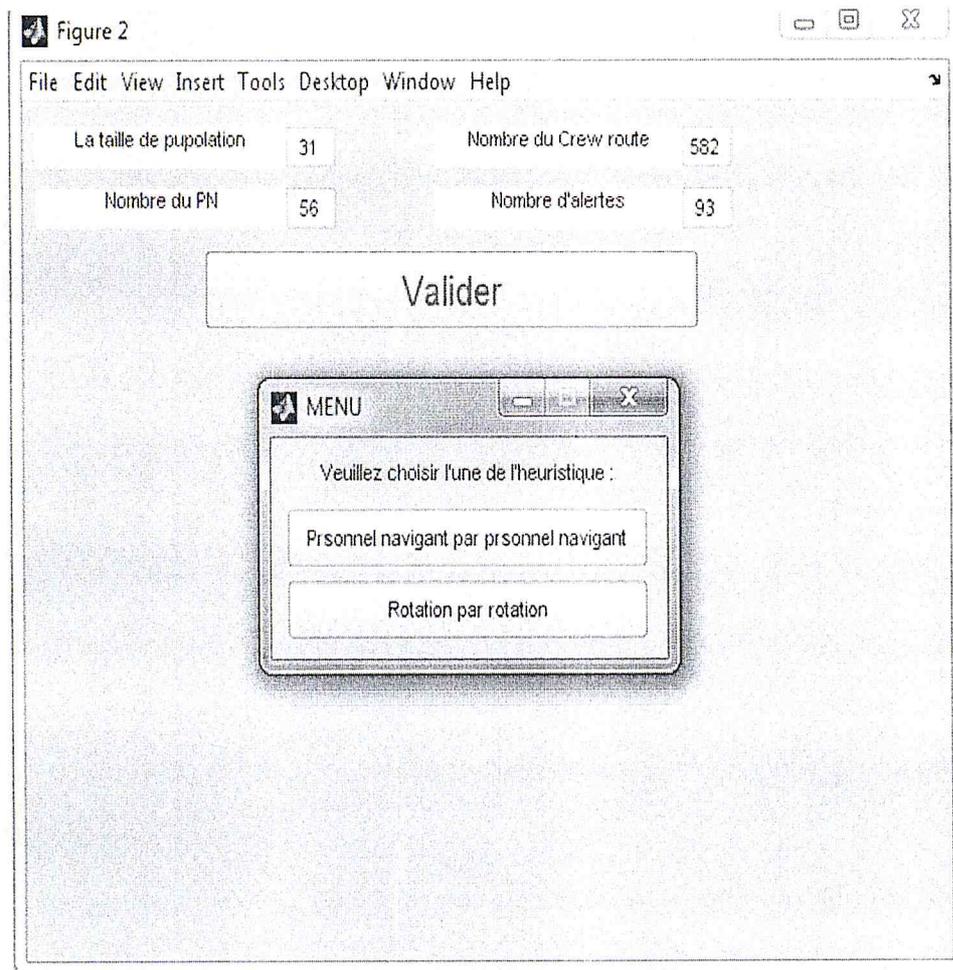


- Veuillez choisir les qualifications machine secondaires suivant leur nombre fixé à priori.
- Après avoir inclus toutes les informations nécessaires pour le démarrage de la génération de plannings personnalisés. Une fenêtre apparait permettant d'afficher :
- La taille de la population représentée par le nombre de jours du mois en question.
- Le nombre nécessaire du personnel navigant.
- Le nombre nécessaire de rotations (crew route).

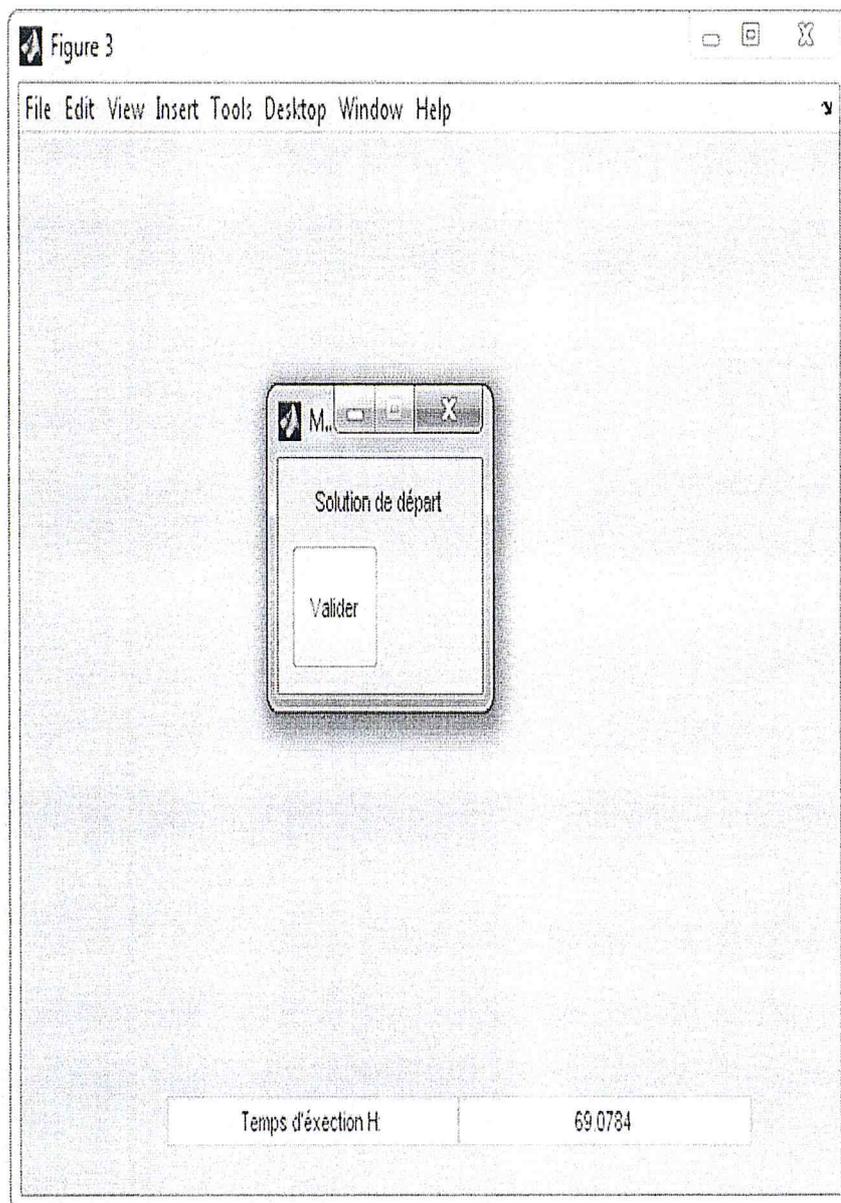
- Le nombre nécessaire d'alertes.



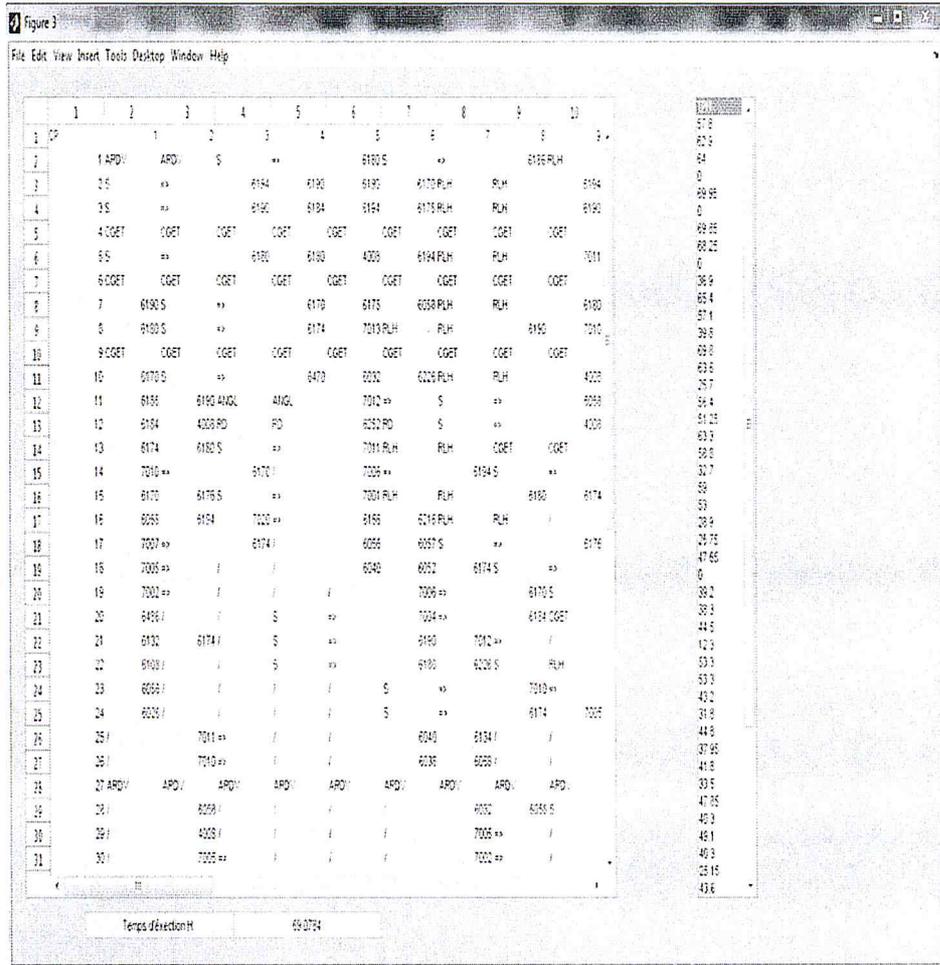
- Veuillez cliquer sur «Valider», et choisir l'une des heuristiques suivantes:
  - Personnel navigant par Personnel navigant.
  - Rotation par Rotation.
- De plus, le temps de vols maximum est aussi affiché, fixé à 70.



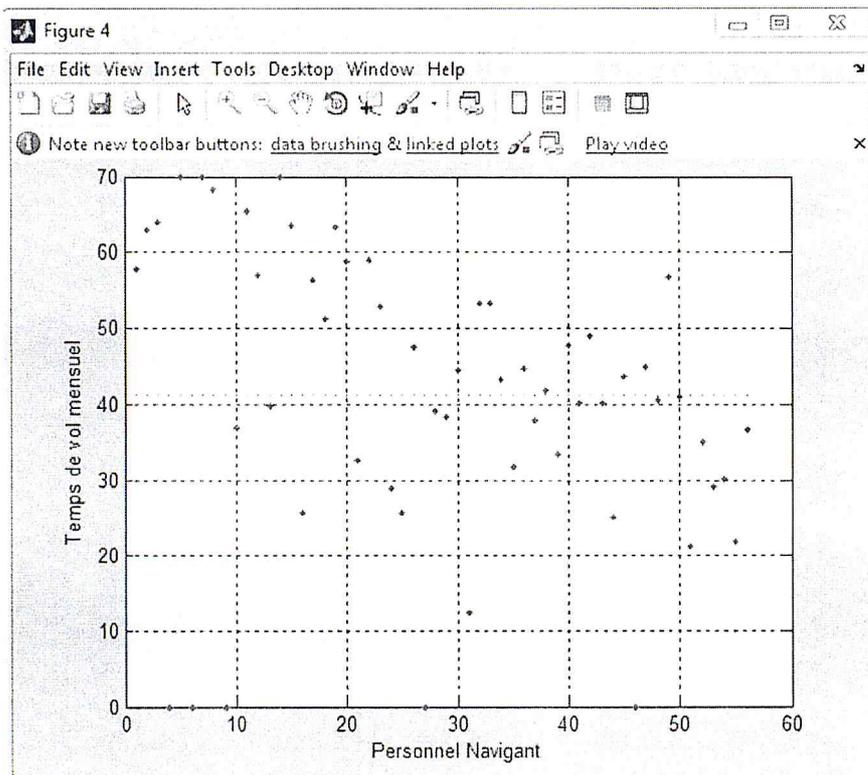
- Un bouton apparait, veuillez cliquer sur «Valider» pour afficher la solution de départ utilisant par exemple l'heuristique «Personnel navigant par Personnel navigant».



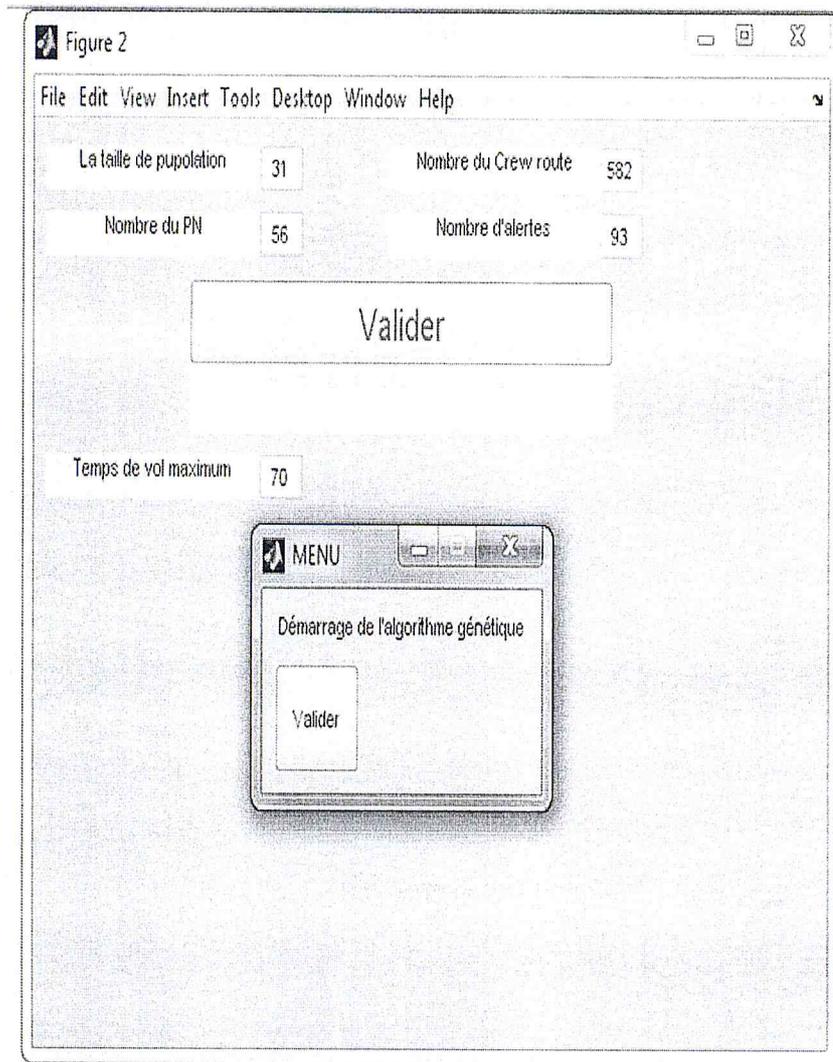
- La fenêtre ci-dessous permet d'afficher un exemple de plannings personnalisés testé sur les données précédentes.
- Cette fenêtre permet d'afficher également une liste représente le temps de vol mensuel de chaque navigant.



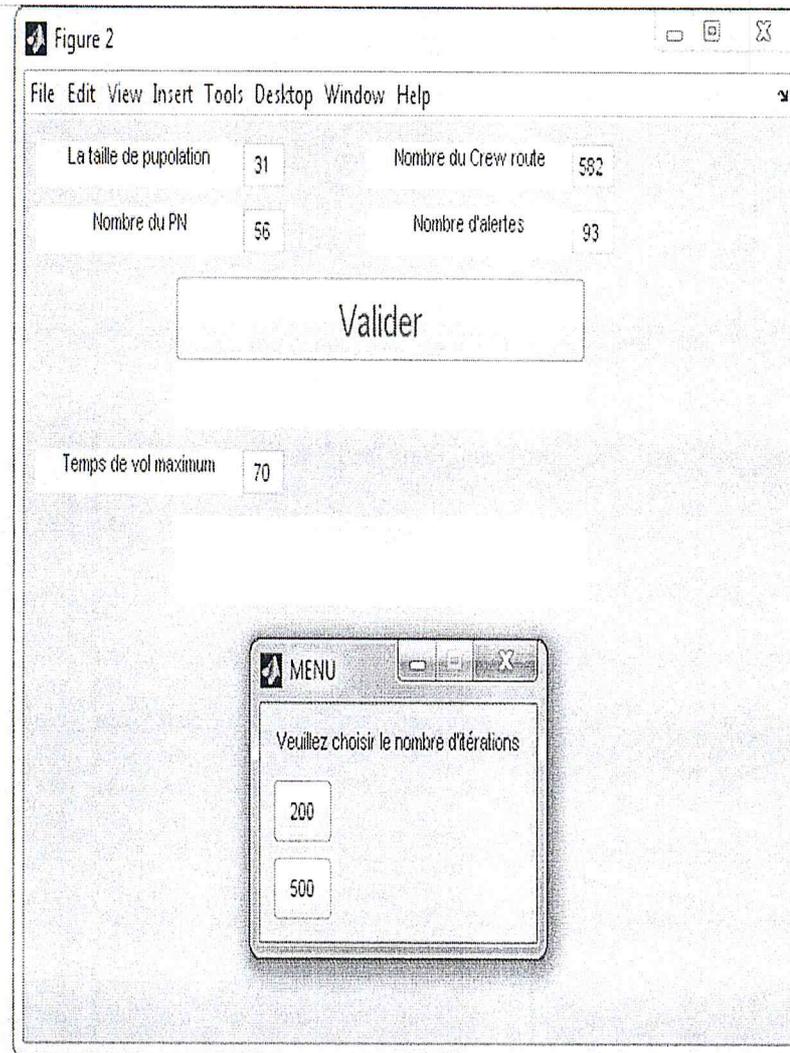
- La fenêtre ci-dessous permet d'afficher les variations du temps de vols mensuel de chaque personnel navigant par apport au temps de vol maximum.
- D'après cette figure, nous constatons que le temps de vol de chaque navigant n'a pas excédé le temps de vol maximum. Ce qui a prouvé l'efficacité de la solution obtenue.



- Pour le lancement de l'algorithme génétique, on va cliquer sur «Valider».

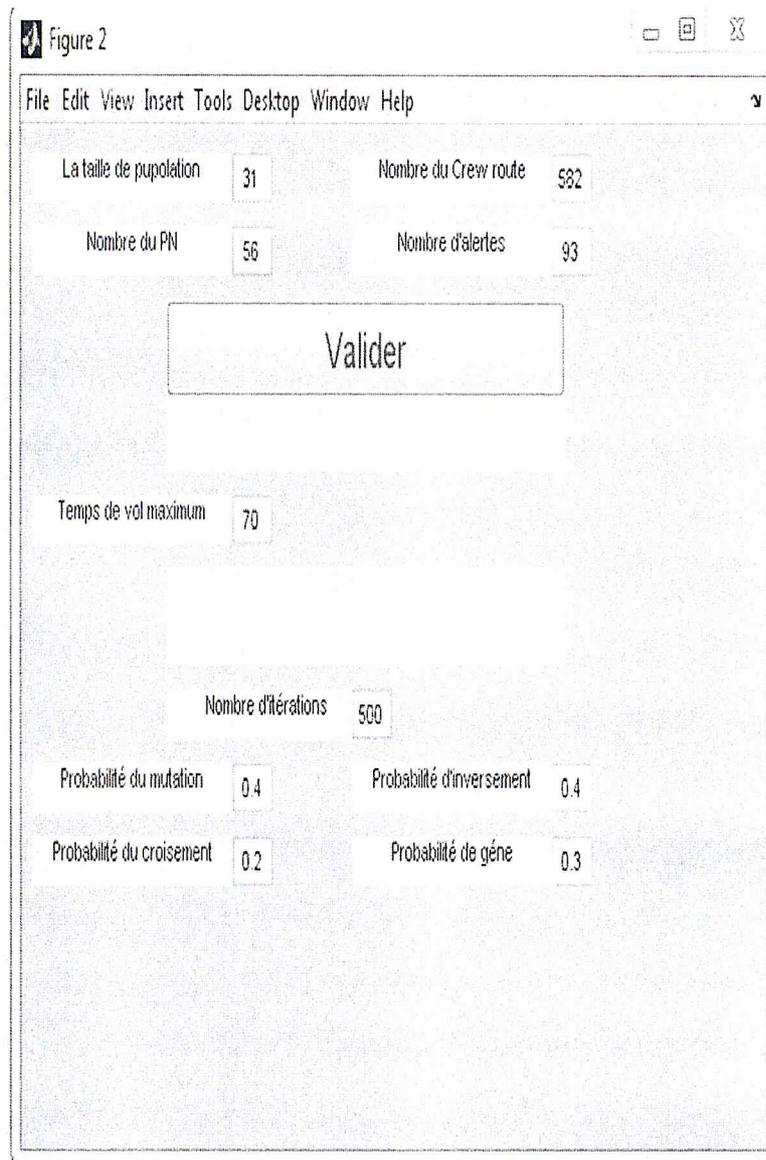


- Veuillez choisir le nombre d'itérations possible.

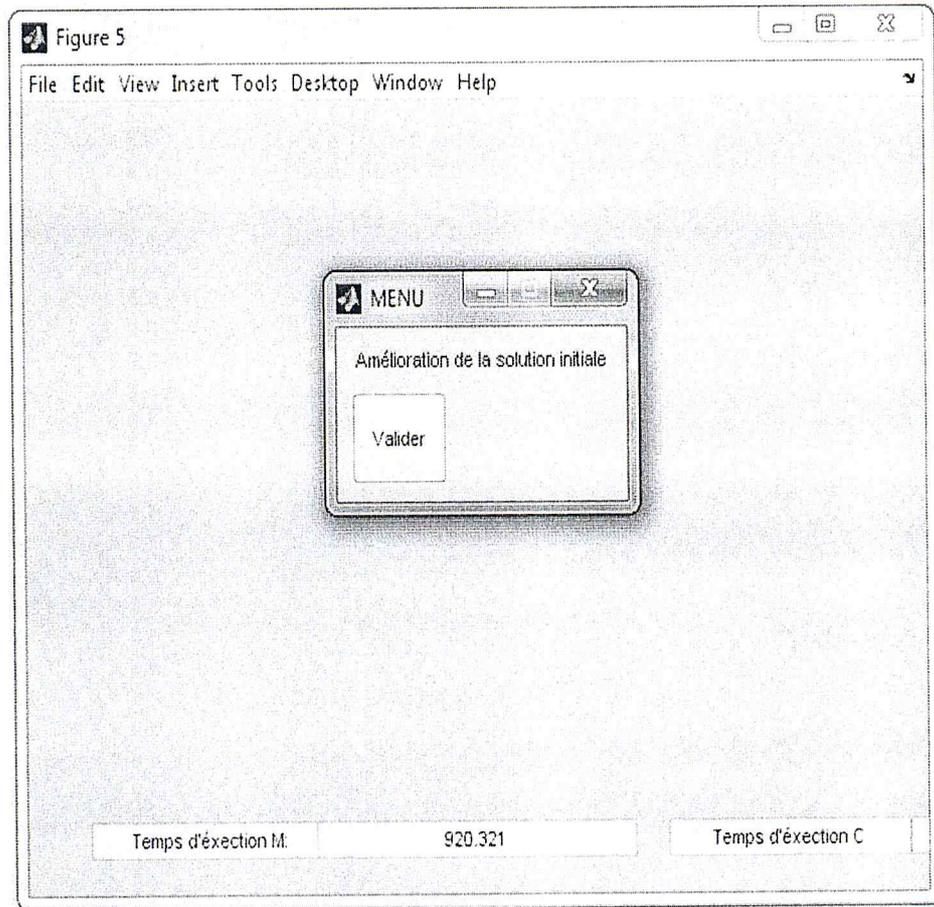


- Après avoir choisi le nombre d'itérations, une fenêtre apparaît permettant d'afficher une liste d'informations sur les différents paramètres de l'algorithme génétique:
  - Le nombre d'itérations fixé à 500.
  - La probabilité de mutation est égale à 0.4.
  - La probabilité du croisement est égale à 0.2.
  - La probabilité d'inversement est égale à 0.4.

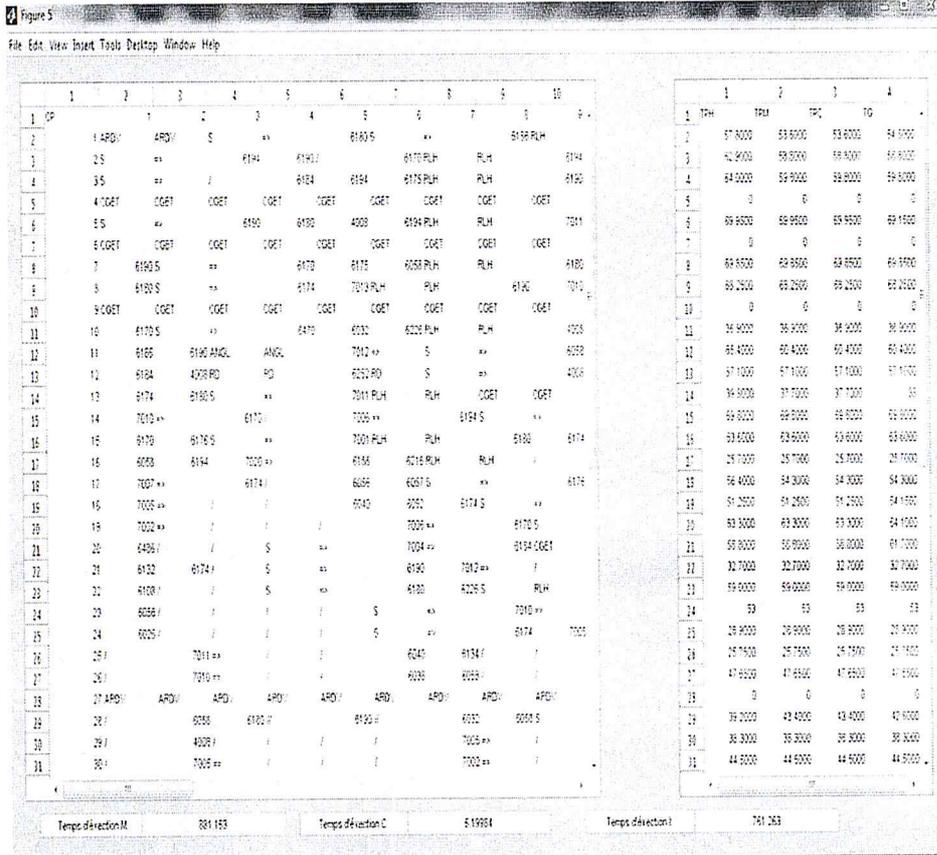
- La probabilité du gène du chromosome fixée à 0.4.
- Le temps de vol fixé à 70.
- De plus: le choix de l'heuristique de départ avec toutes ses informations.



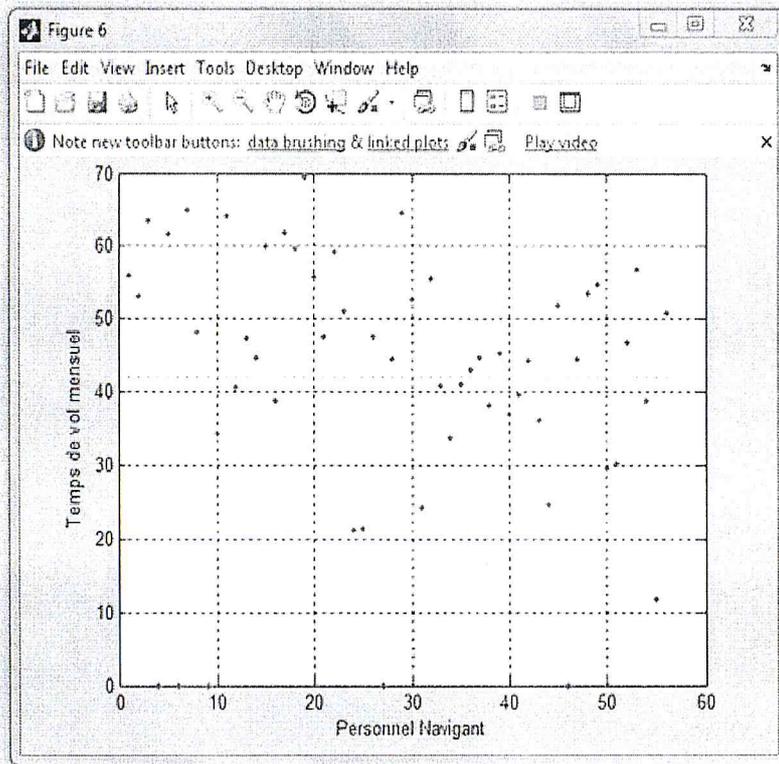
- Un autre bouton apparait permettant d'assurer le fonctionnement de l'algorithmme génétique.



- Veuillez cliquer donc sur «Valider».
- Après avoir cliqué sur ce dernier bouton, un exemple de plannings personnalisés apparaît, de l'autre côté un tableau doit être encore affiché permettant de donner le temps de vol mensuel de chaque navigant par l'heuristique, par la mutation, par le croisement, et enfin par la méthode globale (heuristique choisie avec l'algorithme génétique).



- Enfin, pour bien voir l'efficacité de la solution finale fournie par la méthode appliquée, le logiciel MATLAB permet d'afficher la courbe suivante:



- Nous remarquons que la plupart de navigants ont respecté la contrainte limitant le temps de vol (voir chapitre III).

### 6.6 Résultats obtenus

-Comparaison entre les heuristiques en termes de temps d'exécution pour les deux catégories (PNT et PNC):

PN		Les heuristiques	
		«PN par PN»	«Rotation par Rotation»
PNT	CP	00 :01 :18	00 :00 :44
PNC	PC	00 :03 :54	00 :01 :31
	CC	00 :04 :36	00 :01 :31
	FA	00 :02 :52	00 :01 :05
Convergence de la solution obtenue		Rapide	Plus rapide

La figure ci-dessous illustre la variation du temps de vol mensuel de chaque personnel navigant, obtenu par l'heuristique de départ, par rapport au temps de vol idéal:

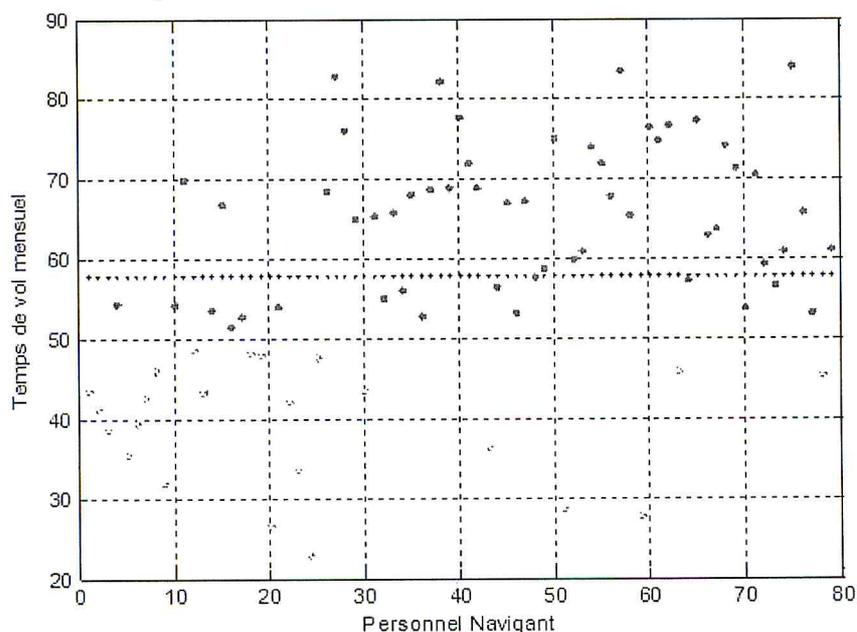


Fig8: Variation du temps de vol mensuel par rapport au temps de vol idéal par application de l'heuristique.

-Comparaison des résultats obtenus par l'algorithme génétique en termes de temps d'exécution pour les deux catégories (PNT et PNC):

PN		Temps d'exécution
PNT	CP	00 :12 :36
PNC	PC	00 :37 :24
	CC	01 :03 :54
	FA	00 :48 :04

La figure ci-dessous illustre la variation du temps de vol mensuel de chaque personnel navigant par rapport au temps de vol maximum de la solution améliorée par l'algorithme génétique:

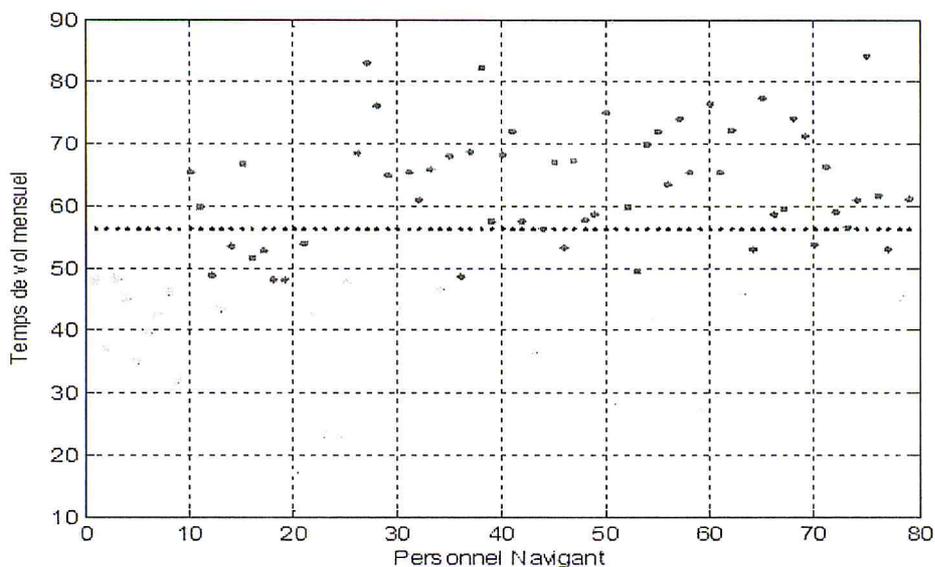


Fig9: Variation du temps de vol mensuel par rapport au temps de vol idéal par application de l'algorithme génétique.

Ainsi, il va être question de comparer les résultats obtenus par la méthode de résolution proposée à ceux obtenus par le logiciel AIMS de la compagnie aérienne «Air Algérie», en différents termes et dans le cas du personnel navigant technique. De ce fait, nous sommes arrivés à conclure que la solution fournie par notre approche de résolution est

meilleure que celle du logiciel actuel car d'un point de vue:

- Le logiciel AIMS a violé complètement la contrainte limitant le temps de vol de chaque navigant. Cela veut dire qu'il ya un certain nombre du PNT dont leur temps de vol mensuel dépasse le temps de vol maximum dans le mois (voir Annexe 2).
- Le logiciel AIMS ne fait pas l'équité en temps de vol entre les membres d'équipage de la compagnie. Par contre, notre logiciel fait l'équité.

### **6.7 Commentaires**

-L'application que nous avons réalisé est assez flexible, car elle ne déclenche pas automatiquement le processus global d'affectation. L'utilisateur a tout d'abord la possibilité de choisir le mois, le personnel navigant, les secteurs avion, le nombre de navigants, le nombre de qualifications machine, le nombre d'alertes pour lesquels il souhaite effectuer l'affectation et également de modifier les paramètres d'exécutions de la méthode de résolution à savoir: le nombre d'itérations de l'algorithme génétique, la probabilité de la mutation, croisement, et l'inversement. De plus, la probabilité du gène, la taille de la population selon le mois choisi.

-La qualité de la solution obtenue peut être améliorée si le nombre d'itérations augmente.

-Le temps de réponse augmente exponentiellement avec la taille du problème.

### **6.8 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré essentiellement à la présentation de l'application que nous avons développé, à l'aide du logiciel MATLAB, pour concrétiser notre application de travail. Nous avons interprété les

résultats obtenus et une comparaison avec le logiciel AIMS à été effectuée montrant l'efficacité de notre approche par rapport au système de travail actuel de la compagnie «Air Algérie».

## Conclusion générale

Arrivé au terme de ce mémoire, nous pensons avoir atteint les objectifs fixés quant à la mission qui nous a été assignée. Il s'agit de l'élaboration d'un « programme équipage » qui consiste en l'affectation des activités au personnel navigant d'une compagnie aérienne en l'occurrence Air Algérie.

Pour la réalisation de notre travail, nous avons procédé d'abord par la modélisation du problème réel.

Nous avons démontré, par la suite que les heuristiques de résolution que nous avons choisies étaient les plus adaptées au cas échéant, vu la taille considérable des instances.

Aboutissant, enfin à la conception de notre application « affectation du PN », ayant pour but primordial la résolution de ce type de problème, allégeant ainsi considérablement les charges du travail, jusque là très exigeantes, du personnel du département « conception personnel navigant ».

En perspective, notre travail pourrait être sujet à des remaniements dans le but d'améliorer son efficacité.

Ceci est réalisable soit par l'apport d'autres méthodes de résolution, soit par l'amélioration des techniques que nous avons implémentées, en incluant d'autres paramètres inhérents au problème traité.

Parmi ces derniers :

- Le nombre d'alertes à prévoir pour assurer le bon déroulement du programme.
- Optimiser le nombre de navigants destinés à couvrir l'ensemble du programme d'exploitation.

## Annexe1

Notations:

CGET : Congé annuel.

CGML: Congé maladie.

ISO : Travail en vol.

VM : visite médicale.

RH : Repos légal hebdomadaire.

RD : Repos demandé.

Stage : Stage-formation.

A : Alerte terrain.

S : Alerte maison.

// : Post-récupération.

# : Pré-récupération.

/ : Blanc.

-> : Fin d'amplitude.

Aéroport ( codification):

ALG : Alger (H.BOUMEDIENE).

LYS : Lyon (SATOLAS).

MAD : Madrid (BARAJAS).

BCN : Barcelone (EL PRAT).

CAI : Caire.

CZL : Constantine (M.BOUDIAF).

TUN : Tunis (CARTHAGE).

LLE : Lille (LESQUIN).

MRS : Marseille (PROVENCE).

AAE : Annaba (EL MELLAH).

CIA : Rome(CIAMPINO).

LIN : Milan (Linate).

## REFERENCES

- [1] C.Draghisi. Contruction des plannings pour le personnel navigant des compagnies aériennes, 2005.
- [2] D.Teodoroviç, P.Luciç. Simulated annealing for the multi-objective aircrew rostering problem, 2010
- [3] D.E.Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning. Addison-Westley: Readling, MA, 1989.
- [4] Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Mchigan Press: Ann Arbor, 1975.
- [5] J.M.RENDERS « Algorithmes Génétique & Réseaux de Neurones », (HERMES) 1995.
- [6] R.Hadianti, K.Novianingsih, S.Uttungadewa. Optimisation Model for an Airline Crew Rostering Problem: Case of Garuda Indonesia, 2013.
- [7] S. ARRACHE : «Elaboration des plannings pour le personnel navigant», Conférence Internationale en Recherche Opérationnelle (CIRO'10), Marrakech 24-27 Mai 2010.
- [8] W.El Moudani, a bi-criterien approach for the airlines crew rostering problem. LAAS report 00428, october 2000.

## Résumé

Dans la plupart des compagnies aériennes, la construction d'un planning pour le personnel navigant reste toujours un problème délicat. Beaucoup de travaux ont été réalisés montrant la complexité de ce type de problème. Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur la modélisation et la résolution du problème d'affectation du personnel navigant.

Dans un premier temps, nous avons montré que ce problème est un problème NP-difficile. Nous avons par la suite, opté pour les heuristiques de résolution dont les algorithmes ont été adaptés au cas de la compagnie «Air Algérie». Il s'agit des heuristiques «PN par PN» et «Rotation par Rotation» pour la génération d'une solution de départ. L'algorithme «Génétique» est appliqué pour l'amélioration de la solution obtenue. Les tests effectués sur des données réelles de la compagnie montrent l'efficacité de la méthodologie proposée par rapport au système de travail actuel.

