

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD Dahlab de Blida



كلية علوم المهندسين
Faculté des Sciences de l'Ingénieur



قسم علم الطيران
Département d'Aéronautique



Projet de Fin d'Etudes En vue de l'Obtention
du Diplôme D'Ingénieur d'Etat en Aéronautique

Spécialité : Navigation Aérienne
Option : Exploitation

Thème :

Simulation de la Gestion du trafic Aérien autour d'un Aéroport en Utilisant les Algorithmes Génétiques (cas pour le Séquencement des Vols à l'Atterrissage).

Présenté par :

* Mr : ABDOU MAHAMADOU Hadi

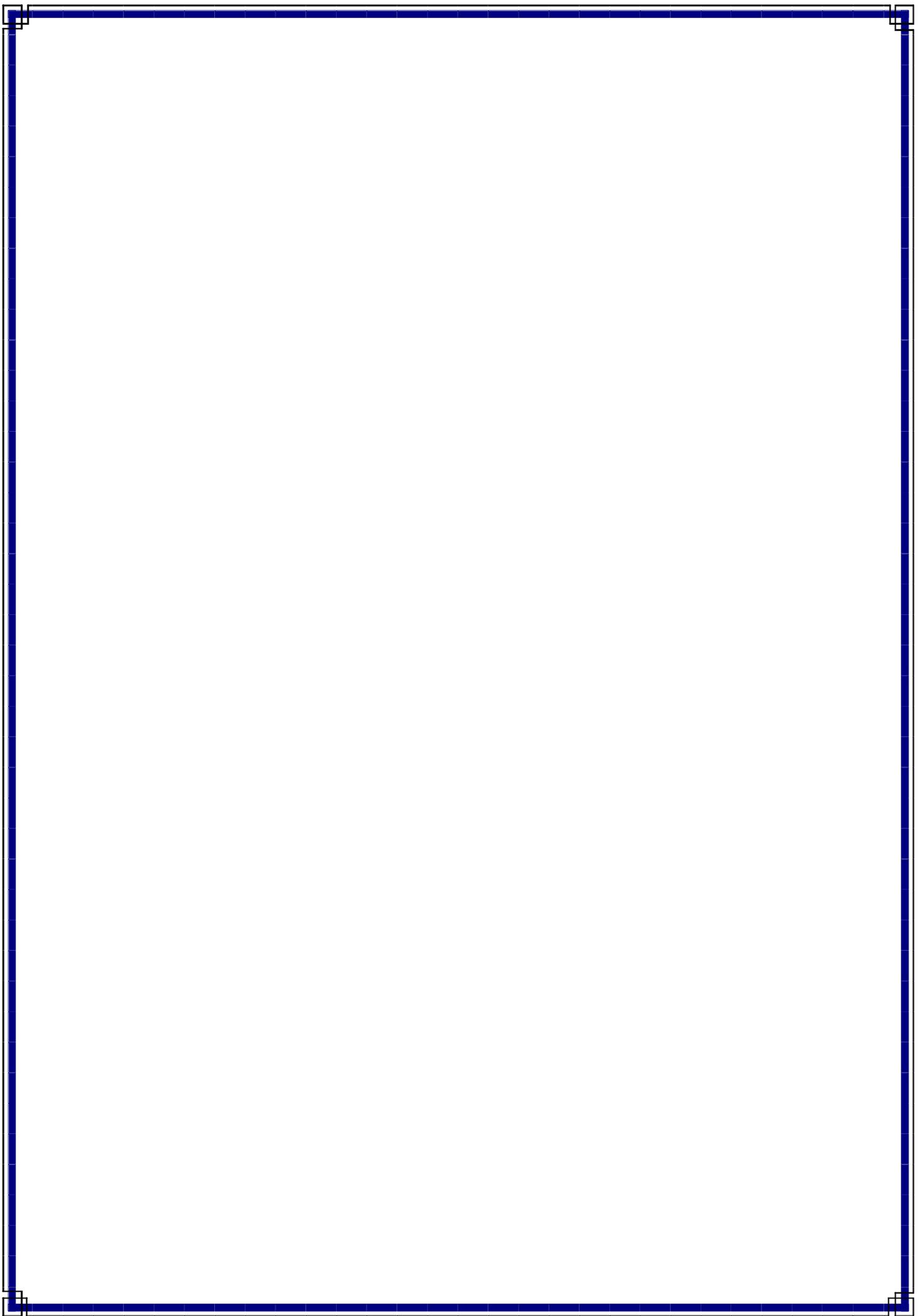
* Mr : OULD SID'ELEMINE Mohamed

Encadré par :

* Mr : BENNOUD Salim

* Mme : DRARENI Fatima Zohra

Promotion : 2008/2009



Résumé

Autour des plate-formes aéroportuaires (zone d'approche), la circulation est généralement dense. C'est dans ce contexte, que ce travail s'inscrit dans le cadre de la simulation de la gestion optimale de séquençement des vols au niveau de cette zone. Pour cela nous utilisons une méthode de résolution basée sur les algorithmes génétiques pour trouver et minimiser les retards que subissent les aéronefs niveau de l'atterrissage, afin de garantir à l'intérieur de cette zone une densité de trafic convenable pour permettre à chaque aéronefs d'avoir une heure d'atterrissage optimale pour atteindre la piste.

Mots-clés :

Simulation, gestion du trafic aérien, aéroport, atterrissage, algorithmes génétiques.

Summary:

Around the airport platforms (zone of approach), the traffic is generally dense. It set in this context that the work joins with the framework of the optimal'simulation management of sequence of the flights at the level of this zone. Thus, we use a method of resolution based on the genetic algorithms to find and minimize the delays that aircrafts level of the landing undergo, To guarantee inside this zone a density of suitable traffic to allow in every aircrafts to have the optimal one hour of landing to reach the runway.

Keywords:

Simulation, air traffic management, airport, landing, genetic algorithms.

ملخص:

بالقرب من منشآت المطار (منطقة الاقتراب)، تكون حركة المرور عادة كثيفة. وفي هذا الصدد، يندرج هذا العمل في سياق المحاكاة للتسيير الأحسن والمعقلن لتجزئة الرحلات على مستوى هذه المنطقة. من أجل ذلك استخدمنا طريقة حل تركز على الخوارزميات الجينية من أجل إيجاد وجعل التأخرات التي تتعرض لها الطائرات على مستوى الهبوط اقل ما يمكن، لضمان كثافة مناسبة لحركة المرور في داخل هذه المنطقة بغية السماح لكل طائرة بالحصول على توقيت هبوط ملائم، حتى يتسنى لها الوصول إلى المهبط. كلمات مفتاحيه : المحاكاة ، تسيير حركة المرور الجوية ، المطار، الهبوط ، الخوارزميات الجينية .



Nous exprimons notre plus grande reconnaissance et nos plus vifs remerciements à notre Promoteur : Mr. BENNOUD Salim ainsi qu'à notre Co-promotrice :Mm. DRARENI Fatima Zora pour leurs soutiens dans la direction du projet et pour avoir guidé ce travail en conjuguant habilement disponibilité, conseils et critiques constructives.

Nous tenons aussi à remercier Mr. BOUDEY Ahmed pour son inestimable aide dans le cadre de développement de l'application informatique et pour ses précieux conseils.

Nous tenons à remercier également tout le corps professorats du département d'aéronautique.

Nous exprimons nos remerciements aux membres du jury de nous avoir honoré en acceptant de juger notre travail,

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont involontairement oubliés et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Juin2009

Le binôme

A.M.Hadi &O.S.E. Mohamed.



*A mes Très chers Parents, qui m'ont aidé, soutenu et encouragé tout au long de mes études.
A mon tuteur El hadji Mossi Hassoumi et sa femme, qui m'ont toujours aidé pour arriver au
terme de mes études.
A mon très cher cousin Mounkaila pour son soutien et encouragement.
A mon binôme Mohamed et sa famille.
A tous les camarades de la promotion.
A toutes mes amies spécialement: Alio, Akram, Ousmane, Boubacar, Gazibo, Illiassou.
Je vous dédie ce travail.*

HADI.



Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui sont la source de mon éducation, mon savoir et mes principes.

A ma mère (Oum'elkhairy)

*A mes très chers frères pour leur soutien. Mon tuteur Souleymane, Mokhtar ,Yacob, Ahmed .
et sœurs Maima, Salma, Khadi, Mariem.*

A mes oncles Akwa, Chaqar, Ahmed Salem, Bah, Nejemdine.

A mes tantes Nah , Fatimatou (Doudouh).

A tous mes Neveux, Nièces, Cousins, Cousines, Beaux-frères et Belles-soeurs.

A mon binôme Hadi et sa famille.

A tous les camarades de la promotion.

A tous les Compatriotes en Algérie surtout mes amis.

A tous les gens que j'aime et dont je n'ai pas cité les noms.

MOHAMED.

Sommaire

Liste des figures
Liste des tableaux

Introduction générale.....11

Chapitre I

La Gestion du Trafic Aérien

I.1.Introduction.....	13
I.2.Contexte de la gestion du trafic aérien.....	13
I.2.1.Définition du concept ATM.....	13
I.2.2.Composantes du concept.....	14
I.2.3.Contrôle du trafic aérien.....	14
I.2.3.1.Les types du trafic aérien.....	14
I.2.3.2.Les services de la circulation aérienne (ATS)	14
I.2.4.La gestion des flux du trafic aérien et de la capacité (L'ATFCM).....	17
I.2.4.1.La capacité.....	17
I.2.4.2.La régulation du flux du trafic aérien.....	17
I.2.5.Organisation et gestion des espaces aériens.....	19
I.2.5.1.Organisation de l'espace aérien.....	19
I.3.LA Gestion du trafic aéroportuaire.....	24
I.3.1-Contrôle d'aéroport.....	24
I.3.2.Capacité d'un aéroport.....	25
I.3.2.1.Définition.....	25
I.3.2.2.La capacité théorique de l'aéroport.....	25
I.3.2.3. La capacité opérationnelle(ou pratique).....	25
I.3.2.4.La capacité déclarée.....	25
I.3.2.5.La capacité de programmation.....	25
I.3.2.6.La capacité des pistes	26
I.3.3.Les facteurs influençant sur la capacité d'un aéroport.....	26
I.3.4.Les difficultés aéroportuaires identifiées.....	27

I.3.4.1.L'environnement.....	27
I.3.4.2. La sécurité.....	28
I.3.5.Les principaux concepts pour optimisation du trafic au sol.....	28
I.3.5.1.Optimisation de la séquence de la piste.....	28
I.3.5.2.Optimisation de procédures d'approche.....	28
I.3.5.3.Développement des outils d'aider au contrôle.....	29
I.3.5.4.Diminution des normes de séparation.....	29
I.3.5.5.Quelques outils opérationnels du contrôle d'aéroport.....	29
I.3.5.6.Eléments sur les systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol.....	31
I.3.5.7.La situation actuelle.....	34
I.3.5.8.Résolution des situations.....	35
I.4.Conclusion.....	36

Chapitre II

Présentation des Algorithmes Génétiques

II.1.Introduction.....	38
II.2.Nomenclature de l'algorithme génétique.....	39
II.3.Les avantages de l'algorithme génétique.....	40
II.4.Principes de base des algorithmes génétiques.....	41
II.5.Gestion des contraintes.....	43
II.6.Fonctionnement des algorithmes génétiques.....	43
II.6.1.Codage du chromosome.....	44
II.6.2.Génération de la population initial.....	45
II.6.3.Méthodes de sélection.....	45
II.6.4.Opérateur de croisement.....	47
II.6.5.Opérateur de mutation.....	48
II.6.7.Méthode d'insertion.....	49
II.6.7.Test d'arrêt	50
II.7.Amélioration classique.....	50
II.7.1. Introduction.....	50

II.7.2.Le scaling.....	51
II.7.2.1.Scaling linéaire.....	52
II.7.2.2.Scaling exponentiel.....	53
II.8.Théorie du schéma.....	53
II.8.1.Définitions fondamentales.....	53
II.9.Certains différents types des algorithmes génétiques.....	54
II.10.Limitations des algorithmes génétiques.....	55
II.11.Les applicassions des algorithmes génétiques dans le domaine du transport.....	55
II.12.Conclusion	57

Chapitre III

Modélisation Mathématique du Problème

III.1. Introduction.....	59
III.2. Problématique.....	59
III.3.Objectif à Optimiser.....	59
III.4. Les type d'ordonnancement.....	60
III.5. Formulation mathématique du problème.....	60
III.5.1. Formulation avec une seule piste.....	60
III.5.2. Les Contraintes.....	61
III.5.3. La Fonction Objectif.....	61
III.6. Optimisation du problème Par Les algorithmes génétiques.....	61
III.6.1. Définitions Paramètres recherches.....	61
III.6.2. Génération de la population initiale.....	62
III.6.3.Les Algorithmes établissent pour le calcul des heures d'atterrissage des avions..	62
III.7.Description du processus d'évaluation.....	65
III.7.1.Codage.....	65
III.7.2.Présentation génétique.....	66
III.7.3.Sélection.....	66
III.7.4.Croisement.....	67
III.7.5.Mutation.....	68
III.8. Conclusion.....	69

IV.1. Introduction.....	71
IV.2. Le langage de programmation Delphi.....	71
IV.3.Le choix du langage de programmation.....	71
IV.4.Présentation du logiciel.....	72
IV.4.1. Organigramme.....	72
IV.4.2.Présentation des interfaces.....	73
IV.5. Avantage de l'application.....	80
IV.6. les résultats obtenus	81
IV.6.1.Analyse des résultats obtenus.....	81
IV.6.2.Comparaison des deux algorithmes.....	83
IV.6.3. Évolution de la fonction.....	84
IV.6.4.Influence des paramètres.....	85
IV.7.Conclusion.....	86

Conclusion Générale	87
---------------------------	----

Glossaire.....	88
Annexes.....	90

Bibliographie

La liste des figures

Fig. I.1 : Les positions de contrôle du trafic aérien.....	16
Fig. I.2 : Sectorisation de l'espace aérien algérien.....	20
Fig. I.3 : présentation de l'espace aérien inférieur.....	20
Fig. I.4 : présentation de l'espace aérien supérieur.....	21
Fig. I.5 : Organisation de l'espace aérien en résumé	23
Fig. II.1 : principe général des algorithmes génétiques.....	43
Fig. II.2 : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	44
Fig. II.3 : Les sélections classiques risquent ici de ne reproduire qu'un seul individu	51
Fig. II.4 : Risque de convergence prématurée vers l'optimum local.....	51
Fig. II.5 : Risque de reproduction forte des mauvais individus.....	52
Fig. III.1 : Fenêtre d'atterrissage et les heures moniales des avions.....	65
Fig. III.2 : Algorithme de procédure croisement.....	67
Fig. III.3 : Algorithme de procédure mutation.....	68
Fig. IV.1 : Organigramme pour l'usage de l'application.....	72
Fig. IV.2 : Pénalité en fonction du N°de génération (AG1).....	83
Fig. IV.3 : Pénalité en fonction de N° de génération (AG2).....	83
Fig. IV.4 : Evolution de la fonction objective en fonction du nombre d'avions.....	84
Fig. IV.5 : L'évolution de la fonction fitness en fonction du facteur de mutation.....	84

GLOSSAIRE :

A

- ADS-B** : Automatic Dependant Surveillance-Broadcast.
- AG** : Algorithme Génétique.
- AGMS** : Airport Ground Movement Simulator: un outil pour la simulation des mouvements des avions au sol.
- ALP** : Problème d'Atterrissage des Avions.
- AMAN** : Arrival Manager (système diffusant les informations sur les vols à l'arrivée d'un aéroport pour préparer leur séquençement)
- APP** : Approach.
- A-SMGCS** : Surface Movement Guidance and Control System. Concepts définis par l'OACI, ayant aboutis à l'actuel système de surveillance du trafic au sol.
- ASM** : Air Space Management.
- ATC** : Air Traffic Control.
- ATFM** : Air Traffic Flow Management..
- ATM** : Air Traffic Management.
- ATS** : Air Traffic System.

C

- CAG** : Circulation Aérienne Générale.
- CCR** : Centre de Contrôle Régional.
- CERF** : Centre d'Etude et de Recherche Français
- CENA** : Centre d'étude de la Navigation Aérienne.
- CFMU** : Central Flow Management Unit (cellule européenne de la regulation des flux de trafic)
- CTA** : Control Area. Région de contrôle.
- CTR** : Control zone.

D

- DMAN** : Departure Manager (système diffusant les informations sur les vols au départ d'un aéroport vers les espaces qu'il va traverser)

F

- FIR** : Flight Information Region.
- FIS** : Flight Information Service.

FL : Flight Level.

I

IFR : Instrument Flight Rules.

L

LOG : Laboratoire d'Optimisation Globale

N

NDS : Non Dominated Sorting.

O

OACI : Organisation de l'Aviation Civile Internationale. L'Organisation de l'Aviation Civile Internationale.

P

Pm : Probabilité de Mutation.

Px ou Pc : probabilité de Croisement.

R

RNAV : Requirement Navigation.

S

SALSA : Systèmes d'Assistance à la circulation Locale et au Sol sur les Aéroports.

SAMBA : Systèmes d'Analyse des Mouvements et des Besoins des Aéroports.

SID : Standards Instruments Departure.

STAR : Standards Arrival.

SOL : Control Sol.

T

TMA : Terminal Area

TSP : Problèmes du Voyageur de Commerce.

TWR : Tower.

W

WAR : Weighted Average Ranking.

Introduction générale

Le trafic aérien mondial, est depuis longtemps un secteur globalement en forte croissance, face à un trafic qui double tous les dix ans [5], les structures actuelles d'opération et de contrôle du trafic aérien ne sont pas en mesure de faire face à cette croissance. Les limites de capacité, aussi bien pour les flux de trafic aérien que pour les activités aéroportuaires, sont déjà presque atteintes dans quelques parties du monde notamment en occident. C'est pourquoi de nombreux aéroports dans le monde sont au bord de la saturation et le moindre incident peut se traduire par une situation très critique qui est fortement pénalisant pour tous les acteurs du transport aérien. Cette saturation induite d'importants impacts sur la sécurité, l'efficacité, la ponctualité et la fluidité des opérations de transport aérien et aura donc des conséquences économiques notables. L'objectif principal de ce mémoire vise à l'amélioration des techniques de gestion du trafic du aérien sur plate-forme Aéroportuaire en particulier le séquençement des vols à l'atterrissage. Pour aboutir à cet effet nous utilisons les algorithmes génétiques qui se sont déjà révélés très efficaces pour la résolution de ce problème d'ordonnancement des aéronefs à l'atterrissage.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres:

- Le chapitre I présente les aspects généraux de la gestion du trafic aérien, en précise les acteurs et les systèmes actuellement développés à cet effet.
- Le chapitre II présente une description générale sur les algorithmes génétiques.
- Le chapitre III propose un modèle mathématique pour la résolution du problème d'atterrissage des avions (ALP) sur une piste.
- Chapitre IV est consacré à la conception et la réalisation du logiciel (application).

Enfin, la conclusion générale dresse un bilan de l'ensemble de l'étude réalisée et

Propose plusieurs perspectives de recherche.

I.1.Introduction

Ce chapitre traite sur les aspects généraux du trafic aérien, il se divise en deux parties, la première partie est consacrée à la présentation des principes généraux de la gestion du trafic aérien ainsi que les différents concepts existants qui visent à faciliter la gestion d'un nombre toujours croissant d'aéronefs [18] et plus particulièrement le concept qui nous intéresse, quant à la deuxième nous avons-nous intéressons à quelques éléments misent en jeu dans la gestion du trafic aéroportuaire.

I.2.Contexte de la gestion du trafic aérien

Au cours des dernières décennies, l'augmentation de la densité de trafic aérien (de l'ordre de 5% par an [7]) et des performances des aéronefs à conduit les états à se doter d'un système de gestion du trafic de plus en plus important tandis que les fonctionnalités des équipements aidant à la gestion du trafic se sont enrichies à bord des avions. La gestion du trafic aérien se fait à différentes échelles et on peut essentiellement en distinguer trois niveaux :

- Le filtre (ATS) :c'est la phase clé qui consiste à assurer la sécurité en évitant les conflits entre aéronefs.
- Le filtre (ATFM) : qui comprend trois phases (stratégique, pré-tactique et tactique)
- Le filtre (ASM) : qui est la gestion de l'espace aérien.

Ces trois briques complémentaires permettent d'augmenter la capacité de la gestion du trafic aérien, c'est-à-dire le nombre d'avions gérés, tout en augmentant la sécurité aérienne dans le ciel.ces filtres seront explicités par la suite.

I.2.1.Définition du concept ATM

Le concept vise en premier lieu à procurer des avantages à tous les membres de la communauté ATM. Du point de vue des usagers de l'espace aérien, il permet une plus grande équité dans l'accès à l'espace aérien, un meilleur accès à une information pertinente livrée en temps utile pour les décisions et une plus grande autonomie dans les prises de décision, y compris celles touchant la gestion des conflits, faciliteront l'exécution des opérations et procureront de meilleurs résultats individuels, dans un cadre de sécurité approprié. Cette gestion est l'intégration dynamique de la circulation aérienne et de l'espace aérien de façon sûre, économique et efficace, par la fourniture d'installations et de services sans discontinuité en collaboration avec toutes les parties [16].C'est pourquoi Le processus opérationnel de l'ATM a pour objectif de permettre aux exploitants d'aéronefs d'observer leurs heures prévues de départ et d'arrivée. Ainsi que leurs profils de vol préférés avec un minimum de contraintes et sans compromettre la sécurité [7].

I.2.2.Composantes du concept

Le concept opérationnel définit sept composantes interdépendantes qui, une fois intégrées, forment le futur système ATM, à savoir : l'organisation et la gestion de l'espace aérien, les opérations d'aérodrome, la mise en équilibre de la demande et de la capacité, la synchronisation de la circulation, la gestion des conflits, les opérations des usagers de l'espace aérien et la gestion de la fourniture des services ATM. L'ordre de présentation est sans rapport avec un ordre de priorité. La gestion, l'utilisation et la transmission de données et de renseignements sont essentielles au bon fonctionnement de ces composantes [16].

I.2.3.Contrôle du trafic aérien

Le but premier du contrôle est d'assurer la sécurité du trafic, puis d'optimiser les flux de trafic. C'est pourquoi les organismes du contrôle aérien sont responsables de l'écoulement sûr, ordonné et rapide du trafic, afin d'aider à l'exécution sûre et efficace des vols dans l'espace dont ils ont la charge. Donc le but final est de (Prévenir les abordages en vol, Prévenir les collisions au sol, Faciliter et régulariser la circulation, Informer les usagers, de Surveiller et alerter).

I.2.3.1.Les types de vols

On distingue les types de vols suivants :

-Vol VFR (Visual Flight Rules) ou régime de vol à vue. C'est un régime de vol qui est soumis à des conditions de météorologie assez bonnes. En général le vol VFR demande une bonne visibilité et des plafonds nuageux assez élevés.

-Vol IFR (Instrument Flight Rules) ou régime de vol aux instruments. Le pilote navigue alors grâce au matériel de radionavigation et n'a donc pas besoin de références visuelles.

I.2.3.2.Les services de la circulation aérienne (ATS)

Terme générique désignant, selon le cas, le service d'information de vol, le service d'alerte, le service consultatif de la circulation aérienne, le service du contrôle de la circulation aérienne (contrôle régional, contrôle d'approche ou contrôle d'aérodrome). Généralement les services de la circulation aérienne comprennent trois services, définis ci-après. [4]

I.2.3.2.1. Service de contrôle de la circulation aérienne [6]

Service assuré dans le but:

-d'empêcher:

- 1) les abordages entre aéronefs;
- 2) les collisions, sur l'aire de manœuvre, entre les aéronefs et des obstacles;

- d'accélérer et de régulariser la circulation aérienne. Ce service étant lui-même subdivisé en trois, de la façon suivante :

a) Le contrôle d'aérodrome (TWR) :

S'effectue à partir des tours de contrôle (TWR), est responsable de toute la phase aéroportuaire des vols, depuis la descente finale de l'avion jusqu' à son décollage suivant, comprenant notamment le séquencement des mouvements sur la piste, le guidage au sol le long des voies de circulation (taxiways) et l'assistance pendant l'escale. La surveillance du trafic est avant tout visuelle (ces positions sont situées dans la tour de contrôle) mais les plus grands aéroports sont aujourd'hui munis d'un système de visualisation radar du trafic au sol. Voir Figure1.1.

b) Le contrôle d'approche (APP) :

Gère les avions aux alentours d'un aéroport, pendant leur phase de descente ou de montée. Le système de surveillance est identique à celui des secteurs en route, mais la densité de trafic est généralement plus élevée : des limitations de vitesse sont souvent imposées et peuvent être associée à des réductions de normes de séparation. Des procédures d'attente spécifiques (stack) sont utilisées pour réguler le flux d'arrivée et préparer correctement le séquencement des atterrissages, bien avant la phase finale de la descente. C'est celui qui nous intéresse directement.

Ce service est assuré :

-Par une tour de contrôle d'aérodrome ou un centre de contrôle régional (CCR) ;

-Par un organisme de contrôle d'approche, lorsqu'il est nécessaire ou souhaitable d'établir un organisme séparé. Voir FigureI.1

c) Le contrôle en route (CCR) :

est responsable des vols en croisière, les avions contrôlés suivent des routes prédéfinies à une altitude (niveau de vol) généralement élevée et dans des couloirs aériens réservés (Airways). La surveillance du trafic dans ces espaces se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un écran radar et d'un contact radio avec les pilotes. Des manœuvres (virages, changements d'altitude, modifications de route) peuvent être ordonnées à tout moment par les contrôleurs pour assurer les séparations réglementaires entre aéronefs, tout en les guidant progressivement vers leur destination. Voir Figure I.1.

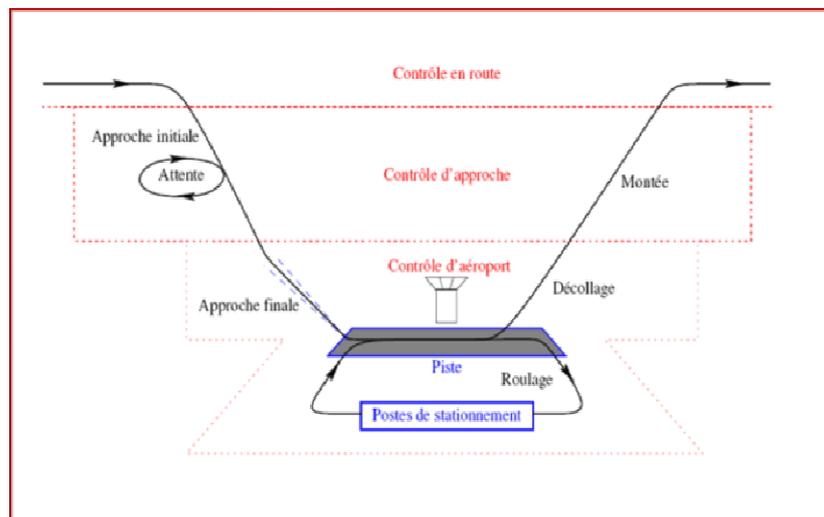


Fig. I.1: Les positions de contrôle du trafic aérien [6].

I.2.3.2.2. Service d'information de vol

Service assuré dans le but de fournir les avis et les renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace des vols. Ce service sera assuré pour tous les aéronefs auxquels les renseignements correspondants pourraient être utiles, et

- a) Auxquels est assuré le service du contrôle de la circulation aérienne ; ou
- b) Dont la présence est connue par autre moyens des organismes des services de la circulation aérienne intéressés. [4]

I.2.3.2.3. Service d'alerte

Service assuré dans le but d'alerter les organismes appropriés lorsque des aéronefs ont besoin de l'aide des organismes de recherches et de sauvetage et de prêter à ces organismes le concours nécessaire. Ce service sera assuré :

- a) à tous les aéronefs auxquels sont assurés les services de la circulation aérienne ;
- b) dans la mesure du possible, à tous les autres aéronefs pour lesquels un plan de vol a été déposé, ou dont la présence est connue des services de la circulation aérienne pour toute autre raison ; et
- c) à tout aéronef que l'on sait ou l'on croit être l'objet d'une intervention illicite. [4]

I.2.4. La gestion des flux du trafic aérien et de la capacité (L'ATFCM)

L'objectif de l'ATFCM est d'assurer l'écoulement optimal du trafic aérien vers une zone ou à travers une zone quand la demande excède ou excédera probablement la capacité disponible. L'ATFCM réduit donc les retards subis par les aéronefs, en vol comme au sol et empêche une surcharge du système [7].

I.2.4.1. La capacité

Elle se définit par la demande (ou charge) qui ne devant pas être dépassée pour que le service effectif rendu par le système corresponde à l'attente des usagers. Pour le système de contrôle aérien, La capacité ATC devrait être exprimée sous la forme du nombre maximal d'aéronefs qui peuvent être acceptés au cours d'une période donnée dans l'espace aérien ou à l'aérodrome concerné [4].

I.2.4.2. La régulation du flux du trafic aérien [17]

Qu'est ce que la régulation aérienne ?

L'espace aérien est une ressource limitée qui est soumise à une forte demande dans certaines parties du monde telles que l'Europe de l'Ouest, l'Amérique du Nord et l'Asie du

Sud Est. Afin d'assurer le respect des normes de sécurité imposant une séparation physique minimale entre deux avions, cet espace aérien a été divisé dans ces zones en différents secteurs aériens, zones d'espace tridimensionnelles : à chaque secteur est affectée une équipe de contrôleurs aériens qui est responsable du respect de ces normes en temps réel : c'est le contrôle aérien (ATC pour Air Traffic Control).

Le nombre d'avions qu'une équipe de contrôleurs peut gérer en même temps est évidemment limité et face à la forte demande de trafic aérien, un mécanisme est nécessaire pour éviter les surcharges de travail pour les contrôleurs et pour assurer une bonne utilisation des ressources de contrôle disponibles : ce mécanisme de régulation du trafic aérien est appelé ATFM (Air Traffic Flow Management).

Les trois objectifs principaux de l'ATFM sont alors : prévenir les surcharges, lisser l'écoulement du trafic et minimiser les conséquences des actions de régulation notamment pour les compagnies aériennes.

L'adaptation relative du trafic et de la capacité du system est le fruit d'un ensemble de filtres prédictifs, fonctionnant à échéances variables :

-La phase Stratégique : c'est l'organisation à long terme de la structure de l'espace aérien (routes, secteurs, zones militaires, etc...) et de l'affectation des flux de trafic sur le réseau de routes.

-La phase Pré-régulation : au jour J-2 est défini un schéma de pré-régulation du trafic pour le jour J, en fonction du trafic prévu et d'un schéma prévisionnel d'ouverture des secteurs aériens par les centres de contrôle.

-Régulation en temps réel : le jour J, le schéma de régulation est réajusté en fonction du trafic réel et des impondérables du moment.

-la phase tactique : c'est la phase clé consistant à assurer la séparation entre les avions traversant l'espace. L'horizon temporel du contrôle va de la trentaine de minutes pour la pré-détection d'un conflit présumé, jusqu'à quelques minutes avant le conflit pour la résolution proprement dite.

-Anti-collision d'urgence : il s'agit de systèmes embarqués sur l'avion, dont le but est de détecter la présence du trafic environnant et d'en informer le pilote, et en dernier recours de lui fournir des avis d'évitement lorsqu'une collision est anticipée. L'horizon temporel de l'anticollision est d'environ 45 secondes avant la collision présumée [6].

I.2.5.Organisation et gestion des espaces aériens

L'organisation de l'espace aérien établira des structures d'espace aérien en fonction des divers types d'activité aérienne, du volume du trafic et des différents niveaux de service. La gestion de l'espace aérien est le processus par lequel les options d'espace aérien sont choisies et appliquées pour répondre aux besoins de la communauté ATM. Les changements conceptuels clés seront les suivants:

- a) tout l'espace aérien fera l'objet de l'ATM et sera une ressource utilisable ;
- b) la gestion de l'espace aérien sera dynamique et souple ;
- c) toute restriction d'utilisation d'un volume donné d'espace aérien sera considérée comme temporaire ;
- d) tout l'espace aérien sera géré de façon souple. Les limites d'espace aérien seront ajustées en fonction de courants de trafic particuliers ; elles ne devraient pas dépendre de frontières nationales ni d'installations [16].

I.2.5.1.Organisation de l'espace aérien

I.2.5.1.1.Classification des espaces aériens

L'espace aérien est divisé en volumes d'espace qui ont été classés par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) en sept (7) catégories (nommées de A à G) selon les services rendus (service de contrôle, service d'information de vol et service d'alerte) et le type de vols pouvant traverser ces espaces. C'est pourquoi les portions d'espace aérien sont généralement classés de (A, B, C, D, E, F, G) [8]. Voir le tableau annexe A.

I.2.5.1.2.Sectorisation de l'espace aérien

L'espace contrôlé, quelle que soit sa classe, est découpé en tranches d'espaces volumiques, appelées secteurs de contrôle. La figure montre la projection en dimensions du découpage de l'espace aérien ALGERIEN. Chaque secteur est géré par un équipe de contrôleurs (en général deux) charges d'assurer la sécurité du trafic à l'intérieur.

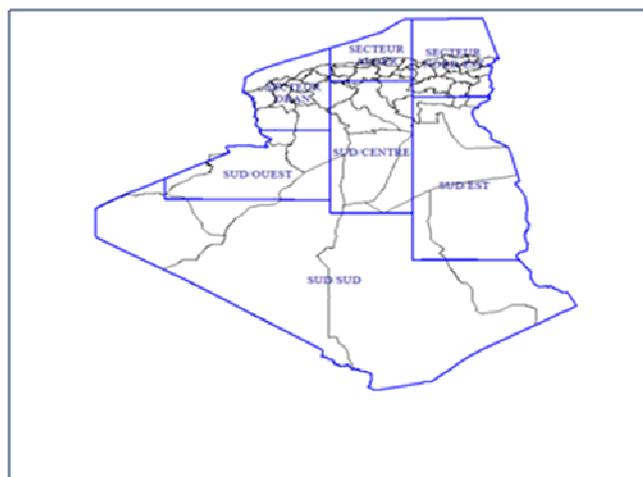


Fig.I.2 : Sectorisation de l'espace aérien algérien [9].

I.2.5.1.3. Structure de l'espace aérien

Dans certaines zones la densité et la diversité du trafic aérien imposent aux aéronefs de suivre des procédures strictes. A l'inverse des autres portions l'espace qui sont peu fréquentées .c 'est dans sens qu'un aménagement de l'espace aérien doit être réalisé a travers la subdivision de l'espace en plusieurs parties dont chacune étant adaptée à la densité et au type de trafic auxquels elle est soumise. Un espace aérien est divisé verticalement en deux étages qui sont :

✦ Espace aérien inférieur

Début de la surface de la terre jusqu'au niveau FL245 inclus

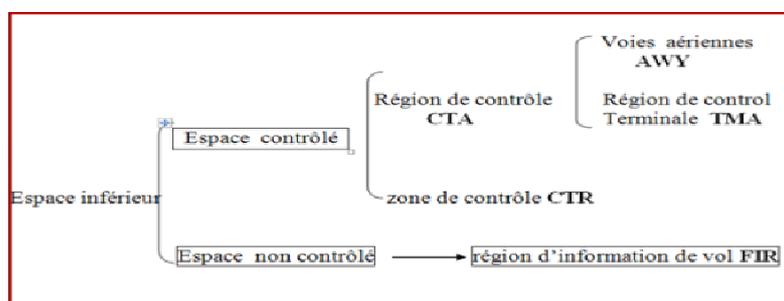


Fig.I.3: présentation de l'espace aérien inferieur [14].

✈ Espace aérien supérieur

C'est à partir du niveau FL245 jusqu'au plafond

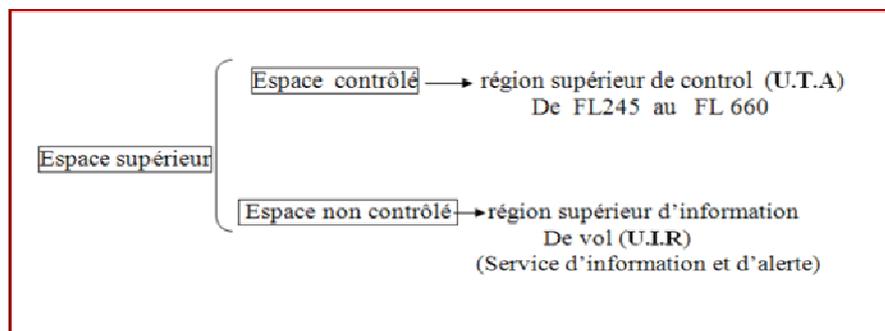


Fig. I.4 : présentation de l'espace aérien supérieur [14].

Dans les espaces aériens, les exigences réglementaires sont beaucoup strictes. Pour séparer les différents types de trafic qui appartiennent à la CAG (circulation aérienne générale), l'espace aérien est subdivisé à base des services rendus qui sont en général en deux types d'espace:

- ✓ Espace aérien non contrôlé ;
- ✓ Espace aérien contrôlé.

-Espace aérien non contrôlé

Les espaces aériens non contrôlés sont des espaces de trafic moindre, où l'intervention des services de la circulation aérienne est limitée à l'information et l'alerte.

-Espace aérien contrôlé

C'est un Espace dans lequel un vol bénéficie des services rendus par l'organisme chargé de contrôle de l'espace dans lequel il est entré, pour le vol VFR les conditions VMC en espace aérien contrôlé changent selon que le vol s'effectue en dessous ou en dessus de niveau FL 100. Un espace aérien n'est contrôlé que pendant les horaires de fonctionnement de l'organisme chargé d'y assurer le service de contrôle de la circulation aérienne, aux heures de fermeture de l'organisme, l'espace aérien est non contrôlé, ce type d'espace comprend :

- ✈ Les régions de contrôle CTA.
 - ✓ les régions de contrôle terminal TMA.
 - ✓ les voies aériennes AWY.
- ✈ Les zones de contrôle CTR.
- ✈ Les régions supérieures de contrôle UTA.

-Zones à statut particulières

Des volumes particuliers peuvent être délimités à l'intérieur des régions d'information de vol, qui sont pratiquement trois types des zones à statuts particuliers a savoir : zones dangereuse, réglementaire et interdite. [4]

a) Zones interdites

Les zones interdites sont des zones dans les limites desquelles le vol des aéronefs est interdit sauf autorisation de l'autorité compétente. [4]

On les identifie par une lettre « P » suivie d'un numéro.

Exemple : DAP 51 A/Oussera. [9]

b) Zones réglementaires

Ce sont des zones définies au dessus du territoire ou des eaux territoriales d'un état , le vol des aéronefs y est subordonnée à certain conditions spécifiées qui peuvent aller jusqu'au l'interdiction de pénétration .[4]. On les identifiés par une lettre « R » suivie d'un numéro de la zone.

Exemple : DAR 4-Bousfer. [9]

c) Zones dangereuses

Certain zones ont un caractère particulièrement dangereux pour la navigation aérienne au vu de l'activité qui s'y déroule. La traversée d'une zone dangereuse réclame une vigilance accrue du pilote et dans certain cas il est souhaitable de l'éviter lorsqu'elle est activée. [4] Les zones dangereuses en espace supérieur ne sont pas géré de la même façon qu'en espace inférieur .

Exemple: DAD 74 -TAFARAOUI: (Entraînement ou pilotage) [9].

I.2.5.1.4. Les différents types des routes aériennes

a) Routes ATS

Route destinée à canaliser la circulation pour permettre d'assurer les services de la circulation aérienne. L'expression « ROUTE ATS » est utilisée pour désigner, selon le cas les voies aériennes, les routes consultatives, les routes contrôlées ou routes nom contrôlées, les routes d'arrivée ou de départ...etc.

Une route ATS est définie par des caractéristiques qui comprennent un indicatif de route ATS, la route à suivre et la distance entre les points significatifs (points de cheminement), des prescriptions de compte rendu et l'altitude de sécurité la plus basse déterminée par l'autorité ATS compétente. [4]

b) Routes à service consultatif : Route désignée le long de laquelle le service consultatif de la circulation aérienne est assuré.

c) Routes RNAV

Route ATS établie à l'usage des aéronefs qui peuvent utiliser la navigation de surface, en se basant sur des points fictifs. Une route RNAV est une voie aérienne utilisée par les aéronefs civils avec une méthode de navigation permettant le vol sur n'importe quelle trajectoire voulue, dans les limites de la couverture des aides de navigation à référence sur station ou des limites des possibilités d'une aide autonome ou grâce à une combinaison de ces deux moyens [4].

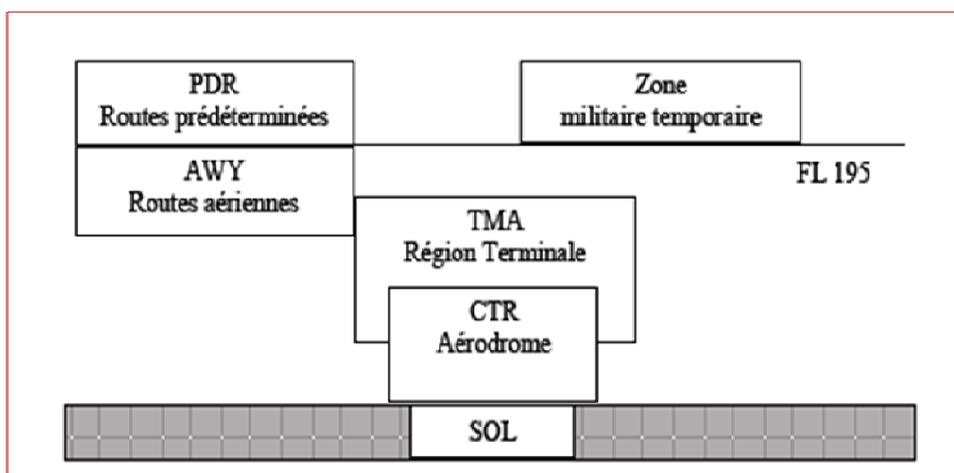


Fig.I.5 : Organisation de l'espace aérien en résumé [18].

I.3. La gestion du trafic aéroportuaire

I.3.1. Contrôle d'aéroport

La grande diversité des opérations au sol et en vol nécessite souvent la coexistence de différentes positions de contrôle au sein d'un même aéroport :

-**Les positions « LOC »** gèrent les pistes de l'aéroport : elles sont responsables du séquençement des mouvements sur la piste, en accord avec les normes de séparation réglementaires, définies en temps et en distance en fonction des catégories de turbulence de sillage et des vitesses des avions. Le respect des normes induit notamment que la piste ne peut absorber qu'un seul mouvement à la fois. La principale difficulté liée à cette position est relative à la gestion du flux des arrivées, dont l'ordonnancement et la trajectoire ne peuvent plus être modifiés pendant l'approche finale. Les ordres de contrôle donnés aux avions concernent :

- ✓ Les autorisations (clairances) de décollage et d'atterrissage ;
- ✓ Les éventuelles modifications de vitesse pour les avions en approche finale : ces actions sont limitées par les performances des avions mais sont indispensables à la gestion correcte des pistes partagées par les départs et les arrivées ;
- ✓ L'affectation des bretelles d'entrée et de sortie de piste, souvent négociée avec les pilotes ;
- ✓ En dernier recours, la remise de gaz lorsque la piste n'est pas disponible pour une arrivée.

-**Les positions « SOL »** sont chargées de la surveillance du trafic au roulage sur les taxiways : elles peuvent imposer un chemin à suivre à chaque avion et participent au respect des séparations aux abords des intersections, en ordonnant l'arrêt de certains d'entre eux. Aucune vitesse de roulage n'est cependant imposable : la consigne officielle préconise le roulage «au pas », à une vitesse adaptée aux conditions de circulation et le respect des séparations reste officiellement sous l'entière responsabilité des pilotes, ce qui rend parfois les prises de décision ambiguës.

- **Les positions « APRON »** sont responsables du séquençement des avions dans les zones de stationnement (ordre des entrées et des sorties de parkings) [6].

I.3.2.Capacité d'un aéroport

I.3.2.1.Définition

La capacité aéroportuaire est le nombre de demandes qui peut être traité pendant une période donnée par un ensemble d'installation(s) aéroportuaire (s) étant données une qualité de service retenue et la nature et le volume d'offres proposées par l'ensemble des acteurs impliqués [15].

I.3.2.2.La capacité théorique de l'aéroport

Elle est le nombre de mouvements que le dispositif aéroportuaire pourrait idéalement écouler durant un temps spécifique sans tenir compte de la qualité de service cette capacité correspond donc à un seuil ultime ou de saturation qu'il est en pratique impossible d'atteindre : elle ne peut se calculer que par extrapolation de mesures sur le trafic réel ou par l'intermédiaire de modèles de calcul représentatifs du fonctionnement de l'aéroport.

I.3.2.3.La capacité opérationnelle(ou pratique)

Correspond au débit maximal que l'aéroport peut réellement écouler, sans que la qualité de service en soit dégradée au delà d'un seuil fixe .Ce seuil correspond en pratique à un niveau de sécurité requis (respect des règles de la circulation aérienne) et à un retard moyen ne devant pas être dépassé (3 à 4 minutes par avion par exemple). En général, cette capacité peut se déduire directement de l'analyse du trafic réel et de ses retards.

I.3.2.4.La capacité déclarée

Elle est fixée par les autorités aéroportuaires. Elle représente le débit d'aéronefs ou de passagers que l'aéroport est en mesure d'accepter toute l'année, en prenant en compte l'ensemble des éléments de la chaîne aéroportuaire ainsi que les contraintes extérieures (environnement...), et compte tenu d'un certain niveau de qualité de service [15].

I.3.2.5.La capacité de programmation

La capacité de programmation est le nombre maximal de vols programmés par les compagnies aériennes sur une période de temps donnée, choisi en concertation avec le gestionnaire, les compagnies aériennes et un comité indépendant de coordination. Au cours de cette concertation, la période de temps est choisie [15].

Elle est affichée officiellement, elle est utilisée pour limiter le trafic aéroportuaire en amont, lors de l'attribution des créneaux aux compagnies. La différence entre la capacité de programmation et la capacité opérationnelle correspond à une marge de fonctionnement. Elle est relative aux incertitudes existant sur la demande : cette marge est d'autant plus importante que la demande finale de trafic d'épaise la demande formulée lors la programmation [6].

I.3.2.6. La capacité des pistes

Peut être représentée par le nombre maximum d'opérations (atterrissages et décollages) pouvant être effectués dans un intervalle de temps de manière fluide avec un niveau constant de demande. Etant donné le nombre limité de pistes pour un aéroport, ce sous système est souvent considéré comme le plus limitatif du point de vue de la capacité pratique. Les facteurs qui influent sur la capacité du sous système des pistes sont principalement : le niveau et la composition de la demande du trafic, la configuration de l'aéroport, les conditions météorologiques, la disponibilité des services du contrôle sol [17].

I.3.3. Les facteurs influençant sur la capacité d'un aéroport

Facteurs influençant la capacité aéroportuaire (qu'elle soit la capacité : théorique, opérationnelle ou de programmation) est le résultat global du fonctionnement de chaque sous-système impliqué dans la gestion du trafic :

- **Les infrastructures de l'aéroport** : sont un premier facteur influençant la capacité. Le dispositif de piste (taille, nombre, disposition et équipement des pistes) est généralement considéré comme le point le plus sensible, mais l'impact des autres installations ne doit pas être négligé : la diversité et la disposition des parkings ou des voies de circulation (taille, accessibilité, équipements) influencent fortement les temps de roulage et peuvent être limitatifs pour certains types d'avion.
- **La nature et la répartition du trafic** : sont également des facteurs de Première importance:
 - La classification de l'aéroport détermine la nature des vols autorisés, en fonction de leur vitesse d'approche et de leurs objectifs (commercial, court ou long courrier), ce qui fixe indirectement l'ordre de grandeur de la capacité de l'aéroport.

- La configuration de l'aéroport détermine le taux de fréquentation de chaque catégorie d'avion et le ration entre les flux d'arrivée et de départ sur chaque piste. Les normes de séparation entre chaque mouvement dépendent de leurs types et la capacité de la piste est donc différente dans chaque configuration.
- Enfin, les procédures d'exploitation des parkings et des voies de circulation (qui doivent être conformes aux règles de circulation), peuvent s'avérer plus ou moins efficaces en terme de retards générés. Sur ce point, la compétence technique des contrôleurs et des équipages (connaissance de la plateforme et de l'avion, séquençage des actions et aptitudes à collaborer) peuvent jouer un rôle considérable.
- **D'autres facteurs extérieurs** au système aéroportuaire sont fortement limitatifs:
 - Les problèmes environnementaux (écologie et gestion des nuisances sonores) ;
 - Les politiques douanières et policières (anti-terrorisme notamment).
 - Les phénomènes météorologiques dangereux (brouillard, grêle, orages, neige) ;

I.3.4. Les difficultés aéroportuaires identifiées

I.3.4.1. L'environnement

Les problèmes environnementaux ont pris une ampleur conséquente pour tous les aéroports, quelle que soit leur taille : le développement des agglomérations et la prise en compte des nuisances sonores ou de la pollution induisent souvent des décisions limitatives pour la croissance du trafic aéroportuaire. Différents domaines d'étude sont considérés sur ce vaste sujet :

- La qualité de la concertation avec les riverains et l'analyse objective des nuisances ;
- La mise au point de procédures adaptées aux agglomérations limitrophes ;
- La définition de limitations (horaires ou qualitatives) pour la circulation aérienne ;

I.3.4.2.La sécurité

L'amélioration de la sécurité est un souci permanent pour le service de contrôle et les usagers de l'aéroport. Sur ce point, l'aptitude à détecter les problèmes pouvant mettre en jeu la sécurité est primordiale : la concertation avec les pilotes et les contrôleurs d'aéroport, ainsi que l'analyse des incidents et des situations dangereuses observées s'avèrent indispensables. Les principaux sujets d'étude sont :

- L'amélioration de la couverture visuelle et radar à disposition des contrôleurs, pour augmenter la qualité de la surveillance du trafic ;
- La réduction des risques d'incursion piste (pénétration accidentelle de tout mobile non autorisé sur la piste).
- L'aide au guidage des avions sur la plateforme, pour diminuer les risques d'erreur de cheminement et donc de collisions, surtout par conditions de visibilité dégradées [6].

I.3.5.Les principaux concepts pour optimisation du trafic au sol

I.3.5.1.Optimisation de la séquence de la piste

Sur les plus grandes plateformes aéroportuaires et dans les conditions « normales » d'exploitation, les pistes restent les éléments les moins capacitifs car les séparations imposées entre mouvements sont restrictives derrière les avions à forte turbulence de sillage et dépendent des conditions météorologiques. Sur ce point, différentes améliorations peuvent être envisagées.

I.3.5.2.Optimisation de procédures d'approche

La définition de procédures d'approche adaptées facilite le travail de séquençage initial des arrivées pour le contrôle d'approche, en rendant possible des changements de vitesses et de trajectoires des avions. La mise à disposition de différents hippodromes d'attente permet notamment de réguler le flux d'arrivée lorsqu'il dépasse la capacité de la piste. Dans certains cas, les procédures d'approche peuvent également être utilisées pour modifier légèrement l'ordonnancement des arrivées, en fonction des contraintes de turbulence de sillage. Plus généralement, l'amélioration des procédures d'approche peut être vue comme un problème d'optimisation complexe, contraint par les performances des avions (qui déterminent le type de trajectoire qu'ils sont susceptibles de suivre) et dont le critère est la capacité de ces secteurs. Ce domaine d'étude nécessite une modélisation difficile des procédures aériennes utilisées pendant la phase d'approche. Il a toutefois l'avantage de pouvoir être traité hors de tout contexte temps réel et semble particulièrement porteur en Europe, où de nombreux aéroports voisins se partagent les mêmes secteurs d'approche [6].

I.3.5.3. Développement des outils d'aider au contrôle

Le développement d'outils prédictifs (DST : Decision Support Tool) capables d'anticiper suffisamment le trafic aéroportuaire (atterrissages et départs) peut participer à la définition de meilleures séquences de piste. Là encore, la recherche d'un séquençement optimal des vols peut se formuler assez simplement comme un problème d'optimisation, contraint par les possibilités d'ordonnement des avions (en fonction des prévisions de trafic) et dont l'objectif est la minimisation des retards. Cependant, le problème doit ici être traité en temps réel, ce qui implique des contraintes supplémentaires, plus difficiles à exprimer.

I.3.5.4. Diminution des normes de séparation

Certaines conditions météorologiques particulières entraînent des baisses de capacités aéroportuaires considérables, notamment parce que le guidage de l'avion pendant toute l'approche finale (jusqu'à l'atterrissage) nécessite dans ce cas une augmentation importante de certaines normes de séparation. Deux aspects du problème peuvent être étudiés :

- La précision des équipements (embarqués ou au sol) permettant aux avions d'effectuer un atterrissage de précision (aux instruments et par mauvaise visibilité), qui relève de l'innovation technologique, peut évoluer favorablement et permettre, à terme, des réductions des normes de séparation en approche.
- L'étude aérodynamique de la turbulence de sillage des avions semble également porteuse. L'effet du vent fort sur la propagation de la turbulence peut par exemple aboutir à des normes de séparation en temps beaucoup moins contraignantes que les séparations en distance normalement pratiquées [6]. L'utilisation en temps réel d'instruments de mesure de l'importance du tourbillon (ou vortex) provoqué par un avion peut également apporter des gains de capacité non négligeables.

I.3.5.5. Quelques outils opérationnels du contrôle d'aéroport

Les équipements des postes de contrôle d'aéroport varient naturellement d'un aéroport à l'autre et d'un poste à l'autre sur un même aéroport. Dans tous les cas, la communication avec les pilotes se fait par liaison radio et la coordination avec les positions de contrôle voisines (en route ou d'approche) par liaison téléphonique. Un système de strips (support papier de format prédéfini) permet la réception et le suivi des plans de vol (intentions des compagnies).

✓ **Maestro** : est un outil d'aide à la décision multipiste et multi-aéroport permettant de gérer les phases d'approche sur les aéroports. Le système permet d'optimiser l'utilisation de l'espace aérien et des capacités piste en partageant la charge de travail liée à la gestion des flux d'arrivée et de départ permettant ainsi de minimiser les délais et de diminuer la consommation de kérosène. Pour parvenir à ce but, le système fournit aux contrôleurs En-Route, d'Approche et au Sol une vue des séquences de trafic calculées ainsi que les actions nécessaires à la réalisation de ces séquences. Tout au long de ce processus, les contrôleurs restent en charge de la séquence car Maestro leur permet d'effectuer tout changement nécessaire afin de tester diverses options de séquençement [2].

✓ **Gestion des arrivées AMAN :**

- Maintient une base de données des vols à l'arrivée à partir des plans de vol reçus du système de traitement plan de vol et des pistes radars reçues du système de traitement radar.
- Alloue à chaque vol à l'arrivée une piste de destination en fonction de règles d'allocation de pistes, de restrictions de pistes permettant la prise en compte des procédures anti-bruit, de la configuration de la TMA et des séparations piste sélectionnées ainsi que de niveaux de priorité qui peuvent être associés à un vol.
- Calcule l'heure d'arrivée séquencée au point de transfert En-Route/Approche et à la piste ainsi que les délais qui doivent être absorbés afin de respecter ces heures séquencées.
- Optimise globalement la séquence afin de minimiser les délais et l'utilisation des attentes établies.
- Affiche la séquence sur l'ensemble des positions de contrôle concernées et fournit aux contrôleurs En-Route et d'Approche des indications sur les actions à entreprendre afin d'absorber les délais.
- Permet de générer des messages de coordination automatique entre les positions concernées lorsque la séquence est modifiée par un des contrôleurs [2].

✓ **Gestion des départs DMAN [2]:**

- Maintient une base de données des vols au départ à partir des plans de vols reçus du système de traitement plans de vol, des données radar sol reçues du système de surveillance sol (A-SMGCS), des créneaux CFMU reçus du système ATFM et des allocations parking reçues du système aéroportuaire .

- Alloue une piste de décollage et un point d'attente à chaque vol en fonction de règles d'allocation piste définies hors-ligne et d'information partagées avec la fonction Gestion des Arrivées (configuration des pistes et séparation sur chacune des pistes, créneaux de fermeture de piste, séquence à l'arrivée).
 - Calcule les heures de décollage en fonction de l'heure de départ bloc estimée, des créneaux CFMU et des temps de roulage Point de stationnement / Piste configurés hors-ligne ou fournis en temps réel par le système A-SMGCS.
 - Etablit et optimise la séquence de départs pour chaque piste en fonction des priorités allouées à chaque vol, des contraintes à la piste et de la séquence d'arrivées.
 - Affiche sur les positions de contrôle Sol, Tour, Approche et En-Route concernées la séquence calculée fournissant ainsi à l'ensemble des acteurs une vue commune du trafic au départ.
- ✓ **SALSA** (Systèmes d'Assistance à la circulation Locale et au Sol sur les Aéroports), développé par le CENA (Centre d'étude de la Navigation Aérienne), est une plateforme de simulation intégrant un ensemble d'outils expérimentaux pour la gestion du trafic au sol. Une description détaillée des voies de circulation de l'aéroport est utilisée pour y faire évoluer les avions et générer des situations de trafic précises.
- ✓ **SAMBA** (Systèmes d'Analyse des Mouvements et des Besoins des Aéroports) développé par le CENA, propose une modélisation de l'aéroport permettant l'évaluation du service rendu par le système et la mesure de différents indicateurs sur l'aéroport et ses secteurs d'approche (charge, capacité, efficacité). Le projet est basé sur l'analyse d'échantillons de trafic issus des enregistrements produits par le système opérationnel.

I.3.5.6.Eléments sur les systèmes avancés de gestion et contrôle du trafic au sol (A-SMGCS) [18]

I.3.5.6.1.Leurs objectifs

Les objectifs de ces systèmes sont bien sûr d'offrir les meilleures possibilités de capacité avec un très haut niveau de sécurité dans toutes les conditions mais aussi précisément :

-d'offrir à tous les acteurs (pilotes, contrôleurs, conducteurs de véhicule) un même niveau de service

- De préciser très clairement les responsabilités de chacun
- D'élaborer des moyens améliorés à l'intention de ces acteurs pour qu'ils puissent avoir une meilleure prise en compte de la situation
- D'améliorer les indications au sol et les procédures
- De réduire la charge de travail du contrôleur et du pilote par l'automatisation de certaines fonctions et l'amélioration de l'ergonomie
- D'offrir des solutions modulaires adaptées à chaque type d'aérodrome
- D'assurer la détection, l'analyse et la résolution des conflits
- De garantir un environnement plus sûr et efficace par l'automatisation en pouvant y inclure des éléments de contrôle, de guidage et d'assignation de routes.

I.3.5.6.2. Les principales fonctions de l'A-SMGCS

Comme on l'a déjà dit, les quatre fonctions de base de l'A-SMGCS sont la surveillance, le routage, le guidage et le contrôle.

La fonction de surveillance est celle qui remplace la vision du contrôleur dans sa tour par beau temps et qui doit donner au système la connaissance de la position et de l'identification de tous les mobiles dans toutes les conditions météorologiques et toutes les configurations d'aérodrome. Cette connaissance de la situation par le système pourra être mise à la disposition des acteurs concernés (contrôleurs, pilotes, conducteurs de véhicules) mais sera aussi utilisée par les autres fonctions du A-SMGCS comme le guidage et le contrôle.

Selon l'OACI, la fonction de surveillance doit être capable de connaître la situation en temps réel avec la position et l'identification de tous les mobiles, ainsi que d'autres informations utiles pour la compréhension de la situation au sol (la vitesse ou la destination, par exemple).

Le système doit être capable de renseigner les utilisateurs de cette situation, d'alimenter les autres fonctions de l'A-SMGCS et de détecter les intrusions de pistes.

On remarque ensuite, que pour atteindre un niveau de performance suffisant, il sera nécessaire d'utiliser plusieurs capteurs. En effet, le radar de surface le plus perfectionné ne peut fournir à lui tout seul toutes l'information nécessaire avec suffisamment de précision. Il y aura certainement plusieurs radars de surface complétés par d'autres capteurs pour enrichir la connaissance et/ou l'intégrité de la fonction. On conçoit dès lors, que le système devra disposer d'un module de fusion de données fournissant des informations aux autres fonctions de l'A-SMGCS.

La fonction de routage est celle qui va assigner une route à chaque mobile. En mode manuel cette route est proposée au contrôleur qui la transmet au mobile concerné. En mode automatique cette route est transmise directement au mobile, le contrôleur étant seulement informé mais ayant la possibilité d'intervenir. Pour bien fonctionner, la fonction de routage doit prendre en compte l'ensemble des données et des contraintes du problème et doit être capable de réagir en temps réel à tout changement pouvant survenir. La fonction de routage ne doit pas être une contrainte supplémentaire mais un moyen d'assistance permettant de réduire les temps de roulage et d'améliorer la fluidité du trafic au sol.

La fonction de routage doit prendre en compte le choix du pilote en ce qui concerne la sortie de piste, elle doit prévenir et limiter les conflits aux intersections, réagir aux modifications opérationnelles, et fournir un moyen de valider les routes proposées.

La fonction de guidage est celle qui va donner aux pilotes et conducteurs de véhicules des indications claires et précises leur permettant de suivre leur route. Lorsque les conditions de visibilité permettent un acheminement sûr, ordonné et rapide des mouvements autorisés, la fonction guidage sera essentiellement fondée sur les aides visuelles normalisées. Si les délais d'acheminement sont augmentés en raison d'une mauvaise visibilité, d'autres équipements au sol ou embarqués seront nécessaires pour compléter les aides visuelles afin de maintenir la cadence d'écoulement du trafic et d'appuyer la fonction guidage.

La fonction de contrôle est celle qui vient assister le contrôleur ou s'y substituer dans son rôle d'organisateur et de garant de la sécurité. Elle doit être capable d'organiser l'ensemble du trafic, de maintenir les séparations nécessaires entre les mobiles et entre ceux-ci et les obstacles, de détecter toute forme de conflits et de les résoudre. Elle peut déclencher des alertes à moyen terme pouvant être résolues par une modification de planification ou à court terme en demandant une réaction immédiate des acteurs concernés. Ces alertes peuvent être d'abord soumises au contrôleur dans le cas du mode semi-automatique, ce qui rajoute un délai de réaction, ou bien transmises directement au mobile concerné dans le cas du mode automatique.

I.3.5.6.3. La classification des besoins d'automatisation de la gestion de trafic au sol [18]

L'OACI qui a considéré que les A-SMGCS doivent être modulaires et doivent pouvoir s'adapter à tous les aéroports, a proposé une classification des besoins en fonction des aéroports et des conditions d'exploitation. Les trois critères retenus sont :

- La visibilité :

On distingue les conditions de visibilités suivantes :

Visibilité 1 : suffisante pour la vision du pilote et du contrôleur

Visibilité 2 : suffisante pour le pilote, mais insuffisante pour le contrôleur

Visibilité 3 : suffisante pour le pilote, mais insuffisante pour éviter les collisions à vue (visibilité horizontale inférieure à 400m et supérieure à 75m)

Visibilité 4 : insuffisante pour le guidage visuel (visibilité horizontale inférieure à 75m)

-La densité de trafic :

La densité de trafic correspond à la moyenne des heures de pointe journalière, elle est considérée :

- faible s'il y a moins de 16 décollages ou atterrissages par piste ou moins de 20 mouvements sur l'aérodrome moyenne s'il y a de 16 à 25 décollages ou atterrissages par piste ou un total de 20 à 35 mouvements sur l'aérodrome
- forte s'il y a plus de 26 décollages ou atterrissages par piste ou supérieure à un total de 35 mouvements sur l'aérodrome

- L'organisation aéroportuaire :

Celle-ci considère la disposition générale de l'aérodrome et sa complexité qui peut être :

- de base pour un aérodrome ayant une seule piste et une voie de circulation
- simple pour un aérodrome ayant une seule piste et plusieurs voies de circulation
- complexe pour un aérodrome ayant plusieurs pistes

I.3.5.7. La situation actuelle

Sous la pression de leurs besoins opérationnels, les aéroports ont fait appel à des systèmes de plus en plus évolués. Au stade d'équipement actuel, il s'agit encore de fournir au contrôleur une image représentative de la situation au sol. Ce premier niveau est plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord, et doit être réalisé de façon à s'intégrer au développement des systèmes de type A-SMGCS.

Certaines questions restent critiques :

- La numérisation de la poursuite par radar de surface ;
- La fusion des données de localisation avec l'apparition de nouveaux moyens de localisation (ADS-B, Mode S) ;
- La présentation des données aux contrôleurs et les problèmes d'interfaçage ;
- Le traitement des données et la génération de signaux d'alarme ;
- La communication numérique (data-Link) entre avions, mobiles et tour de contrôle.

Le concept d'A-SMGCS devra être progressivement implanté dans la plupart des grands aéroports et conduire à l'automatisation de la gestion du trafic au sol avec plusieurs degrés d'assistance des contrôleurs, pilotes et conducteurs de véhicules.

I.3.5.8.Résolution des situations [6]

La résolution de chaque situation de trafic consiste à trouver les manœuvres qui doivent être imposées aux avions (ordres de contrôle) pour optimiser globalement leurs trajectoires en respectant les règles de circulation. Différentes approches peuvent être envisagées pour formuler rigoureusement le problème d'optimisation à résoudre :

-L'approche par capacité semble par exemple attrayante : les éléments structurels de l'aéroport (pistes, portions de voies de circulation, parkings) sont représentés par un graphe orienté. Chaque élément (ou nœud) du graphe se voit attribuer une capacité et un modèle de file d'attente permet de calculer les retards induits par un flux d'avions dans ce graphe. Le problème consiste alors à trouver un flux optimal, qui minimise les retards induits. Ce problème combinatoire (par rapport à la taille du graphe et au nombre d'avions) peut être résolu par programmation linéaire. Cette approche trouve donc une répartition optimale du trafic, mais admet ses limites : la notion de capacité ne peut pas traduire précisément les problèmes de circulation lorsque les voies sont dépendantes sans être connectées (aux alentours des intersections notamment).

-L'approche par simulation détaillée permet de mieux représenter le trafic au sol : les trajectoires envisageables des avions sont calculées précisément, et le problème consiste à trouver un ensemble de trajectoires qui respecte les normes de séparation à chaque instant et qui minimise une fonction de coût donnée.

I.4.Conclusion

La gestion du trafic aérien aux alentours d'un aéroport apparaît donc comme un problème extrêmement complexe où la difficile équation sécurité x efficacité doit être résolue aussi bien sur le long, le moyen et le court terme. Cette problématique met en jeu des multiples acteurs venant contraindre de façon complexe l'espace décisionnel des gestionnaires du trafic sol, ce qui semble se traduire par des structures complexes de gestion et de contrôle. C'est pourquoi la gestion des aéroports et de l'espace aérien est un problème d'actualité que les services chargés du contrôle et de la régulation de la circulation aérienne ont dû mal de trouver des solutions pour faire face à cette augmentation.

II.1.Introduction

Dans ce chapitre nous sommes consacrés à une représentation de grandes structures d'algorithmes génétiques ainsi que leurs mécanismes généraux de contrôle et les principaux types d'opérateurs génétiques utilisés. Et traite les études théoriques de l'algorithme génétique. Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation stochastiques, appartenant à la famille des algorithmes évolutionnaires, fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part d'une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance relative (fitness) qui permet de quantifier sa qualité sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solution potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : a sélection, le croisement, la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à l'obtention satisfaisante.

Les lois qui régissent l'évolution des espèces des organismes sont connues depuis les travaux du naturaliste britannique Charles Darwin au siècle dernier. Nous savons ainsi que la nature fait appel à plusieurs mécanismes qui ont conduit, au fil du temps, à l'apparition des espèces nouvelles, toujours mieux adaptées à leurs milieux respectifs. Darwin constata que l'évolution des espèces est basée sur deux composantes : la sélection et la reproduction. La sélection garantit une production plus fréquente, ders chromosomes des êtres vivants les plus robustes, tandis que la reproduction est chasse durant laquelle l'évolution se réalisera et les descendants obtenus ne seront pas reproduits à l'identique.

Si l'ensemble de la théorie de l'évolution des organismes employé est dû à Darwin, c'est à John Henry Holland et son équipe que nous devons les algorithmes génétiques. Dans les années soixante, Holland rechercha une manière permettant aux ordinateurs d'imiter le fonctionnement des êtres vivants pour résoudre un problème donnée. Il arrive enfin à initialiser et développer l'algorithme génétique canonique (AGC) pour résoudre un des problèmes d'optimisation [19].

II.2.Nomenclature de l'algorithme génétique [19]

Comme les algorithmes génétiques ont leurs racines à la fois dans la biologie et l'informatique, la terminologie utilisée est empreinte aux deux domaines voir le tableau [1.2].

Nous allons passer en revue le lien les termes utilisés et leurs équivalents naturels pour ainsi nous aligner sur la littérature des algorithmes génétiques, en plein développement, et aussi pour nous permettre dans la suite de définir quelques analogies terminologies.

Terme	Algorithme génétique	Signification biologique
Gène	Trait, caractéristique	Une unité d'information génétique transmise par un individu à sa descendance
Locus	Position dans la chaîne	L'emplacement d'un gène dans son chromosome
Allèle	Valeur de caractéristique	Une différente forme que peut prendre un gène les allèles occupent le même locus
Chromosome	Chaîne	Une striure contenant les gènes
Génotype	Structure	L'ensemble des allèles d'un individu portés par l'ADN d'une cellule vivante
Phénotype	Ensemble de paramètres ou une structure décodé	Aspect physique et physiologique observable de l'individu obtenu à partir de son génotype
Epistasie	Non-linéarité	Terme utilisé pour définir les relations entre deux gènes "distincts" lorsque la présence d'un gène empêche la présence d'un autre gène non –allèle

Tab .II.1 : résumé de la terminologie utilisée en AG [19]

II.3. Les avantages de l'algorithme génétique

Par rapport aux algorithmes classiques d'optimisation, l'algorithme génétique présente plusieurs points forts comme :

- le fait d'utiliser seulement l'évaluation de la fonction objectif sans soucier de sa nature. En effet nous n'avons besoin d'aucune propriété particulière sur la fonction à optimiser (continuité, dérivabilité, convexité, etc.), ce qui lui donne plus de souplesse et un large domaine d'applications ;
- Génération d'une forme de parallélisme en travaillant sur plusieurs points en même temps (population de taille N) au lieu d'un seul itéré dans les algorithmes classiques ;
- L'utilisation des règles de transmutations probabilistes (probabilité des croisements et de mutation des règles de contentements aux algorithmes déterministes où la transitions deux itérations successives est imposée par la structure et la nature de l'algorithme. Cette utilisation permet dans certaines situations aux algorithmes génétiques d'éviter des optimums locaux et de se diriger vers un optimum global. [19]

II.4.Principes de base des algorithmes génétiques

II.4.1.But : Le but des Algorithmes génétiques (AG) est de déterminer les extrêmes d'une fonction :

$$f : X \mapsto \mathbb{R}$$

Où X est un ensemble appelé espace de recherche

Et f est appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation ou encore fonction fitness. La fonction agit comme une «boite noire »pour l'Algorithme. Il en est Aussi des problèmes très complexes qui peuvent être approchés par programmation génétique.

Bien entendu, les caractéristiques d'un algorithme génétique peuvent être différentes de celles qui sont présentées ici. Nous présentons les caractéristiques communes aux algorithmes génétiques les plus fréquemment utilisés.

Le principe de base des algorithmes génétiques s'inspire, très schématiquement, de l'évolution naturelle. Le vocabulaire employé révéler clairement cette source d'inspiration :

On parle de population, de générations, de sélection, de reproduction, de croisement, de mutation, de chromosomes.

Indépendamment de la problématique traitée, les algorithmes génétiques sont basés sur six principes :

1. Choisir le codage des solutions ; Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très utilisés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation de problèmes à variables réelles.
2. Générer une population initiale de taille fixe N , formée d'un ensemble fini de solutions dite *génération initiale* ; Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population

initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

3. Définir une fonction d'évaluation (fitness) permettant une solution et la comparer aux autres ;
4. Choisir les solutions par un mécanisme de sélection qui choisit éventuel couplage ;
5. Générer des nouvelles solutions à l'aide des opérateurs génétiques en utilisant:

- Opérateur de croisement : il évite d'établir des populations uniformes incapables afin de produire des individus meilleurs ou différents. Cet opérateur est fixé selon une probabilité P_c .

- Opérateur de mutation : il évite d'établir des populations uniformes incapables d'évoluer. Il consiste à modifier les valeurs des gènes des chromosomes selon une probabilité de mutation P_m .

6. Etablir un compromis entre les solutions produites (progénitures) et les solutions productrices (les parents) en utilisant un mécanisme d'insertion. En autres termes, et suite des informations précises, décider ce qui doit rester et ce qui doit disparaître. Tout ceci, en sauvegardant à chaque génération une taille de la population N fixe. la taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilité s d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

On commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération k à la génération $k + 1$, les trois opérations suivantes sont répétées pour tous les éléments de la population k . Des couples de parents P_1 et P_2 sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c et génère des couples d'enfants C_1 et C_2 . D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur à P_c) et génère des individus mutés P_0 . Le niveau d'adaptation des enfants (C_1, C_2) et des individus mutés P_0 sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. [13].

II.5. Gestion des contraintes

Un élément de population qui viole une contrainte se verra attribuer une mauvaise fitness et aura une probabilité forte d'être éliminé par le processus de sélection.

Il peut cependant être intéressant de conserver, tout en les pénalisant, les éléments non admissibles car ils peuvent permettre de générer des éléments admissibles de bonne qualité. Pour de nombreux problèmes, l'optimum est atteint lorsque l'une au moins des contraintes de séparation est saturée, c'est à dire sur la frontière de l'espace admissible.

Gérer les contraintes en pénalisant la fonction fitness est difficile, un "dosage" s'impose pour ne pas favoriser la recherche de solutions admissibles au détriment de la recherche de l'optimum ou inversement. Disposant d'une population d'individus non homogène, la diversité de la population doit être entretenue au cours des générations afin de parcourir le plus largement possible l'espace d'état. C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation [13].

II.6. Fonctionnement des algorithmes génétiques

L'algorithme génétique, présenté dans la figure (Fig. II.2), débute par une génération d'une population initiale de N individus, pour les quelles nous calculons les valeurs de leur fonction objectif et nous sélectionnons les individus par une méthode de sélection. Les individus, sujets de croisement par l'opérateur de croisement, sont choisie selon une probabilité initiale P_x , leurs résultats être mutés par un opérateur de mutation avec une probabilité P_m les individus issus de ces opérateurs génétiques seront insérés par une méthode d'insertion dans la nouvelle population dont nous évoluons la valeur de La fonction objective de chacun des individus. Un test d'arrêt sera effectué pour vérifier la qualité des individus obtenus. Si ce test est vérifié alors l'algorithme s'arrête avec une solution optimale sinon on réitère le processus pour la nouvelle génération [19].

II.6.1.Codage du chromosome

Le choix du codage des données dépend de la spécificité du problème traité. Il conditionne fortement l'efficacité de l'algorithme génétique. Un chromosome (une solution particulière) a différentes manières d'être codé selon l'alphabet utilisé. Nous distinguons trois types de codages :

- Numérique si l'alphabet est constitué de chiffres ;
- Symbolique si l'alphabet est en ensemble de lettres alphabétiques ou des symboles ;
- Alphanumérique si nous utilisons un alphabet combinant les lettres et les chiffres.

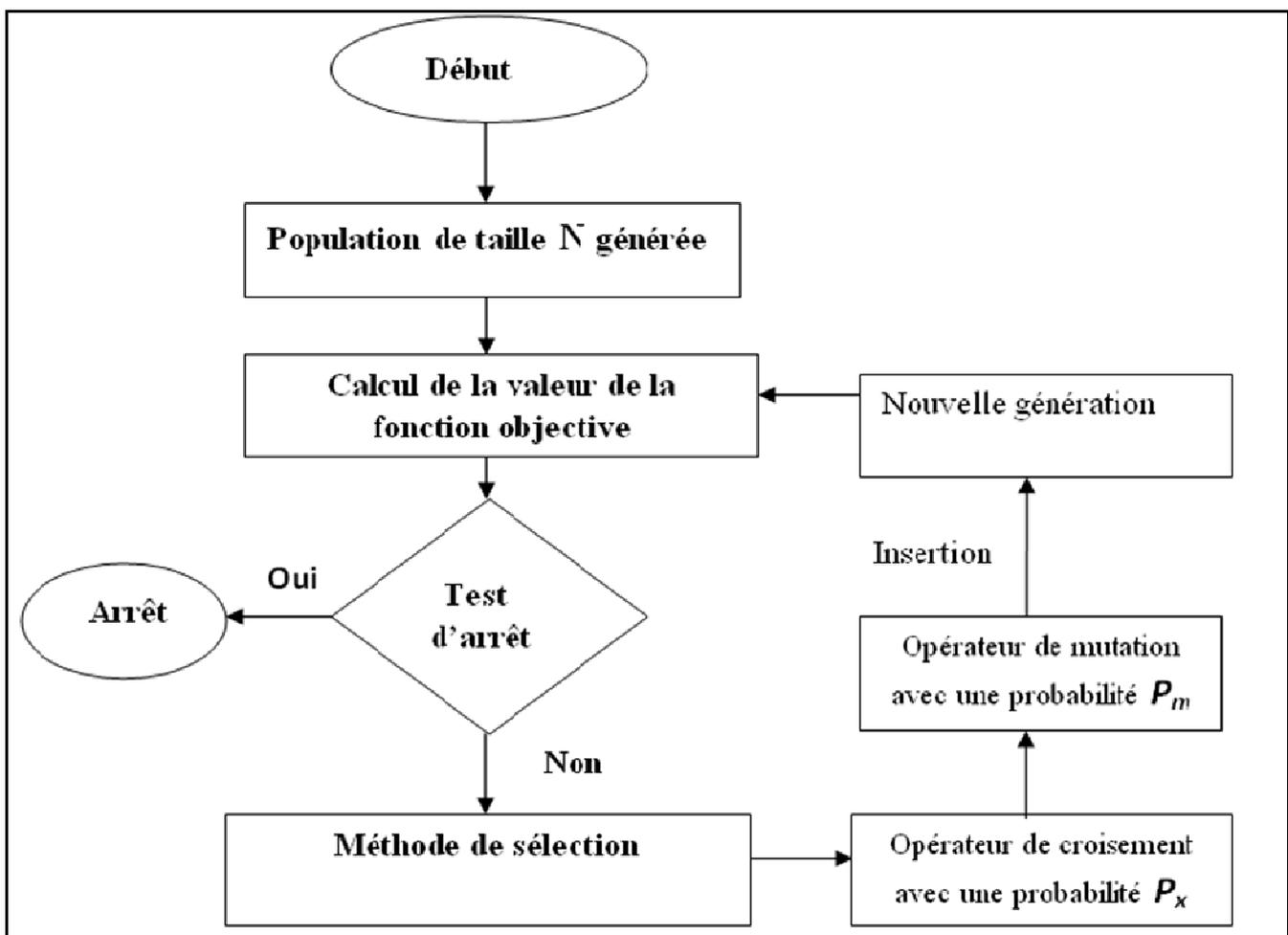


Fig. II.2 : L'organigramme de l'algorithme génétique. [19]

II.6.2. Génération de la population initial

Dans les problèmes d'optimisation, une connaissance de "candidats de bonne qualité" comme d'initialisation conditionne la rapidité de la convergence vers l'optimum dans l'ensemble des solutions réalisables et totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus. Les tirages sont réalisés en respectant les contraintes et d'une manière informelle dans chacun des domaines associés aux composantes de l'ensemble des solutions. Des connaissances à priori sur le problème traité permettent de générer les individus dans un domaine particulier afin d'accélérer la convergence de l'algorithme génétique. Les opérateurs de croisement et de la mutation permettent d'entretenir la diversité d'une population non homogène au cours des générations afin de parcourir l'ensemble de solution la plus largement possible.

II.6.3. Méthodes de sélection

La sélection permet d'identifier les individus susceptibles d'être croisés dans une population ; nous trouvons dans la littérature plusieurs principes de sélection :

Sélection par rang : il consiste à attribuer à chacun individu son classement par ordre d'adaptation pour un problème de maximisation, nous classons selon l'ordre croissant des valeurs de la fonction objectif. Ainsi, le plus mauvais individu c'est-à-dire celui qui possède la plus petite valeur de la fonction objectif) prendra le numéro 1 et ainsi de suite voir le tableau (Tab. II.2) pour un problème de minimisation, ordonnons les individus selon l'ordre décroissant. On prélève ensuite une nouvelle population à partir de cet ensemble d'individus ordonnés en utilisant des probabilités indexées sur les rangs des individus :

$$\text{Probabilité de sélection (parent}_i) = \frac{\text{Rang}(\text{parent}_i)}{\sum_{j \in \text{population}} \text{Rang}(\text{parent}_j)}$$

Cette procédure est très simple et exagère le rôle du meilleur élément au détriment d'autres éléments potentiellement exportables. Le second par exemple, aura une probabilité d'être sélectionné plus faible que le premier, bien qu'il soit peut-être situé dans une région d'intérêt.

	Chromosome	Fitness	Rang	Probabilité de sélection = $\frac{Rang(\text{parent}_i)}{\sum_{j \in \text{population}} Rang(\text{parent}_j)}$
	Parent 1	30	2	33.33%
	Parent 2	60	3	50%
	Parent 3	10	1	16.67%
Total		100	6	100%

Tab. II.2 : sélection par rang pour un problème de maximisation. [19].

Sélection par la roulette: dans un problème d'optimisation de maximisation, on associe à chaque individu i une probabilité de sélection, noté $prob_i$, proportionnelle à sa valeur F_i de la fonction objectif :

$$Prob_i = \frac{F_i}{\sum_{j \in \text{population}} F_j}$$

Chaque individu est alors reproduit avec la probabilité $Prob_i$, certains individus (les "bons") seront alors plus reproduit et d'autres les ("mouvais") éliminés voir le tableau Tab. II.3

	Chromosome	Fitness	Probabilité de sélection = $\frac{Fitness}{Total(Fitness)}$
	Parent 1	30	30%
	Parent 2	60	60%
	Parent 3	10	10%
Total		100	100%

Tab. II.3: sélection par la roulette pour un problème de maximisation. [19]

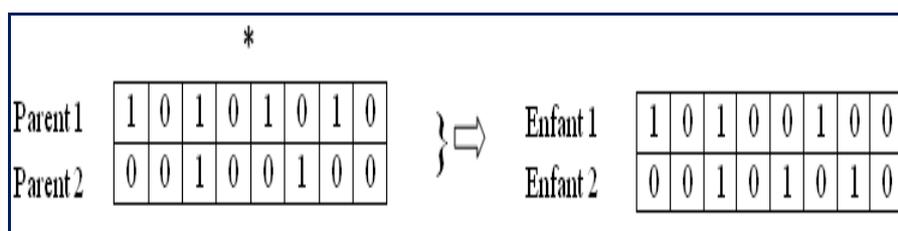
Pour un problème de minimisation, on utilise une probabilité de sélection pour un individu i égale à : $\frac{(1-Prob_i)}{(N-1)}$.

Sélection aléatoire : La sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation. Chaque un individu a donc une probabilité uniforme ($1/N$) d'être sélectionné. En général, la convergence de l'algorithme est lente en utilisation cette méthode.

Sélection par tournoi : cette méthode de sélection augmente les chances des individus de mauvaise qualité par rapport à leur fitness, de participer à l'amélioration de la population. En effet, c'est une compétition entre les individus d'une sous-population de taille M ($M \leq N$) prise au hasard de la population. Le paramètre M est fixé à priori par l'utilisateur. L'individu de meilleure qualité par rapport à la sous-population sera considéré comme vainqueur et sera sélectionné pour la population de l'opérateur de croisement. Le paramètre M joue un rôle important dans la méthode du tournoi. Dans le cas où $M = N$ avec N est la taille de la population. Le résultat par la sélection de la méthode du tournoi donne à chaque fois un seul individu qui est le meilleur individu par rapport à la valeur de la fonction objective. Ce qui réduit l'algorithme génétique à un algorithme de recherche local travaillant sur une seule solution à la fois. Ce type a pour inconvénient de converger parfois rapidement vers un optimum local. Dans le cas $M = 1$, la méthode de sélection du tournoi correspondant à la sélection aléatoire.

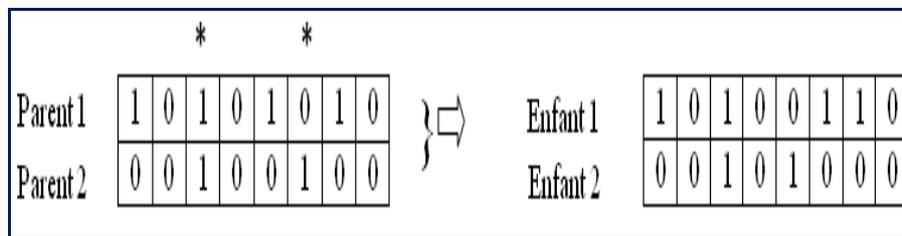
II.6.4. Opérateur de croisement

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant les composantes des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Il est appliqué avec une probabilité P_x , communément appelée probabilité de croisement. Après l'utilisation de la méthode de sélection pour le choix de deux individus, nous générons un nombre aléatoire $\alpha \in [0,1]$. Si ($\alpha \leq P_x$), nous appliquons l'opérateur de croisement sur le couple. Les plus anciens opérateurs de croisement utilisés sont l'opérateur de croisement à un point et à deux points sur deux chromosomes à codage binaire. Ils constituent la base des opérateurs de croisement. L'opérateur à un point consiste à diviser chacun des deux parents en deux parties à la même position, choisie au hasard. L'enfant est composé de la première partie du premier parent et de la deuxième partie du deuxième parent et de la deuxième partie du premier parent voir le tableau (Tab.2.4).



Tab.2.4 : l'opérateur de croisement à un point [19].

L'opérateur à deux points de croisement est illustré dans le tableau (Tab.2.5). Il consiste à fixer deux positions. L'enfant1 sera la copie du parent1 en remplaçant sa partie ente les deux positions par celle du parent2. On effectuera la même opération pour déterminer l'enfant2 en intervertissant les rôles des parent1 et parent2.

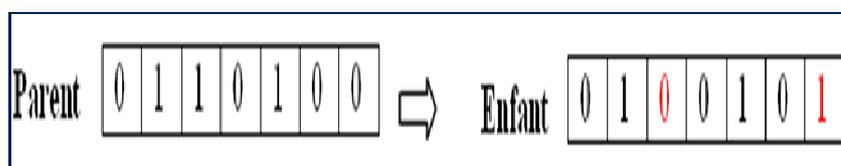


Tab. II.5 :l'opérateur de croisement à 2 points. [19]

II.6.5 .Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques l'aléa nécessaire à une exploration efficace de l'espace. Cet opérateur nous garantit que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre la plupart des points du domaine réalisable. CERF en 1994 démontré théoriquement que l'algorithme génétique converge en probabilité en utilisant l'opérateur de mutation et sans croisement. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur.

Cet opérateur de mutation est utilisé avec une probabilité(P_m) nommé probabilité de mutation. Dans les algorithmes génétiques à codage binaire, cette probabilité s'effectuait sur les gènes en échangeant sa valeur de 0 à 1ou de 1à 0 et non sur le chromosome tout entier.



Tab. II.6 : Opérateur de mutation d'un bit. [19]

Mais avec l'algorithme codé autrement, on applique cette probabilité par rapport à l'individu tout entier et non sur les gènes. Si β gène aléatoirement, appartient à $[0, P_m]$, nous appliquons l'opérateur de mutation sur cet individu [19].

II.6.6.Méthode d'insertion

Après l'étape de mutation on utilise une méthode d'insertion pour générer une nouvelle population. Lors de la construction de cette population on se trouve devant un vrai problème : faut-il garder les enfants ou les parents ou bien certain pourcentage des deux en respectant que la taille de la population (N) reste constante.

Il s'agit de concevoir une stratégie d'évolution de la population. Nous distinguons dans la littérature deux stratégies :

- La première stratégie notée (N, N_f) consiste à choisir N individus à partir de N_f enfants déjà créés par les opérateurs de croisement et de la mutation. Dans cette stratégie, on suppose que $(N_f \geq N)$. Quand $(N_f = N)$, nous parlerons de la méthode de générationnelle qui remplace les parents par les enfants.
- La seconde, notée $(N_f + N)$, consiste à choisir les N individus à partir de N parents de la population précédente et de N_f nouveaux enfants. Un particulier de cette stratégie, appelé méthode d'état d'équilibre, a pour principe de sauvegarder une grande partie de la population dans la génération suivante. A chaque itération quelques chromosomes (parents) ayant les meilleurs coûts seront sélectionnés afin de créer des chromosomes fils qui remplaceront les plus mauvais parents. le reste de la population survie et sera copié dans la nouvelle génération.

L'élitisme est une stratégie complémentaire de la première stratégie il consiste à copier quelques meilleurs chromosomes dans la nouvelle population. Il accroît l'efficacité de l'algorithme génétique basé sur la méthode d'insertion générationnelle. L'objectif est d'éviter que les meilleurs chromosomes soient perdus après les opérateurs de croisement et de mutation. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de conserver, à une itération K , le meilleur individu trouvé dans toutes les populations générées antérieurement [19].

II.6.7. Test d'arrêt

Le test d'arrêt joue un rôle primordial dans le jugement de la qualité des individus son but de nous assurer l'optimalité, de la solution finale obtenue par l'algorithme génétique. Les critères d'arrêts sont de deux natures :

1. Arrêt après un nombre fixé a priori de générations. C'est la solution retenue lors qu'une durée maximale de temps de calcul est imposée.
2. Arrêt lors que la population cesse d'évolue ou n'évolue plus suffisamment. Nous sommes alors en présence d'une population homogène dont on peut penser qu'elle se situe à la proximité de l'optimum. Ce test d'arrêt reste le plus objectif et le plus utilisé.

Il est à noter qu'aucune certitude concernant la bonne convergence de l'algorithme n'est assurée. Comme dans toute procédure d'optimisation l'arrêt est arbitraire, et la solution en temps fini ne constitue qu'une approximation de l'optimum [19].

II.7. Amélioration classique

II.7.1. Introduction

Les processus de sélection que nous venons d'étudier sont très sensibles aux écarts de fitness et dans certains cas, un très bon individu risque d'être reproduit trop souvent et peut même provoquer l'élimination complète de ses congénères. On obtient alors une population homogène contenant un seul type d'individu. Par exemple, dans l'exemple suivant, le mode local (on utilise le terme « mode » pour désigner un optimum d'une fonction) risque d'être le seul reproduit pour la génération suivante, et seule la mutation pourra ensuite nous aider à atteindre l'objectif global, mais au prix de nombreuses générations supplémentaires.

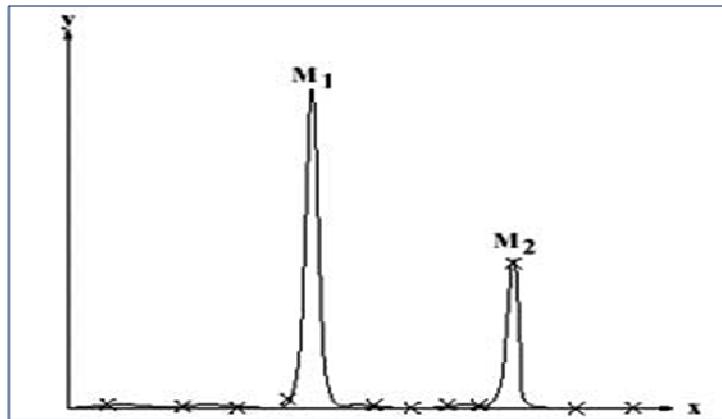


Fig. II.3 : Les sélections classiques risquent ici de ne reproduire qu'un seul individu [13]

Pour éviter ce comportement très néfaste et pénalisant, il a été développé d'autres méthodes de sélection (notamment le *ranking*) et des principes (*scaling*, *sharing*) qui empêchent les génotypes « forts » d'éliminer totalement les « faibles ». Nous nous contenterons ici de décrire les mécanismes que nous avons utilisés dans nos recherches, à savoir le *scaling* et le *sharing*.

II.7.2. Le scaling

Les bons individus, se reproduisant mieux que les moins adaptés, risquent de dominer la population et d'empêcher une évolution équilibrée. Ceci se traduit par une convergence prématurée qui risque de mener la recherche dans un piège local : c'est le cas dans une fonction à fort gradient (à fortes variations). Inversement, si la fonction est à faible gradient, les individus les moins adaptés ne seront pas pénalisés et continuent à se reproduire de la même manière que les bons individus, ce qui empêche la population de converger.

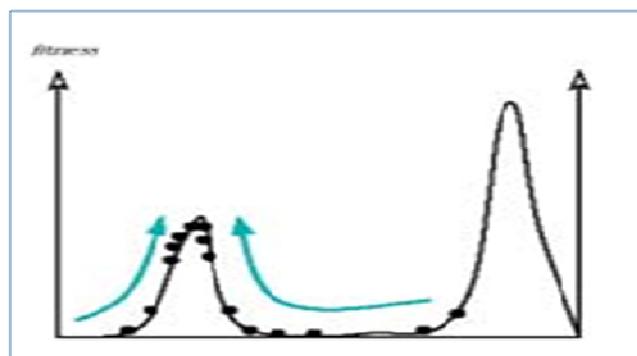


Fig. II.4 : Risque de convergence prématurée vers l'optimum local [13]

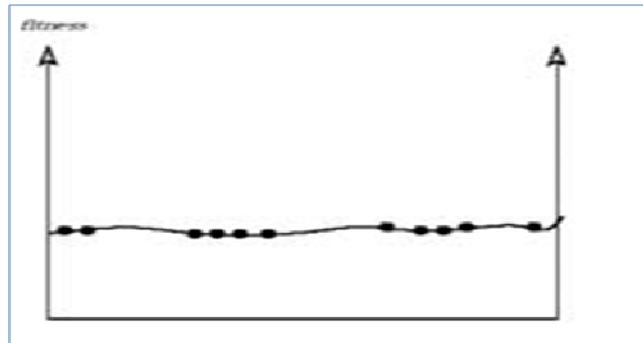


Fig. II.5 : Risque de reproduction forte des mauvais individus [13]

Le *scaling*, ou mise à l'échelle, modifie les fitness afin de réduire ou d'amplifier artificiellement les écarts entre les individus. On se ramène en fait concrètement à une fitness à gradient modéré. Le processus de sélection ne travaille alors plus sur la fitness réelle f_r mais sur son image après *scaling*. Il existe diverses méthodes utilisées pour cette mise à l'échelle, par exemple le scaling linéaire ou le scaling exponentiel [13].

II.7.3 .Scaling linéaire

Dans ce cas, la fonction de *scaling* est une fonction affine, dont le coefficient directeur est généralement inférieur à un, ce qui permet de réduire les écarts de fitness et donc de favoriser l'exploration de l'espace. Néanmoins, ce *scaling* est statique par rapport au numéro de génération et devient donc gênant en fin de convergence lorsqu'on désire favoriser les dominants pour accélérer le processus de recherche. Le *scaling* exponentiel permet d'éviter ce phénomène.

II.7.4 .Scaling exponentiel

Le *scaling* exponentiel est défini de la façon suivante : $fs = fr^{k(n)}$, où n représente le numéro de la génération courante. Il est nécessaire d'introduire un coefficient exposant variable, car les phénomènes résultant du *scaling* varient avec sa valeur.

1. Pour k proche de zéro, on réduit fortement les écarts de fitness. Aucun individu n'est vraiment favorisé et l'algorithme génétique se comporte comme un algorithme de recherche aléatoire et permet d'explorer l'espace.
2. Pour k proche de 1 : le *scaling* est presque inopérant. Les individus sont triés juste selon leur adaptabilité propre, quasiment non modifiée. Le scaling ne favorise aucun individu, mais n'en défavorise également aucun.

Pour $k > 1$: les écarts sont exagérés et seuls les bons individus sont sélectionnés ce qui produit l'émergence des modes.

II.8.Théorie du schéma

Historiquement, les algorithmes génétiques binaires sont les plus anciens et ont donc été les plus étudiés sur le plan théorique en prenant en compte l'évolution des schémas. Holland était le premier à proposer la première version de la théorie des schémas, largement développé, ensuite par Goldberg. Nous traitons de la théorie le cas d'un problème d'optimisation dont la fonction objectif à maximiser.

II.8.1.Définitions fondamentales

Avant d'entrer dans le vif du sujet, c'est-à-dire la modélisation de notre problème nous présentons quelques définitions de base :

- **Définition 1 séquence.** on appelle séquence A de longueur $l(A)$ une suite $A = a_1 a_2 \dots a_i \dots a_l$ avec $i \in \{1, \dots, l\}$, $a_i \in V = \{0, 1\}$. en codage binaires les chromosomes sont des séquences.
 - **Définition 2 Schéma.** On schéma H de longueur l une suite $H = a_1 a_2 \dots a_l$ avec $\forall i \in \{1, \dots, l\}$, $a_i \in V^+ = \{0, 1, *\}$. Le signe (*) en population i signifie que a_i peut être indifféremment 0 ou 1.

- **Définition 3 Instance.** Une séquence $A = a_1 a_2 \dots a_i \dots a_l$ est une instance d'un schéma $H = b_1 \dots b_l$ si pour tout i tel que $b_i \neq *$ on a $a_i = b_i$.

Ainsi, $H = 010*01$ est un schéma et les séquences 010001 et 010101 sont ses seules instances.

- **Définition 4 (Position fixe, position libre).** Soit un schéma H . on dit que i est une position fixe de H si $a_i = 1$ ou $a_i = 0$. Par contre si $a_i = *$ est une position libre de H .

- **Définition 5 (Ordre d'un schéma.)** on appelle ordre du schéma H , noté $o(H)$, le nombre de positions fixes de H .

Par exemple, le schéma $H = 01**10*1$ a pour ordre $o(H) = 5$, et le schéma $H' = *****101$ a pour ordre $o(H') = 3$. On note qu'un schéma H de longueur $l(H)$ et de l'ordre $o(H)$ admet $2^{(l(H) - o(H))}$ instances différentes.

- **Définition (Longueur fondamentale).** On appelle longueur fondamentale du schéma H la distance séparant la première position fixe de H de la dernière position fixe de H . On note cette longueur fondamentale $d(H)$.

Ainsi, le schéma $H = 1**01***$ a pour longueur fondamentale $d(H) = 5 - 1 = 4$, le schéma $H' = 1*****1$ a pour $d(H') = 8 - 1 = 7$ et pour le schéma $H'' = **1*****$ nous avons $d(H'') = 3 - 3 = 0$.

- **Définition 7 (adaptation d'une séquence).** On appelle adaptation d'une séquence A une valeur positive que nous noterons $f(A)$. f est la fonction objectif ou la fonction ou fitness du problème à résoudre.

- **Définition 8 (adaptation de schéma).** On appelle l'adaptation d'un schéma H la valeur [19].

II.9.Certains différents types des algorithmes

Les algorithmes existants sont :

2.7.1. Des méthodes «1 contre n» :

–A*, Optimisation locale

2.7.2. Des méthodes réactives :

–Forces répulsives, réseaux de neurones

2.7.3 Des méthodes globales :

- Branch and Bound par intervalles
- Programmation semi-définie [11].

II.10.Limitations des algorithmes génétiques

Comme nous l'avons dit précédemment, les algorithmes génétiques sont des outils efficaces pour une classe de problèmes très large. De plus, ils permettent de traiter des problèmes où la fonction à optimiser ne présente aucune propriété de continuité ou de dérivabilité, par exemple. Néanmoins, les sections précédentes mettent en avant un certain nombre de limitations à leur sujet :

1. Ils sont moins efficaces qu'un algorithme déterministe spécifique (lorsqu'il en existe un) dédié à un problème donné.
2. Les nombreux paramètres qui les contrôlent sont délicats à régler (probabilités de croisement et de mutation notamment), ainsi que le codage des chromosomes qui peut faire varier radicalement la vitesse de convergence.
3. Afin de garantir la robustesse des algorithmes évolutifs, le calcul d'un très grand nombre de fitness (parfois de l'ordre de plusieurs centaines de milliers) est généralement nécessaire avant l'obtention d'une bonne solution. Ce nombre de calcul important peut s'avérer problématique lorsque le coût de calcul (ressources systèmes ou temporelles) de la fitness est important, lorsqu'on travaille en grande dimension sur des fonctions à complexité importante par exemple.
4. Ils peuvent éprouver des difficultés à gérer des contraintes nombreuses et complexes car la technique des pénalités intégrées à la fonction de coût utilise des contraintes a posteriori de manière passive [13].

II.11.Les applications des algorithmes génétiques dans le domaine du transport

Dans le domaine du transport, les algorithmes génétiques ont été utilisés pour la résolution des problèmes de régulation des réseaux de transport multimodal, pour le contrôle du trafic aérien, l'optimisation des itinéraires, etc.

Le problème de régulation des réseaux de transport multimodal nécessite non seulement le réordonnancement des courses des véhicules mais également la surveillance des réseaux et le diagnostic des incidents.

Le problème de contrôle du trafic aérien a été abordé par des approches évolutionnaires. Quatre thèmes sont particulièrement abordés : d'abord, la résolution des conflits entre les différentes trajectoires des avions, en prenant en considération une distance de séparation conforme à une norme donnée. Le deuxième thème aborde la division de l'espace bidimensionnel que représente le réseau aérien. Cette division doit représenter des secteurs équilibrés en termes de charge de travail, qui minimisent les tâches de coordination sachant que la charge de travail est liée au nombre d'avions et de conflits. Le troisième thème s'occupe de l'affectation du trafic entre les secteurs. Cette affectation doit réduire les augmentations des distances parcourues d'une part et la charge de travail des responsables des secteurs. Enfin, le dernier thème abordé concerne l'ordonnancement des temps d'atterrissage des avions sur un nombre limité de pistes.

Pour le problème de l'optimisation des itinéraires, propose une hybridation de l'algorithme de Dijkstra avec les algorithmes évolutionnaires pour optimiser des déplacements selon plusieurs critères.

- Synthèse de formes aérodynamiques, de structures et de matériaux composites (aéronautique, automobile, lentilles laser, ...)

- Problèmes d'emplois du temps, d'ordonnancement de tâches industrielles et de réseaux (aciéries, agroalimentaire, plannings de chemins de fer, positionnement d'antennes de téléphonie mobile, circuits d'assainissement, ...)

- Problèmes du voyageur de commerce T.S.P

- Détection de patterns en bioinformatique, en imagerie, ...

- Synthèse de circuits électroniques. Etc. [10].

II.12.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les fonctionnements nécessaires à la compréhension des algorithmes génétiques. Nous avons exposé en détail les différentes étapes qui constituent la structure générale d'un algorithme génétique : codage, méthode de sélection, opérateurs de croisement et de mutation avec leurs probabilités, méthode d'insertion, le test d'arrêt, Amélioration classique dans laquelle on distingue (Scaling linéaire et Scaling exponentiel), Théorie du schéma, Certains différents types des algorithmes génétiques , Limitations des algorithmes génétiques et en fin de ce chapitre on discute sur Les applications des algorithmes génétiques dans le domaine du transport. C'est pourquoi nous évaluons la qualité de l'algorithme génétique applique aux problèmes d'ordonnancement concernant le problème d'atterrissage des aéronefs.

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la résolution du problème d'atterrissage des avions (ALP) sur une piste. Cella consiste à ordonner une séquence d'atterrissage des avions sur un aéroport. Il s'agit ici de trouver une séquence qui minimise le temps total d'atterrissage des appareils, en respectant les fenêtres (intervalle d'atterrissage) et le temps de séparation avec les avions précédents. C'est ainsi que nous essayons de résoudre ce problème en utilisant les algorithmes génétiques avec une fonction objectif que nous allons expliciter.

III.2. Problématique

Lorsqu'un Avion arrive à l'intérieur d'une zone d'approche (alentour d'un aéroport), il requiert de cette dernière qu'elle lui assigne l'autorisation d'atterrir, une date d'atterrissage et une piste s'il y en existe plusieurs. L'heure d'atterrissage doit être comprise entre une heure au plus tôt qui correspond à l'heure d'atterrissage si l'avion vole avec sa vitesse maximale (qui n'est pas la plus économique pour l'avion) et une heure au plus tard.

A l'intérieur de cet intervalle il y a une heure nominale qui représente l'heure préférable d'atterrissage et qui correspond à l'heure où l'avion devrait atterrir s'il vole avec sa vitesse de croisière qui est la vitesse la plus économique pour l'avion. Un retard ou une avance par rapport à l'heure nominale occasionne des perturbations dans l'aéroport. Pour mieux gérer l'aéroport, une pénalité est associée à chaque retard ou avance mis par l'avion. L'objectif est de déterminer les heures d'atterrissage des Avions qui permettent de minimiser le coût total des pénalités en tenant compte d'un certain nombre de contraintes telles que :

- Un intervalle de sécurité entre deux atterrissages successifs sur une même piste;
- Un intervalle de sécurité qui doit séparer deux atterrissages successifs sur des pistes différentes;

III.3. Objectif à optimiser

Lorsqu'un contrôleur traite d'un ensemble d'avions dans une zone terminale cela revient à minimiser l'horaire d'atterrissage du dernier avion. Cette minimisation induit des modifications plus ou moins importantes sur les vols précédents, augmentant ainsi la valeur des coûts. De même lorsqu'un contrôleur demande à un vol de ralentir ou d'accélérer en zone terminale, cette action induit des coûts (pour les compagnies) qui augmentent en fonction du

décalage par rapport à l'horaire d'atterrissage prévu. On dit, aussi qu'une piste d'atterrissage est bien alimentée lorsque son temps d'inoccupation est très réduit. On a alors deux objectifs correspondant aux intérêts de l'ATC et à ceux des compagnies aériennes.

III.4. Les Types d'ordonnement

On distingue trois grandes familles d'ordonnement :

1-ordonnement semi-actif : les opérateurs sur les différentes machines sont calés à gauche et on ne peut pas changer leurs emplacements à gauche pour améliorer le critère d'optimisation.

2-ordonnement actif : c'est l'ordonnement semi-actif dont il est impossible d'avancer une opération sur une machine sans obligatoirement en reculer une autre ou il n'existe pas d'intervalle où une machine est libre et qu'il soit suffisamment grand pour qu'une opération soit avancée tout en respectant les contraintes de précédences des opérateurs d'une tâche.

3-ordonnement sans délai : c'est un ordonnement actif dans lequel on ne laisse jamais une machine inoccupée lorsqu'au moins une opération qui l'utilise est disponible la manière pour y être exécutée.

III.5. Formulation mathématique du problème

III.5.1. Formulation avec une seule piste

Pour cette formulation avec une piste on utilisera les notions suivantes :

P : le nombre d'avion

E_i : le temps au plus tôt d'atterrissage (dépendant de la vitesse maximale de l'avion i) ($i=1.., P$)

L_i : le temps d'atterrissage au plus tard (dépendant de la vitesse minimale du vol i) ($i=1.., P$)

T_i : l'heure prévue d'atterrissage de l'avion i ($i=1.., P$) où $E_i < T_i < L_i$

X_i : l'heure réelle d'atterrissage de l'avion i ($i=1.., P$)

S_{ij} : le temps de séparation requis entre l'atterrissage de l'avion i et celui de l'avion j

S_i : le moment d'atterrissage pour l'avion i ($i=1.., P$)

III.5.2. Les Contraintes

L'ensemble des contraintes assure que chaque avion doit atterrir dans sa fenêtre temporelle. Elles sont exprimées par : $T_i \in [E_i, L_i]$ pour tout avion i .

Pour les P avions qui attendent leurs tours pour atterrir on a :

$$E_i \leq X_i \leq L_i \quad \text{[III.1].}$$

c'est-à dire :

$$X_i = E_i + y_i * (L_i - E_i) \quad \text{[III.2].}$$

Où $y_i \in [0,1]$.

Pour tout avion i précédent avion j sur une piste on a :

$$X_i + S_{ij} \leq L_j \quad \text{[III.3].}$$

III.5.3. La Fonction Objectif

Sous ces contraintes, nous minimisons la F_X la fonction d'évaluation de X :

$$\text{Min}F_X = \min \sum Av_i * \max \{0, T_i - X_i\} + Ap_i * \{0, X_i - T_i\} = \text{Min} \sum Av_i * \alpha + Ap_i \beta_i \quad \text{[III.4].}$$

Où , Av_i : pénalité d'avance de l'avion i ,

Ap_i : pénalité de retard de l'avion i ,

α_i : avance de l'avion i par rapport à l'heure nominale = $\max (0, T_i - X_i)$,

β_i : retard de l'avion i par rapport à l'heure nominale = $\max (0, X_i - T_i)$.

III.6. Optimisation du problème par les algorithmes génétiques

III.6.1. Définitions Paramètres recherches

Nous utilisons le codage du chromosome suivant :

1	3	2	4	5	6	7	8	9	10
X1	X3	X2	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10

Tab.III .1 : Tableau de codage des chromosomes

Un individu est codé par un tableau de deux lignes et P colonnes. La première ligne détermine le séquençement d'atterrissage des avions : l'avion 3 atterrit avant l'avion 2 et ainsi de suite. La deuxième ligne contient l'heure effective d'atterrissage. Ainsi l'avion 3 atterrit à l'heure X_3, \dots , l'avion 8 atterrit à l'heure X_8 .

III.6.2. Génération De La Population Initiale

Nous commençons par générer deux individus selon l'ordre de croissant des heures le plus tôt, des heures préférentielles et des heures le plus tard. Ensuite nous complétons la population initiale par des individus générés aléatoirement.

III.6.3. Les Algorithmes établis pour le Calcul des Heures d'Atterrissage Des

Avions

a) Calcul du Déterministe Initial Des Heures d'Atterrissage Des Avions (AG1)

Seq une séquence d'atterrissage fixée ;

Var

$X[i], T[i], L[i], E[i], \text{DatePoss}[i]$: vecteur

P, i, j: entier;

Initialisation

$i \leftarrow 0$;

$X_{\text{Seq}(i)} = T_{\text{Seq}(i)}$;

Répéter

$i \leftarrow i+1$;

$\text{DatePoss}[i] = \text{Max}((X_{\text{Seq}(j)} + S_{\text{Seq}(j),i}), j = 0, \dots, (i-1))$;

$X_{\text{Seq}(i)} = \text{Min}(L_{\text{Seq}(i)}, \text{Max}(E_{\text{Seq}(i)}, \text{DatePoss}[i]))$;

Jusqu'à ce que ($i=P-1$)

b) Calcul aléatoire initiale des heures d'atterrissage des avions avec (les opérateurs de mutation ou de croisement) « $y_i \in [0,1]$ » (AG2)

Seq une séquence d'atterrissage fixée ;

$i \leftarrow 0$;

$X_{seq(i)} = T_{seq(i)}$;

Répéter

$i \leftarrow i+1$;

DatePoss [i]=Max($(X_{seq(j)} + S_{seq(j),i}), j = 0, \dots, (i-1)$);

Si ($T_{seq(i)} < \text{DatePoss [i]}$) **Alors**

$X_{seq(i)} = \text{DatePoss [i]} + y * (L_{seq(i)} - \text{DatePoss [i]});$

Sinon

$X_{seq(i)} = T_{seq(i)} + y * (L_{seq(i)} - T_{seq(i)});$

Finsi

Jusqu'à ce que ($i=P-1$)

c) Amélioration du calcul des X_{seq} pour sélectionner les meilleurs individus (AG3)

Meilleur $\leftarrow X$; F meilleur $\leftarrow F_X$;

$A_v = A_p = 0$;

Pour i de 0 à P-1 faire

Si ($X_{seq(i)} < T_{seq(i)}$) **Alors**

Alpha= $T_{seq(i)} - X_{seq(i)}$;

Si (Alpha > A_v) **Alors**

$A_v = \text{Alpha}$

Finsi

Sinon

Alpha= $X_{seq(i)} - T_{seq(i)}$;

Si ((Alpha > A_p) **Alors**

$A_p = \text{Alpha}$

Finsi

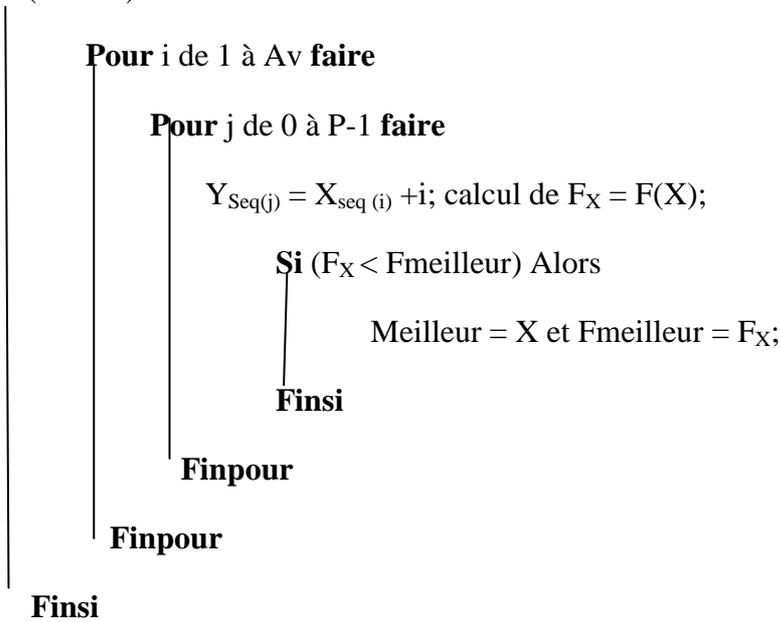
Finsi

Finpour

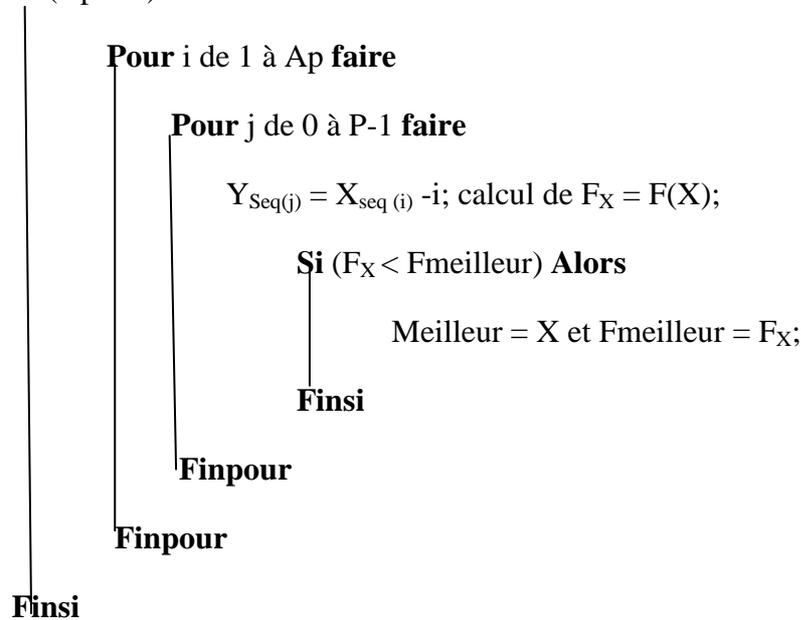
$A_v = \text{Min} \{A_v, \text{Min} \{(T_i - E_i), i=0, \dots, (P-1)\}\};$

$A_p = \text{Min} \{A_p, \text{Min} \{(L_i - E_i), i=0, \dots, (P-1)\}\};$

Si ($A_v > 0$) **Alors**



Si ($A_p > 0$) **Alors**



$X \leftarrow \text{Meilleur}$ et $F_x \leftarrow F_{\text{meilleur}}$;

III.7.Description du processus d'évaluation

Après avoir présenté la description complète du processus d'évaluation, nous allons préciser les trois opérateurs génétiques: la sélection, le croisement et la mutation. Les opérateurs génétiques doivent faire évoluer la population de solutions de façon à obtenir les solutions les plus adaptées à la planification d'atterrissage d'avions.

Considérons le cas de 10 avions représentés par leur fenêtre d'atterrissage ainsi que leur heure nominale.

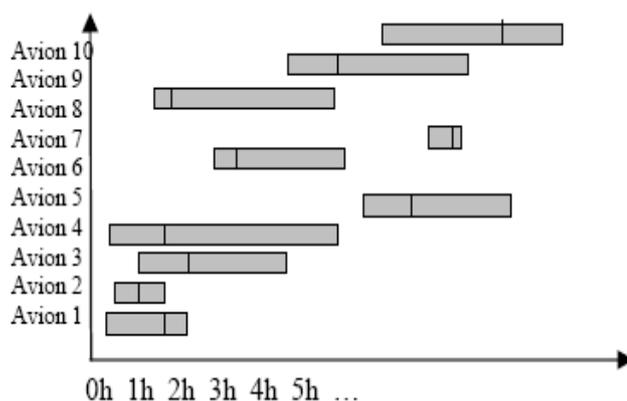


Fig.III.1 :Fenêtre d'atterrissage et les heures nominales des avions.

III.7.1.Codage

Chaque solution est codée sous forme d'une chaîne de réels, appelé un chromosome. C'est une séquence de gènes. Chaque gène représente une date d'atterrissage d'un avion. Notons ici que la méthode de codage peut être différente et la longueur de chromosome peut être variable.

Exemple :

$$X = \{170,406,98,103,127,118,139,147,155,190\}$$

Nous traitons ici un problème d'ordonnancement d'atterrissage de 10 avions sur une seule piste. Les données du problème sont :

$$P=10 ;$$

$$T=\{155,258,98,106,123,135,138,140,150,180\} ;$$

$$Av[10] = \{10,10,30,30,30,30,30,30,30,30\} ;$$

$$Ret[10]= \{10,10,30,30,30,30,30,30,30,30\} ;$$

$$E[10]=\{129,195,89,96,110,120,124,126,135,160\} ;$$

$$L[10]=\{559,744,510,521,555,576,577,573,591,657\}.$$

Les temps de séparation S_{ij} sont liés par des considérations aérodynamiques.

III.7.2. Présentation génétique

Expliquons maintenant le processus d'évolution génétique : Lors de la reproduction de deux individus, il y a croisement des emprunts génétiques et/ou mutation.

Les algorithmes génétiques utilisent ces notions en appliquant le principe de sélection naturelle de manière à converger vers la meilleure solution:

- On part d'une population initiale (ensemble de-solutions admissibles) ;
 - Une nouvelle population est ensuite créée en-appliquant successivement sélection (Sélection par la-roulette, Sélection NDS ou Sélection WAR), le croisement à deux points et la mutation.
 - Les trois opérateurs sélection, croisement et mutation seront appliqués pendant plusieurs générations. A chaque génération, une nouvelle population est créée remplaçant l'ancienne.
- Ce processus est stoppé après un nombre d'itérations fixé ou si la meilleure solution n'a pas été améliorée depuis un nombre donné d'itérations ;

III.7.3. Sélection

Trois méthodes de sélection basées sur la dominance ont été utilisées :

1-Sélection par la roulette : Les meilleures solutions ont plus de chance d'être sélectionnées.

2-NDS (Non Dominated Sorting) : cette méthode sélectionne les solutions en fonction de leur rang. A chaque itération, on sélectionne la solution de rang supérieur. Le rang d'une solution est le nombre de solutions dominantes (meilleures que la solution) plus un. Donc une solution non dominée de la population est de rang un. Ce type de ranking induit favorise la sélection des meilleures solutions (une forte pression de sélection), et peut causer une convergence prématurée.

3-WAR (Weighted Average Ranking) : les différents coûts (fonction objectif) de chaque solution sont évalués à différentes phases (évaluation, croisement, mutation).

Une liste de valeurs est établie pour chaque phase. Ces listes sont alors triées en ordre décroissant, en associant un ordre pour chaque solution et chaque phase. La moyenne des rangs est finalement calculée pour chaque solution. On sélectionne ensuite à chaque itération la solution dont la moyenne des rangs sont élevée.

III.7.4. Operateur de croisement

La procédure de croisement est décrite ci dessous :

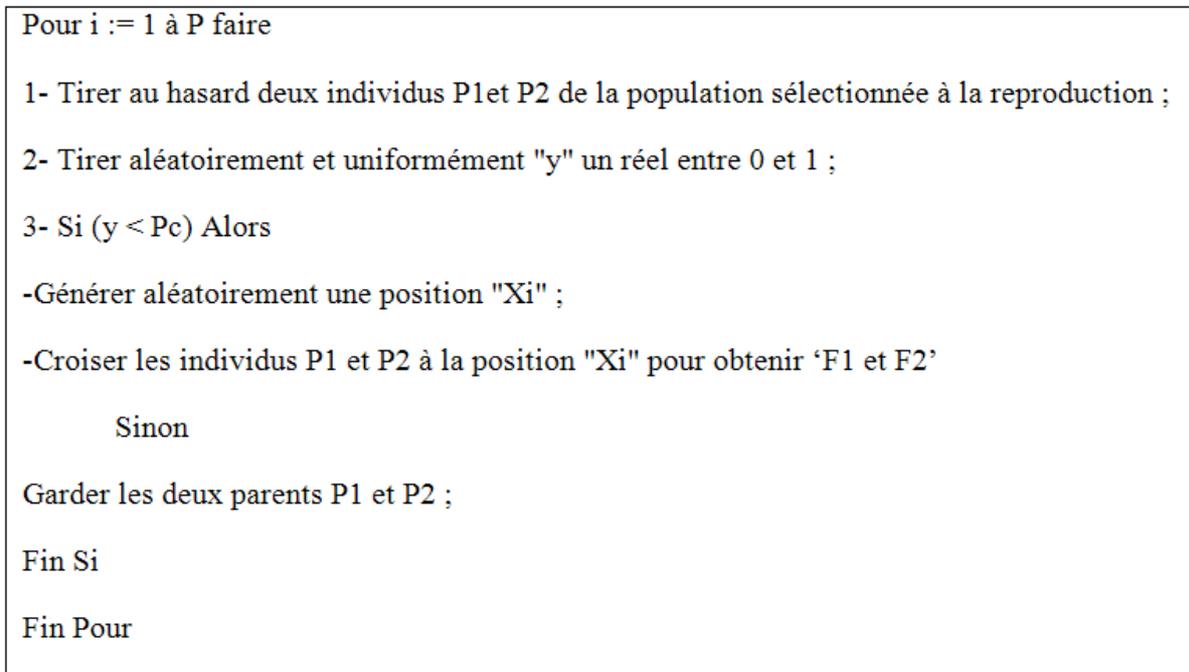
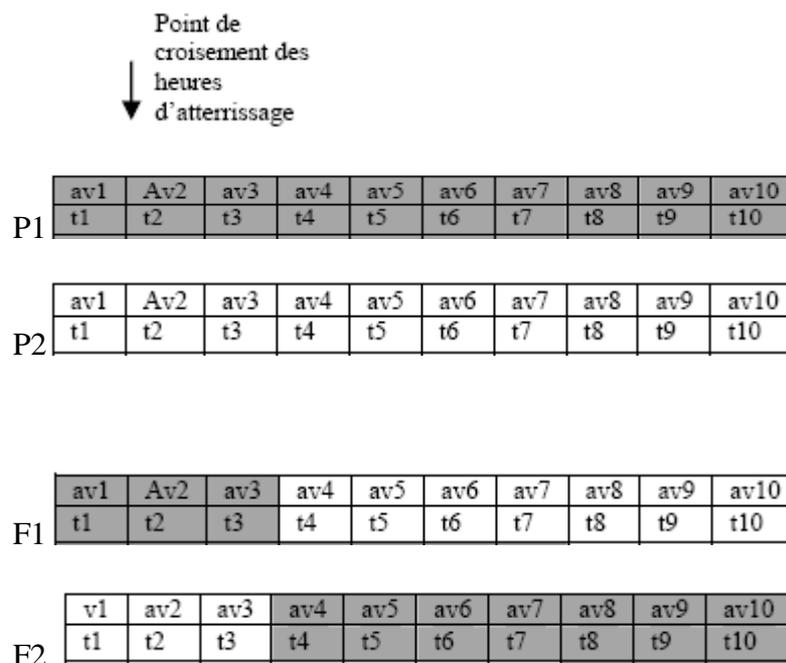


Fig.III.2 :Algorithme de Procédure Croisement.



Tab.III.2 : Opérateur de croisement

III.7.5. Operateur de mutation

La procédure de mutation est décrite ci dessous :

Pour $i := 1$ à P faire
 1-Tirer un individu de la population sélectionnée à la reproduction ;
 2-Tirer un réel "y" uniformément dans $[0,1]$;
 3-Si ($y < P_m$) Alors
 Muter l'individu :
 4-Tirer au hasard une position i entre 1 et nb d'avions
 5- Si (Le nombre de rotations affêtees à la séquence est Supérieure à 1) Alors
 6-Tirer au hasard un avion i de la séquence
 7- Si (L'avion i effectue une rotation) Alors
 Enlever l'avions j de la séquence
 8-Sinon
 Affecter à la séquence une nouvelle rotation, à partir de j , si la contrainte Rotation est toujours vérifiée
 9-Fin Si
 10-Sinon
 Affecter à la séquence une nouvelle rotation
 11-Fin Si
 12-Fin Si
 13-Fin Pour

Fig.III.3 :Algorithme de Procédure Mutation.

Nous fixons le nombre de points de mutation à 4 pour la liste des avions.

	av1	Av2	av3	av4	av5	av6	av7	av8	av9	av10
Parent	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10

	av1	Av2	av3	av4	av5	av6	av7	av8	av9	av10
Enfant	*	t2	*	t4	t5	t6	*	t8	*	t10

Tab.III.3 : Opérateur de mutation.

Les cases marquées d'une étoile bleue dans la liste des avions signifie que les valeurs correspondantes sont changées (le choix des points de mutation est aléatoire et pas nécessairement le même dans la liste).

Notre opérateur de mutation appliqué avec une probabilité de mutation égale à 0.1

III.8. Conclusion

Ce modèle présenté dans ce chapitre est destiné pour pouvoir développer un outil d'aide à la décision au profit des contrôleurs de région terminale en vue de fluidifier le trafic des arrivées sur une piste. Le critère qui a été retenu dans ce modèle est celui de la minimisation d'une fonction croissante (pénalité) des vols présent dans les files d'attente sur une période considérée. Avec ce modèle mathématique nous avons puis établir ces trois algorithmes qui seront implémentés dans Delphi7 pour réalisation de notre application.

IV.1. Introduction

Lors de la réalisation de cette étude, nous avons été amenés à concevoir un logiciel dans le but d'appliquer au problème posé. La conception d'un logiciel performant est une étape très importante et indispensable dans notre étude. L'implémentation du modèle et la programmation de son système de résolution représentent une étape primordiale pour la réalisation de ce travail. La réalisation du logiciel a été faite en langage de programmation DELPHI 7 version d'évolution gratuite, fonctionnant sous Windows XP.

IV.2. Le langage de programmation Delphi

Delphi est un environnement de programmation visuel orienté objet pour le développement rapide d'application. En utilisant Delphi, nous pouvons créer de puissantes applications sur (Windows XP, vista, Unix,...etc.) avec un minimum de programmation. Delphi fournit tous les outils nécessaires pour développer, tester et déployer des applications, notamment une importante bibliothèque de composants réutilisables, une suite d'outils de conception, des modèles d'applications et de fiches et des experts de programmation. Delphi permet de concevoir tout type d'application 32 bits, qu'il s'agisse d'un utilitaire de portée générale, d'un programme complexe de gestion de données ou d'une application distribuer. Delphi est actuellement reconnu comme l'outil de développement visuel par excellence. Il est même cité comme référence dans des séminaires de Microsoft [20].

IV.3. Le choix du langage de programmation

Beaucoup des langages s'avéraient capables d'assurer le meilleur choix, le C++ builder, Delphi, Matalab...etc. Mais vu la richesse bibliothèque de Delphi en terme d'interface, on a choisis de programmer en Delphi avec notre peu de connaissance en Delphi.

IV.4.Utilisation du logiciel

pour faciliter l'usage de l'application un organigramme a été établi pour montre les étapes a exécuté (voir Fig. IV.1)

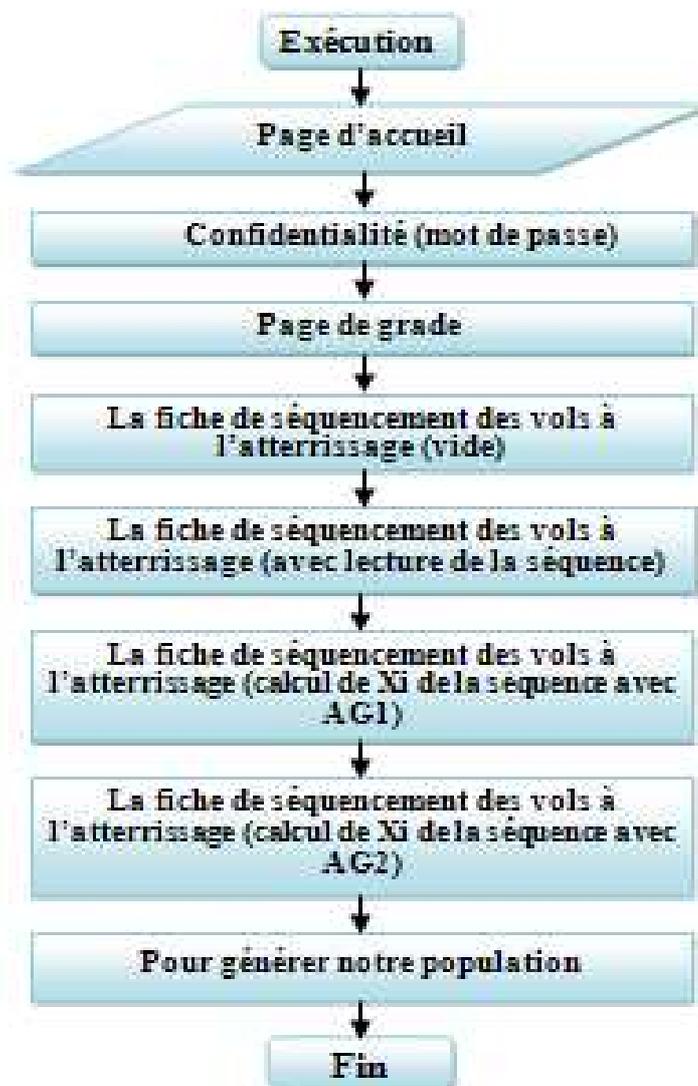


Fig. IV.1 : Organigramme pour l'usage de l'application

Pour mieux exploiter cette application nous avons représenté Les étapes et leurs interfaces de la manière suivante :

-En cliquant sur le fichier exécutable, la fenêtre suivante apparaît :

1. Page d'accueil :

C'est la page principale de l'application, pour continuer l'exécution de l'application on clique sur le bouton "suivant".



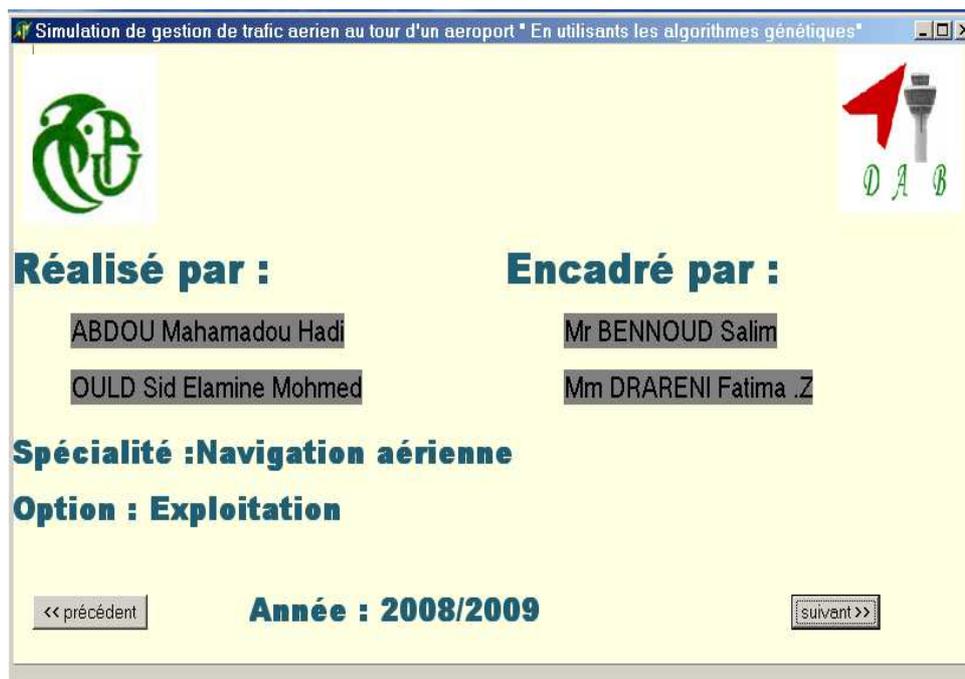
2. Confidentialité :

Afin de préserver l'intégrité et la confidentialité de notre logiciel, ce dernier est protégé par un code d'accès au menu suivant:



Faire entrer le mot de passe puis validez «ok » en cliquant sur la flèche.

3. page de grade :



On clique sur le bouton “précédent” pour revenir sur précédent et si on clique sur le bouton “suivant” on a une fenêtre principale qui s’affiche :

4. La fiche de séquençement des vols à l'atterrissage (vide)

Cette fiche est liée à trois fichiers bloc-notes pour La saisie des données du trafic d'une journée

Avec le fichier time consacrée à la saisie des données (temps prévu pour chaque avion). Pour une première utilisation, les données doivent être saisies manuellement : on commence par saisir la taille de la séquence et ensuite les saisir. Après cela cliquez à droite sur le menu fichier, choisissez la commande enregistrée et les données apparaissent sur la fiche. En cliquant le bouton sur lire les temps des séquences toutes les informations sur la séquence s'affichent comme la montre la fiche suivant :

5. La fiche de séquençement des vols à l'atterrissage (avec lecture de la séquence)

Simulation de gestion de trafic aerien au tour d'un aeroport " En utilisant les algorithmes génétiques"

A propos Séquençement des vols à l'atterrissage cas pour une piste

Tableau de Codage des sequences ...

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10

Tableau des donneés ...

Lires les Temps des Sequences Temps de separation 00:03:00 Prix Unitaire AV 1 Prix Unitaire AP 1 Facteur Mutation 0.3

Seq i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Ti	15:00	15:10	15:27	15:42	15:55	16:06	16:20	16:30	16:50	17:02
Li	15:05	15:11	15:29	15:43	15:58	16:08	16:22	16:32	16:52	17:03
Ei	14:57	15:07	15:25	15:38	15:53	16:03	16:16	16:28	16:47	16:57
Xi(AG1)										
Di(AG1)										
Penalité										
Xi(AG2)										
Di(AG2)										
Penalité										

Calculs Xi (AG1)

Meilleur Dt Penalité Total AV Penalité Total AP Penalité Total

Calculs Xi (AG2)

Meilleur Dt Penalité Total AV Penalité Total AP Penalité Total

Pour avoir des renseignements sur les abréviations clique sur legendes.

6. La fiche de séquençement des vols à l'atterrissage (calcul de X_i de la séquence avec AG1)

Simulation de gestion de trafic aerien au tour d'un aeroport - En utilisant les algorithmes genetiques

A propos Séquençement des vols à l'atterrissage cas pour une piste

Tableau de Codage des sequences ...

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10

Tableau des donnees ...

Lires les Teemps des Sequences Temps de separation 00:07:00 Prix Unitaire AV 1 Prix Unitaire AP 1 Facteur Mutation 0,1

Seq i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Ti	15:00	15:10	15:27	15:42	15:55	16:06	16:20	16:30	16:50	17:02
Li	15:05	15:11	15:29	15:43	15:58	16:08	16:22	16:32	16:52	17:03
Ei	14:57	15:07	15:25	15:38	15:53	16:03	16:16	16:28	16:47	16:57
$X_i(AG1)$	15:00:00	15:11:00	15:29:00	15:43:00	15:58:00	16:08:00	16:22:00	16:32:00	16:52:00	17:03:00
$Dt(AG1)$		00:01:00	00:02:00	00:01:00	00:03:00	00:02:00	00:02:00	00:02:00	00:02:00	00:01:00
Penalité		1	2	1	3	2	2	2	2	1
$X_i(AG2)$										
$Dt(AG2)$										
Penalité										

Calculs Xi (AG1)

Meilleur Dt 00:01:00 Ap Penalité Total AV 0 Penalité Total AP 16 Penalité Total 16

Calculs Xi (AG2)

Meilleur Dt ... Penalité Total AV Penalité Total AP Penalité Total

Le bouton « calcul Xi (AG1) » permet d'affiche l'heure d'atterrissage et la pénalité pour chaque vols de la séquence.

7. La fiche de séquençage des vols à l'atterrissage (calcul de Xi de la séquence avec AG2)

The screenshot shows a software window titled "Simulation de gestion de trafic aerien au tour d'un aeroport " En utilisant les algorithmes genetiques". The main heading is "Séquençage des vols à l'atterrissage cas pour une piste". Below this, there are two tables: "Tableau de Codage des sequences" and "Tableau des données".

The "Tableau de Codage des sequences" is a 10x10 grid with columns labeled X1 to X10 and rows labeled 1 to 10.

The "Tableau des données" contains the following data:

Seq i	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Ti	15:00	15:10	15:27	15:42	15:55	16:06	16:20	16:30	16:50	17:02
Li	15:05	15:11	15:29	15:43	15:58	16:08	16:22	16:32	16:52	17:03
Ei	14:57	15:07	15:25	15:38	15:53	16:03	16:16	16:28	16:47	16:57
Xi(AG1)	15:00:00	15:11:00	15:29:00	15:43:00	15:58:00	16:08:00	16:22:00	16:32:00	16:52:00	17:03:00
Dt(AG1)		00:01:00	00:02:00	00:01:00	00:03:00	00:02:00	00:02:00	00:02:00	00:02:00	00:01:00
Penalité	1	2	1	3	2	2	2	2	1	
Xi(AG2)	15:00:00	15:10:00	15:27:48	15:42:19	15:55:22	16:06:03	16:20:17	16:30:04	16:50:59	17:01:54
Dt(AG2)		00:00:00	00:00:48	00:00:19	00:00:22	00:00:03	00:00:17	00:00:04	00:00:59	00:00:05
Penalité	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Below the table, there are two sections for calculations:

- Calculs Xi (AG1A):** Meilleur Dt: 00:01:00 Ap, Penalité Total AV: 0, Penalité Total AP: 16, Penalité Total: 16
- Calculs Xi (AG2):** Meilleur Dt: 00:00:00 Ap, Penalité Total AV: 0, Penalité Total AP: 0, Penalité Total: 0

Le bouton « calcul Xi (AG2) » permet d'afficher l'heure d'atterrissage pour chaque et la pénalité de chaque avions de la séquence.

8. Pour générer notre population

Simulation de gestion de trafic aerien au tour d'un aeroport " En u...

affichage des codes

91
25
41
44
75
67
55
83
82
99

Tri :

par Sélection(roll) Rapide
 Bulles ranking

Temps en secondes : 0

Ce temps pour tirer

==> Trier les données ==>

Données :

Nombre des Avions: 10

compteur d'itération : 100

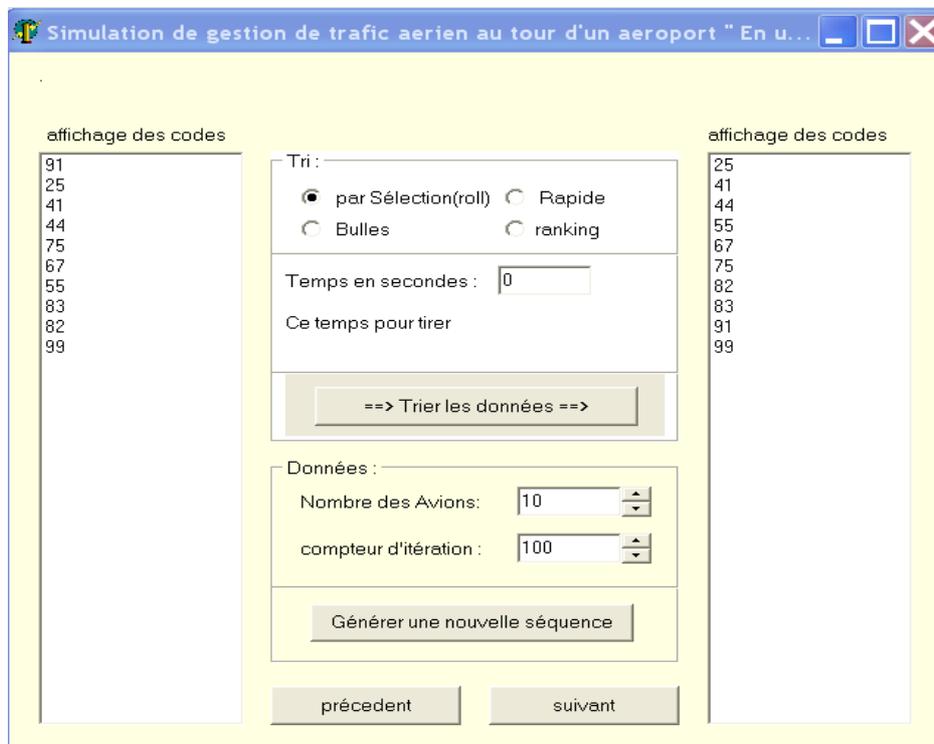
Générer une nouvelle séquence

précédent suivant

affichage des codes

Cette fiche permet de générer une autre séquence en cliquant sur le bouton «Générer une nouvelle séquence » mais avant cela l'utilisateur doit fixer le nombre des éléments de la séquence c'est-à dire la taille.

Et ensuite il tire par sélection les codes attribués qui seront ordonnés dans l'autre fenêtre d'affichage :



Pour terminer la simulation on clic sur l'onglet « suivant ».

IV.5. Avantage de l'application :

1. Protection des fichiers de données lors de la manipulation de la simulation.
2. À chaque tentative d'édition des données, l'utilisateur est mis en garde et averti des conséquences.
3. Protection contre l'introduction des données erronées : Désactivation automatique des champs de saisie et les messages d'erreur mis en place.
4. Le logiciel est facile à l'utilisation grâce à la richesse de son interface et à sa présentation étudiée.

IV.6.les résultats obtenus

Les tests ont été basées sur un ensemble de données rassemblant 10 avions. tous les avions ne sont pas du même type mais ont la même possibilité d'être déplacés dans le passé ou dans le futur.

Les paramètres de l'algorithme pour le test sont :

- La taille de la population est fixe à 10 Avions
- La méthode de sélection est la roulette ;
- L'opérateur de croisement est appliqué avec une probabilité ($P_c=1$) ;
- L'opérateur de mutation est appliqué avec une probabilité ($P_m=0.1$),
- Le nombre maximum de générations $P=100$;

L'algorithme s'arrête lorsque le temps de séparation est de 11 minutes à 01 h:30 minutes.

Nous fixons les opérateurs de l'algorithme et nous changeons la manière de calcul la pénalité sur chaque avion. Et chaque fois qu'il y a une meilleure solution, il la sauvegarde et tente de voir s'il est une pénalité avant ou après.

IV.6.1.Analyse des résultats obtenus

Dans cette partie, les résultats des simulations seront détaillés. Nous analyserons également les différences entre les deux types de solutions envisageables par l'algorithme génétique (AG1) et (AG2).

Les résultats expérimentaux sont obtenus dans une journée de trafic (entre 15 :00 et 17 :00 du 11 juin 2009) sur l'aéroport Houari Boumediene d'Alger (DAAG). La base de données peut contenir jusqu'à $P = 100$ avions. Pour chaque avion, on précise l'heure réelle d'atterrissage.

-Simulation 1 :

Dans un premier cas, appelée déterministe des heures d'atterrissage, des simulations ont été réalisées sans tenir compte des opérateurs (de croisement ou de mutation).

-Simulation 2 :

Dans le second cas, appelée AG2 qui fait intervenir le facteur de mutation.

Les simulations ont démontré l'importance d'une bonne gestion des arrivées sur un aéroport.

En effet, une bonne répartition des arrivées permet de réduire les pénalités subies par certains avions.

Les Tableaux présentes les résultats obtenus pour les dix premiers aéronefs avec un temps de séparation de sept minutes(7) et un facteur de mutation de ($P_m = 0.1$).

N° de génération	pénalité (s)
1	00
2	60
3	120
4	60
5	180
6	60
7	60
8	120
9	120
10	60

Tab.IV.1 : des résultats obtenus pour AG1.

Sur les dix (10) vols testés ici, on relève selon l'algorithme génétique (AG1), la majorité des aéronefs sont pénalisés cela est due a une permutation dans la séquence du deuxième avions par rapport au troisième. Donc la règle du « première arrivée première servie » n'est pas respect.

N° de génération	Pénalité(s)
1	00
2	00
3	48
4	19
5	22
6	03
7	17
8	04
9	59
10	05

Tab. IV.2 : des résultats obtenus pour AG2.

Sur les mêmes vols testés avec l'algorithme génétiques (AG2) on constat que tous les avions sont pratiquement non pénalisant a cause du facteur (de croisement et de mutation) qui parviennent d'une manière aléatoire.

IV.6.2. Comparaison des deux algorithmes

Nous présentons dans ici sous forme des graphes les résultats obtenus sur les tableaux précédent.

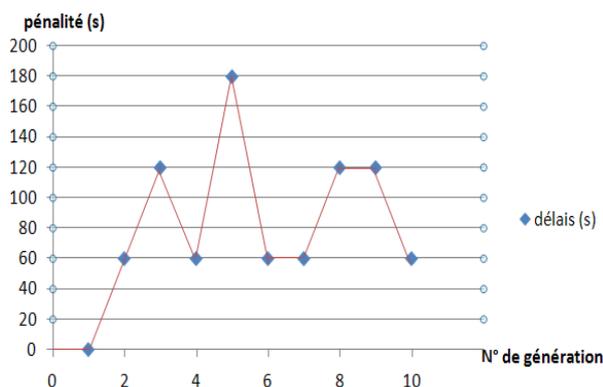


Fig. IV.2 : Pénalité en fonction du N° de génération (AG1).

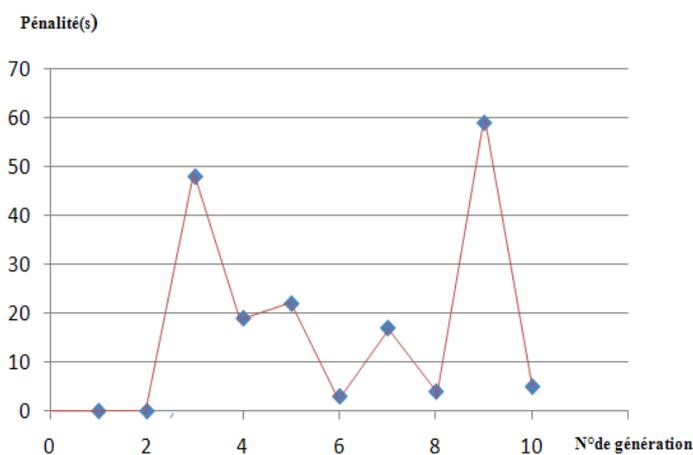


Fig. IV.3 : Pénalité en fonction de N° de génération (AG2).

Les algorithmes génétiques sont utilisés pour une population de 10 individus (avions), et une solution sans pénalité est obtenue au bout de 6 à 8 générations pour le cas d'AG2 (en utilisant de l'opérateur de croisement ou de mutation adapté). L'algorithme est arrêté après l'apparition d'une solution sans pénalité. On remarque aussi que pour la courbe(AG1), que le vol N°5 est beaucoup plus pénalisé que les autres par contre pour la courbe (AG2) tous les vols sont moins pénalisés et particulier le vol N°6 à enregistrer une pénalité nulle.

On observe que l'algorithme génétique (AG1) est toujours moins bon que le deuxième algorithme. La différence de retard ou d'avant minutes en moyenne lorsque la séquence est chargée (20 avions programmés). Donc une approche minutée pénalise globalement moins les avions que l'approche générale.

Remarque :

D'après plusieurs simulations avec des données réelles, nous pouvons confirmer les observations suivantes :

-AG2 donne des meilleures solutions que (AG1) surtout pour les vols qui ont des pénalités après.

-AG3 a permis d'améliorer d'une manière significative les deux algorithmes (AG1 et AG2), en sélectionnant les meilleurs individus (avions) c'est-à dire les moins pénalisants.

IV.6.3. Évolution de la fonction fitness

La fonction est présentée en fonction du nombre d'avions dans la séquence des arrivées sur la plate-forme, ceci afin de montrer la dépendance des retards en fonction de la densité de trafic.

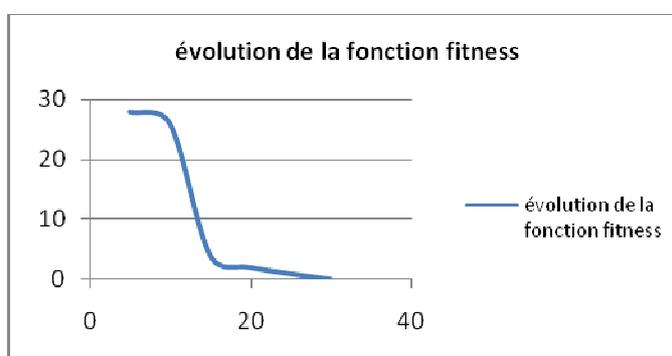


Fig.IV.4 : Evolution de la fonction objective en fonction du nombre d'avions.

Avec cette courbe nous avons remarqué qu'une séquence de 15 à 30 avions donne un taux de convergence meilleur par rapport à une séquence de 5 à 10 vols. Donc le nombre d'avions compris dans la séquence est un facteur très important pour la convergence.

La courbe montre l'évolution du meilleur individu (la fonction fitness). La forte décroissance représente l'émergence de solutions réalisables (qui respectent les contraintes).

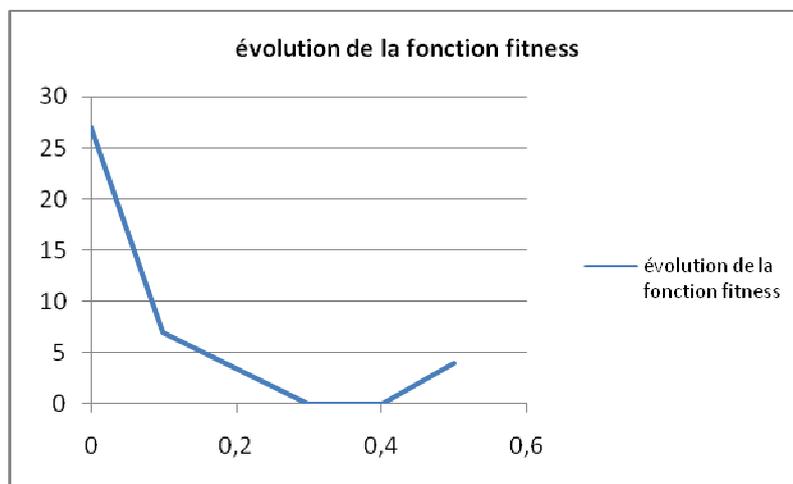


Fig.IV.5 : L'évolution de la fonction fitness en fonction du facteur de mutation.

L'accroissement du facteur de mutation montre que le processus n'améliore pas la convergence à partir de 0.4 jusqu'à 1.

IV.6.4. Influence des paramètres

	Test 1		Test 2	
Paramètres	Facteur de mutation = 0.3	temps de séparation t = 7 min	Facteur de mutation = 0.1	temps de séparation t = 5min
AG 1	16		16	
AG 2	5		1	

Tab. IV.3 :

Observations :

Pour le temps de séparation à partir d'une minute jusqu'à 11 minutes la pénalité sur les vols est pratiquement nulle pour un facteur de mutation (Fm=0.1). Alors que pour un facteur de mutation (Fm=0.3) d'une minute jusqu'à sept minutes la pénalité sur les vols est trop élevée.

On constate que plus on augmente le facteur de mutation et plus la pénalité sur les vols est beaucoup importante .donc pour des valeurs faible de facteur de mutation ; les résultats sont plus acceptables qu'avec des fortes valeurs.

D'après deux simulations avec des données réelles, nous pouvons confirmer les observations suivantes :

-AG2 donne des meilleures solutions que (AG1) surtout pour les vols qui ont des pénalités après.

-AG3 a permis d'améliorer d'une manière significative les deux algorithmes (AG1 et AG2), en sélectionnant les meilleurs individus (avions) c'est-à dire les moins pénalisants.

IV.7. Conclusion

Ces résultats montrent que la pénalité moyenne (retard ou avant a l'arrivée) des vols sur un aéroport à forte densité peut-être réduit de plusieurs minutes en fonction de la stratégie d'optimisation employée. Ceci montre l'intérêt potentiel du développement d'outils d'aide au contrôle en approche et au sol. Les algorithmes génétiques adaptent bien pour traiter ce problème combinatoire car leurs solutions s'approchent plus facilement de l'optimum global. Notons également que le modèle à pu être amélioré la pénalité sur la majorité des aéronefs de la séquence. En définitif notre application est très simple à manipuler avec des données réelles, mais après plusieurs simulations nous avons constat que les données non réelles aboutissent a des résultats très pénalisant pour beaucoup d'aéronefs. C'est pourquoi à travers toute cette application nous avons utilisé uniquement des données réelles c'est-à dire des Plans de vol réels. Pour cela nous pouvons dire que Cette application peut servir de base, à un développement dans le sens de l'aide à la décision pour facilité la gestion des arrivées sur une seule piste.

Conclusion générale

L'objectif principal de notre travail a été de contribuer à l'amélioration des techniques de gestion des flux d'aéronefs sur une plate-forme aéroportuaire en particulier les arrivées.

L'étude présentée doit aussi pouvoir s'insérer dans le processus global de gestion des opérations aéroportuaires. Il est clair que le niveau de planification et les études de capacité basées sur une représentation séquentiel des flux de trafic aéroportuaire, fourniront des éléments de base pour dimensionner les différents paramètres nécessaires à la résolution du problème de la programmation nominale des heures de départ et d'arrivée des vols en tenant compte de la capacité piste disponible. C'est dans ce sens que nous remarquons que La gestion du trafic aérien est une source de problèmes de grande taille, à variables mixtes, généralement très combinatoires.

c'est ainsi qu'à partir de notre étude théorique réalisée, nous avons puis explicité un modèle mathématique permettant de prévoir le retard ou l'avancement d'un aéronef en fonction de son heure d'arrivée dans la zone d'approche (information très utile pour le contrôle du trafic aérien) a été obtenu. A travers ces résultats nous pouvons dire notre application permet d'améliorer la stratégie du « premier arrivé premier servi » appliquée actuellement par les contrôleurs des zones terminales. Et notre algorithme génétique permet de gérer plus de quatorze avions simultanément. Donc il rend plus convenable La congestion d'un aéroport qui est toujours un point clé pour tous les exploitants.

Ainsi dire que cette étude a atteint en grande partie son objectif fixé au départ, dans le sens de la mise en œuvre d'une application basée sur le séquençement des vols à l'atterrissage sur une piste, en faisant appel à des techniques de la recherche opérationnelle, qui ont déjà fait leurs preuves dans ce domaine, notamment :

- les algorithmes génétiques que nous venons d'établir pour réalisé ce travail
- colonies de fourmis
- Les méthodes 2-opt et 2-opt*.etc...

Notons bien que Beaucoup d'améliorations restent à apporter à ce travail : par exemple, le critère d'optimisation devra prendre en compte les aéronefs ayant un créneau de départ impératif suite à la régulation du trafic aérien(CFMU), et les contraintes opérationnelles (SID et STAR).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : le système transport aérien intégration équipages et contrôleurs .colloque international Toulouse, *novembre 1994*
- [2] : **Jean Michel R.** simulation de vol et de contrôle. Presses universitaires de France, 2007
- [3] : **Olivier RICHARD.** Régulation court terme du trafic aérien et optimisation Combinatoire Application de la méthode de génération de colonnes Thèse institut national polytechnique de Grenoble : 2007.
- [4] : **doc 4444**, règles de l'aire et services de la circulation aérienne, *édition 2007.*
- [5] : **David Gianazza.** Optimisation des flux de trafic aérien. Thèse : institut national polytechnique de Toulouse, 1995.
- [6] : **Jean-Baptiste GOTTELAND.** Optimisation du trafic au sol sur les grands aéroports. Thèse : institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [7] : **Nicolas Archaumbault et Gérard Granger.** Heuristiques d'ordonnancement pour une résolution embraqué de conflits aériens par une méthode séquentielle,
- [8] : **Annexe 11.**service de la circulation aérienne. *Edition 2001.*
- [9] : **AIP ALGERIE.**
- [10] : **Hayfa ZGAYA .**Conception et optimisation distribuée d'un système d'information d'aide à la mobilité urbaine. Thèse : Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [11] : **Nicolas Durand.** Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien. *Octobre 2005.*
- [12] : **D. Goldberg.** Algorithmes génétiques, Addison-Wesley France 1994
- [13] : **Jean-Marc Alliot, Nicolas Durand.** Algorithmes génétiques *.March2005*
- [14] : **DERRICHE REDOUANE.** Le CFMU et la congestion du trafic aérien. Thèse : département d'aéronautique de Blida ,2006-2007
- [15] : **Olivier Cateloy, Jérôme Rodriguez.** Détermination de la capacité d'un aéroport. *Novembre 2005*
- [16] : **Doc 9854,** Concept opérationnel d'ATM mondiale, *édition 2005.*
- [17] : **Olivier RICHARD.** Régulation court terme du trafic aérien et optimisation combinatoire Application de la méthode de génération de colonnes. Thèse : institut national polytechnique de GRENOBLE, 2007

[18] : **Stoica Dragos, Constantin.** Analyse, représentation et optimisation des avions sur une plate-forme aéroportuaire. Thèse : institut national polytechnique de Toulouse, *décembre 2004.*

[19] : **Saïd BOURAZZA.** Variantes d'Algorithmes génétiques appliquées aux problèmes d'ordonnancement. Thèse : Université du Havre, Faculté des Sciences et Techniques, école doctorale SPMII Normandie *novembre 2006.*

[20] : **Belhocine Ali.** Simulation des paramètres dynamiques du réseau transport gaz du centre. Thèse : Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene d'Alger, *2007*

Les sites web

www.sia-enna.dz

www.skyguide.ch

www.recherche.enac.fr/opti/facile

www.eurocontrol.int/ais

Annexe A

Tableau des différentes classes des espaces aériens :

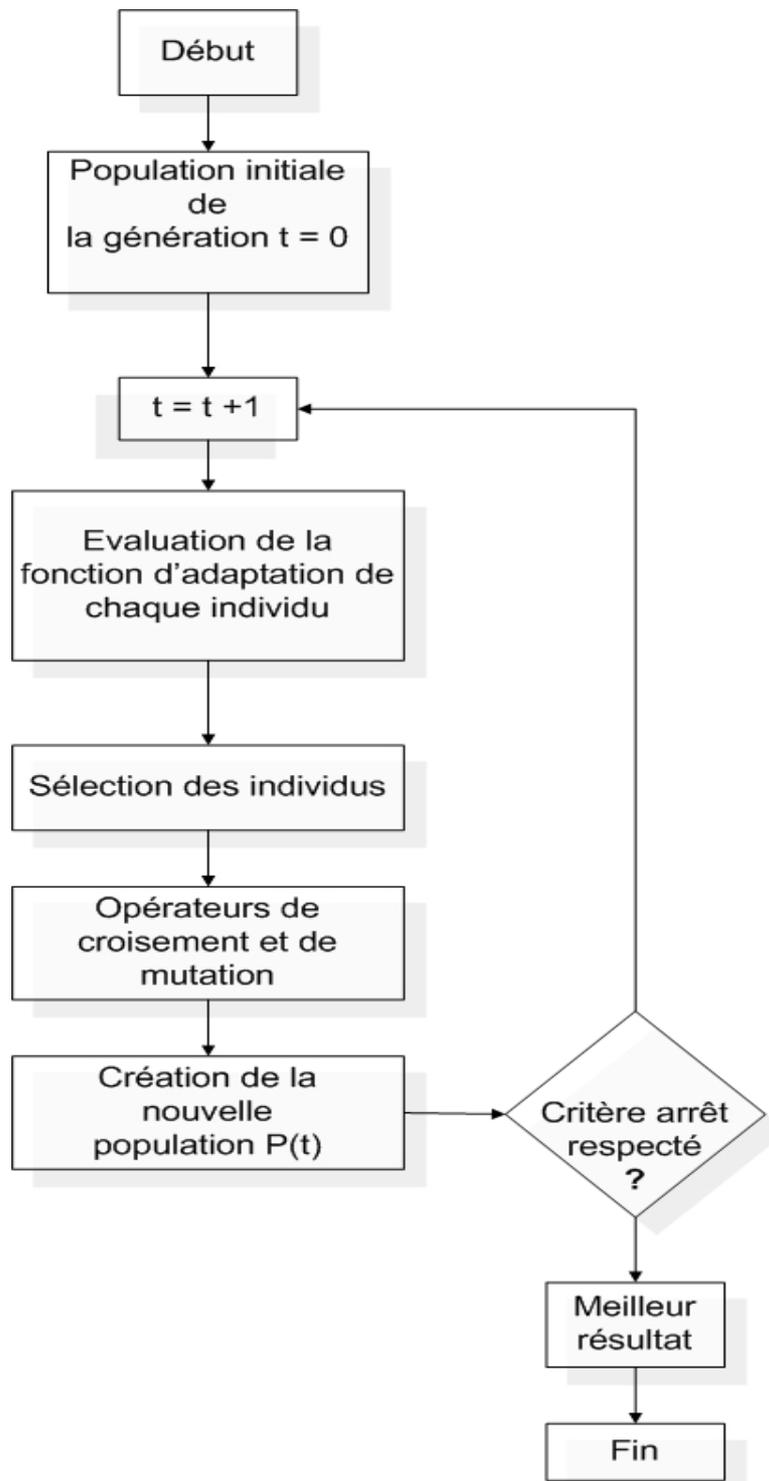
Classe	Type de vol	Séparation Assurée entre	Service assuré	Autorisation ATC obligatoire
A	IFR seulement	Tous aéronefs	ATC	OUI
B	IFR	Tous aéronefs	ATC	OUI
	VFR	Tous aéronefs	ATC	OUI
C	IFR	IFR et IFR IFR et VFR	ATC	OUI
	VFR	VFR et IFR	1) ATC pour la séparation des aéronefs IFR ; 2) Information de trafic VFR/VFR (et sur demande avis d'évitement de trafic)	OUI
D	IFR	IFR et IFR	ATC avec informations de trafic au sujet des vols VFR (et, sur demande, avis d'évitement de trafic)	OUI
	VFR	Sans objet	Information de trafic entre les vols VFR et IFR (et, sur demande, avis d'évitement de trafic)	OUI
E	IFR	IFR et IFR	ATC avec information de trafic au sujet des vols VFR dans la mesure du possible	OUI
	VFR	Sans objet	Information de trafic dans la mesure du possible	NON
F	IFR	IFR et IFR Autant que possible	Service consultatif de la circulation aérienne; service d'information de vol	NON
	VFR	Sans objet	Service d'information de vol	NON
G	IFR	Sans objet	Service d'information de vol	NON
	VFR	Sans objet	Service d'information de vol	NON

Annexe B

Le tableau suivant résume la classification des sept secteurs en Algérie :

Secteurs		classe	Limite Inférieur	Limite Supérieur
Centre Alger	Supérieur	A	FL245	FL 450
	Inférieur	D	450 mètre GND / MSL	FL245
Secteur Nord / Est		D	450 mètre GND / MSL	FL450
Secteur Nord / Ouest		D	450 mètre GND / MSL	FL450
Secteur Sud / Centre		F	GND / MSL	UNL
Secteur Sud / Est		F	GND / MSL	UNL
Secteur Sud / Ouest		F	GND / MSL	UNL
Secteur Sud / Sud		G	GND / MSL	UNL

Annexe C



Organigramme d'un Algorithme Génétique standard.