

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE BLIDA 1**  
**INSTITUT D'AERONAUTIQUE ET DES ETUDES**  
**SPATIALES**  
**DEPARTEMENT DE NAVIGATION AERIENNE**



**MEMOIRE DE FIN D' ETUDES**  
**EN VUE DE L' OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN**  
**AÉRONAUTIQUE**

**Option : Exploitation aérienne**

**Thème :**

**RESOLUTION DE CONFLIT AERIEN PAR**  
**LA METHODE DES ALGORITHMES**  
**GENETIQUES**

**Réalisé par :**  
Me<sup>lle</sup>. KELLIL Selma

**Promoteur :** Professeur BERGHEUL Said  
**Encadreur:** Mr.OTMANI Abouelkacem

**Promotion:2016**

# Sommaire

RESUME.....	3
ABSTRACT.....	4
REMERCIEMENT.....	6
LISTE DES FIGURES.....	7
LISTE DES TABLEAUX.....	10
INTRODUCTION GENERALE.....	11

## **CHAPITRE 1 : PRESENTATION ENVIRONNEMENT DE LA COMPAGNIE TASSILI AIRLINES**

1.1 Introduction.....	12
1.2 Présentation de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINES .....	12
1.3 La politique de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINE.....	13
1.3.1 Sécurité des vol.....	13
1.3.2 Sûreté aérienne.....	13
1.3.3 Qualité .....	13
1.3.4 HSE : Hygiène, santé, Environnement.....	14
1.3.5 IOSA.....	14
1.4 Stratégie de la compagnie.....	14
1.4 Les services fournis par TASSILI AIRLINES.....	14
1.5 Vols charters pétroliers.....	14
1.5.2 Vols à la demande publique.....	14
1.5.3 Vols réguliers domestiques.....	15
1.5.4 Vols internationaux.....	15
1.6 La flotte de Tassili Airlines.....	15

## **CHAPITRE 2 : GENERALITE SUR L'ESPACE AERIEN**

2.1 Introduction.....	16
2.2 Définitions.....	16
2.3 Gestion des courants de trafic aériens.....	20
2.4 Le problème de résolution de conflits.....	21
2.5 La conception actuelle.....	22

2.6 La gestion de l'espace aérien.....	24
2.7 Divisions de l'espace aérien.....	24
2.8 Les classes d'espace aérien.....	26

**CHAPITRE 3 : LES METHODES UTILISEE POUR LA RESOLUTION DES  
CONFLITS AERIENS**

3.1 Introduction.....	31
3.2 Les deux principes de résolution d'un conflit.....	32
3.2.1 L'évitement par l'offset.....	33
3.2.2 L'évitement par point tournant.....	33
3.3 Modélisation de trajectoire.....	33
3.3.1 Trajectoire linéaire par morceaux.....	37
3.3.2 Modélisation du problème sous la forme d'un problème d'optimisation.....	37
3.3.3 Formulation semi-infinie.....	39
3.3.4 La fonction objectif.....	39
3.3.5 Les contraintes.....	40
3.4 Analyse biographique des approches du problème de résolution de conflits.....	40
3.4.1 Approches opérationnelles.....	45
3.4.2 Approches théorique.....	49
3.5 Les méthodes et les techniques de résolution de conflits aériens.....	49
3.5.1 Méthode des intervalles.....	51
3.5.2 Les algorithmes A*.....	51
3.5.3 Les algorithmes génétiques .....	

**CHAPITRE 4: LES ALGORITHMES GENETIQUES**

4.1 Introduction.....	53
4.2 Les cinqs éléments de l'algorithme génétique.....	53
4.3 Description détaillée.....	55
4.3.1 Codage des données.....	55
4.3.2 Génération aléatoire de la population initiale.....	56
4.3.3 Gestion des contraintes .....	56
4.3.4 Opérateur de croisement .....	56
4.3.5 Opérateur de mutation.....	59

4.3.6 Opérateur de sélection.....	60
4.4 Étude d'application de l'algorithme génétique.....	61

## **CHAPITRE 5 : REALISATION DE PROGRAMME DE CONFLIT AERIEN**

5.1 Introduction.....	67
5.2 Présentation d'environnement de développement de l'application.....	67
5.3 Organigramme de l'algorithme génétique appliqué .....	69
5.4 Explication de déroulement de programme.....	70
5.4.1 Initialisation des paramètres de l'algorithme génétique.....	70
5.4.2 Génération de points de départ et d'arrivée des avions.....	71
5.4.3 Création de la population initiale .....	72
5.4.4 La fonction d'évaluation (fitness).....	72
5.4.5 Fonction de croisement et mutation.....	74
5.5 Discussion de différents cas de conflit.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	85
BIBLIOGRAPHIE.....	86











## **Résumé**

L'augmentation du trafic aérien génère des problèmes d'optimisation très complexes pour le contrôle aérien. Le problème d'optimisation de trajectoires pour la résolution de conflits en route reste aujourd'hui ouvert. Dans ce mémoire l'approche initiale est d'étudier le problème de conflit comme un problème de commande optimal avec contraintes en utilisant les algorithmes génétiques.

Pour cela, un code de calcul est élaboré et utilisé pour la résolution du conflit aérien en utilisant les algorithmes génétiques.

## **Abstract**

The increase in air traffic generates very complex optimization problems to air traffic control. The trajectory optimization problem to solve conflicts in road remains open today. In this specification the initial approach is to study the problem of conflict as an optimal control problem with constraints using genetic algorithms.

For this, a computer code is developed, which is used for solving the conflict air using genetic algorithms.

الزيادة في حركة النقل الجوي ولد مشاكل معقدة للغاية لـ الجوية. في تحديد  
لا تزال مفتوحة اليوم. في هذه خطر التصادم بصفته  
و ذلك بوجود معيقات باستخدام الخوارزميات الجينية.  
لهذا، وضع برنامج لحل هذا المشكل باستخدام الخوارزميات الجينية.

## Remerciment

Je remercie tout d'abord ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée la foi, la volonté et le courage afin d'arriver à faire ce modeste travail, sans oublier mes très chers parents.

Je tiens à remercier mon promoteur Mr Bergheul, Professeur a l'institut d'aéronautique et les études spatiales à l'université de Blidaqui a accepté d'être mon directeur de mémoire ainsi pour ses orientations préssieuses.

J'exprime mon gratitude à Mr OTMANI Belkacem, Magistère en Aéronautique et cadre à TASSILI AIRLINES pour le temps, les conseils éclairés et l'attention soutenu qu'il a consacré au bon déroulement de ce travail encadré et dirigé et m'aider et veiller sur mon projet de fin d'étude.

J'exprime mes vifs remerciements, à Mr Smain MEGEULATI, Docteur d'état au l'institut d'aéronautique et les études spatiales à l'université de Blida -1-, pour ces conseils éclairés et sa large expérience scientifique qui ont permis l'aboutissement de ce travail, ainsi que sa disponibilité totale pour m'avoir aidé à la réalisation de cet mémoire.

Mes grands remerciements pour les membres de jury qui m'ont honoré d'avoir accepté et consacré de leur temps pour examiner mon travail.

Je remercie tous mes amies proches (Nesrine Balabbes, Meriem Kahal, Khadija Karmous, Mouna Maghbi, Sonia Gaci, Nesrine Amara, Fadila Alouane).

Je remercie aussi tous les membres de ma famille, notamment mes parents qui m'ont soutenu tout au long de ces longues années, je ne serais dire si j'aurai pu finir un jour mes études sans leur aide précieuse et leur soutien moral. Merci pour toutes vos leçons de la vie qui me servent aujourd'hui de repères ; je n'oubli aussi mes soueurs ;Madiha et ses anfans Taha abd elsamad et Oumaima et ma petite sœur Sihem, aussi mes frères Samir,abd elrahmen et Hafed.

Enfin, je remerci tous ceux ou celles qui m'ont donné leur soutien et leur amitié tout au long de ce travail ; qu'ils touvent ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1-Avion de TASSILI Airlines.....	12
Figure 2-1-Zone de sécurité d'un avion .....	22
Figure 2-2-Subdivision de l'espace aérien.....	25
Figure 2-3-Les classes d'espace aérien.....	26
Figure 2-4-Les minimums VMC de visibilité et de distance par rapport aux nuages.....	28
Figure 3-1-Méthode d'évitement par offset.....	33
Figure 3-2-Méthode d'évitement par point tournant.....	33
Figure 3-3-Modélisation de trajectoire linéaire par morceaux avec point tournant.....	34
Figure 3-4-Modélisation de trajectoire linéaire par morceaux.....	35
Figure 3-5-Force répulsive et force glissante, forces de glissement coordonnées.....	46
Figure 3-6-Structure du réseau de neurones.....	47
Figure 3-7-Données en entrée.....	48
Figure 4-1-Principe général des algorithmes génétiques.....	54
Figure 4-2-Croisement à 1 point.....	57
Figure 4-3-Croisement à 2 points.....	58
Figure 4-4-Croisement barycentrique.....	59
Figure 4-5-Principe de l'opérateur de mutation.....	60
Figure 4-6-Encodage d'un chromosome pour une situation à N = 6 avions.....	62
Figure 4-7-Trajectoires correspondant aux parents (en haut) et aux enfants issus d'un croisement barycentrique (en bas).....	65
Figure 4-8-Trajectoires correspondant à un chromosome avant et après mutation (déplacement du point de contrôle d'une des trajectoires).....	66
Figure 5-1 Matlab 2015 utilisé pour le développement de programme.....	67
Figure 5-2-Exemple de génération de point de départ et d'arrivée d'avions.....	71
Figure 5-3-Exemple de simulation de création de population de 52 individus sur MATLAB	72
Figure 5-4-Les valeurs résultant de l'évaluation des individus.....	73
Figure 5-5-L'évolution de la meilleure fitness des générations successives.....	73
Figure 5-6-Trajectoires des deux avions Cas $\alpha_1=0^\circ$ et $\alpha_2=90^\circ$ .....	75
Figure 5-7-La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de $\alpha_1=0^\circ$ et $\alpha_2=90^\circ$ .....	76
Figure 5-8-Variation de la distance entre avions en fonction du temps cas	

de $1=0^\circ$ et $2=90^\circ$ .....	76
Figure 5-9-Trajectoires des deux avions Cas $1=90^\circ$ et $2=90^\circ$ .....	77
Figure 5-10-La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de $1=90^\circ$ et $2=90^\circ$ .....	78
Figure5-11-Variation de la distance entre avions en fonction du temps cas de $1=90^\circ$ et $2=90^\circ$ .....	78
Figure5-12-Trajectoires des deux avions Cas $1=30^\circ$ , $2=45^\circ$ .....	79
Figure5-13-La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de $1=30^\circ$ et $2=45^\circ$ .....	80
Figure5-14-Variation de la distance entre avions en fonction du temps cas de $1=90^\circ$ et $2=90^\circ$ .....	80
Figure5-15 -Trajectoires des deux avions Cas $1=90^\circ$ , $2=270^\circ$ .....	81
Figure 5-16-La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de $1=90^\circ$ et $2=270^\circ$ .....	82
Figure5-17-Variation de la distance entre avions en fonction du temps cas de $1=90^\circ$ et $2=270^\circ$ .....	82
Figure5-18-Trajectoires des deux avions Cas $1=90^\circ$ et $2=300^\circ$ .....	83
Figure5-19-La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de $1=90^\circ$ et $2=300^\circ$ .....	84
Figure5-20-Variation de la distance entre avions en fonction du temps cas de $1=90^\circ$ et $2=300^\circ$ .....	84







## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5-1: Individus N°1 de la population .....	72
Tableau 5-2: Individus N°2 de la population.....	72
Tableau 5-3: Données initiales des deux avions du premier cas.....	75
Tableau 5-4: Données initiales des deux avions du deuxième cas.....	77
Tableau 5-5: Données initiales des deux avions du troisième cas.....	79
Tableau 5-6: Données initiales des deux avions du quatrième cas.....	81
Tableau 5-7: Données initiales des deux avions du cinquième cas.....	83

## INTRODUCTION GENERALE

L'organisation du trafic aérien et de son contrôle doit reprendre à un double objectif de sécurité et d'efficacité. Concernant la sécurité, un rôle important du contrôle aérien est d'assurer la séparation des avions : on dit que deux avions sont séparés quand la distance entre eux est suffisante pour exclure tout risque de collision. Si ce n'est pas le cas, on dit qu'ils sont en conflit.

Un système d'évitement automatique devra proposer aux avions impliqués dans les conflits des trajectoires d'évitement. C'est cette génération de trajectoires sans conflit qui l'objectif des méthodes d'intelligence artificielle présentées ici (Chapitre3) et c'est le but de mon travail.

L'automatisation ou la délégation à bord, du contrôle aérien dans les zones où les avions auraient la liberté de choisir leurs routes, offre une alternative qui pourrait permettre de tirer vraiment les bénéfices de ces évolutions du trafic.

L'évolution des moyens techniques disponibles permet d'envisager des modifications profondes du contrôle aérien, à travers son automatisation et l'utilisation éventuelle des systèmes embarqués, grâce auxquels chaque avion serait responsable de la route qu'il suit, et du fait qu'il reste séparé des autres avions. La position d'un avion peut être connue très précisément grâce au positionnement par satellite (GPS : Global Positioning System) la trajectoire prévue peut être suivie très fidèlement grâce au gestionnaire de vol (FMS : Flight Management System). Tous ces progrès importants qui ont été faits permettent d'envisager de nouveaux modes embarqués de surveillance de l'espace et de diffusion d'information de vol.

La méthode de génération de trajectoire d'évitement présentée dans le chapitre 5, utilise un algorithme génétique pour chercher le chemin de cout minimal.

Le but de ce travail est de proposer une méthode séquentielle de résolution automatique basée sur un ordre de priorité permet à chaque avion de définir la manœuvre optimale en termes de retard pour atteindre sa destination dans un conflit. La résolution proprement dite utilise un algorithme génétique pour optimiser la trajectoire d'un avion, celles des autres avions étant fixées comme contraintes.

# CHAPITRE 1 : PRESENTATION DE LA COMPAGNIE TASSILI AIRLINES

## 1.1 Introduction

L'élaboration et la mise en pratique de notre travail s'est réalisé au niveau de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINES, dans le présent chapitre nous allons procéder à une présentation de cette compagnie, sa politique ainsi que ces services.

## 1.2 Présentation de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINES

Tassili Airlines est une compagnie aérienne Algérienne filiale de la compagnie pétrolière Sonatrach. Elle assure des vols réguliers domestiques et des vols charters comme le transport des ouvriers vers les gisements de pétrole et de gaz du Sahara algérien. Son hub principal est l'aéroport d'Alger.



**Figure 1-1 :** Avion de TASSILI Airlines

Tassili Airlines a été créée le 30 mars 1998, à l'origine il s'agissait d'une alliance entre le groupe pétrolier algérien Sonatrach (51% du capital social) et la compagnie aérienne Air Algérie (49% du capital social). Sa mission principale était de réaliser des services aériens pour le compte de sociétés pétrolières et parapétrolières en Algérie.

En avril 2005, le groupe Sonatrach a racheté les parts que détenait Air Algérie pour en faire une filiale à part entière, pour arriver à la création d'une société de transport aérien

pour la prise en charge de la relève pétrolière et parapétrolière dans les meilleures conditions de sécurité, ponctualité, qualité, flexibilité et confort.

L'ouverture du marché Algérien concernant les hydrocarbures aux entreprises multinationales et les investissements du groupe pétrolier algérien Sonatrach à l'étranger a suscité l'intérêt de la compagnie TASSILI AIRLINES à développer ses activités aériennes à l'échelle internationale.

### **1.3 La politique de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINES**

La politique de la compagnie aérienne TASSILI AIRLINES est axée sur les engagements suivants :

#### **1.3.1 Sécurité des vols**

La mise en œuvre d'un Système de Gestion de la Sécurité (SGS) comme prescrit par l'OACI :

- Création de la structure chargée du suivi, de l'analyse et de la sécurité des vols (Flight Safety Bureau / FSB) ;
- Mise en place d'un Comité de Sécurité des Vols pour l'identification des dangers et la gestion des risques ;
- Mise en place d'une Cellule de Traitement des Incidents et prise en considération du retour d'expérience ;
- Mise en place d'un plan d'urgence qui décrit et précise les tâches, responsabilités et actions à entreprendre face aux conséquences d'un accident.

#### **1.3.2 Sûreté aérienne**

Le Programme de sûreté aérienne est compris dans l'Annexe 17 de l'OACI 2013 et concerne la protection des personnes et des biens contre tout acte d'intervention illicite par la création de la structure chargée de la Sûreté Aérienne et l'élaboration du programme de sûreté de la Compagnie.

#### **1.3.3 Qualité**

Est assurée par l'implémentation du Système de Gestion Qualité (QMS) tels qu'il est décrit par la réglementation nationale et internationale s'observant par le programme d'Audit Qualité 2011 approuvé et en cours d'exécution en sensibilisant le personnel de

TASSILI AIRLINES en matière de Qualité et de Facteur Humain et par la surveillance permanente de l'application des procédures réglementaires ainsi que le principe d'amélioration.

### **1.3.4 HSE : Hygiène, santé, Environnement**

La mise en place de la politique du groupe SONATRACH dans les secteurs d'hygiène, santé, sécurité et environnement avec la maîtrise des risques professionnels en entreprise et l'obtention des certifications ISO 14001 et OHSAS 18001 par la coordination des travaux..

### **1.3.5 IOSA**

TASSILI AIRLINES contribue à rehausser son niveau de sécurité de ses activités par son inscription dans le programme IOSA (IATA Operational Safety Audit).

## **1.4 Stratégie de la compagnie**

La compagnie a concentrée ses efforts sur le développement dans tous les domaines surtout:

- La modernisation de son organisation ;
- La conformité des pratiques et des procédures ;
- Le renforcement de ses moyens matériels et humains.
- Etablissement d'un programme pour l'activité commerciale en vue du développement du marché pétrolier ainsi que celui du grand public menant à l'augmentation des parts de marché de TASSILI AIRLINES.

## **1.5 Les services fournis par TASSILI AIRLINES**

### **1.5.1 Vols charters pétroliers**

Les vols charters pétroliers ont pour intérêt de faciliter les voyages professionnels. C'est la vocation première de Tassili Airlines qui collabore avec les sociétés pétrolières, para pétrolières et toutes celles du secteur de l'énergie et des mines, en mettant à leur disposition des vols charters dédiés à leurs besoins spécifique.

### **1.5.2 Vols à la demande publique**

Vous désirez avoir de la flexibilité dans vos voyages pour vos déplacements, professionnels ou personnels, vous pouvez louer un aéronef (au choix, avion ou hélicoptère)

suivant plusieurs formules à votre convenance : un vol, une série de vols ou une mise à disposition permanente.

### **1.5.3 Vols réguliers domestiques**

Tassili Airlines possède un réseau de lignes régulières publiques, exploitées en avion Boeing 737-800 de 155 sièges, Bombardier Q400 de 74 sièges et Bombardier Q200 de 37 sièges.

### **1.5.4 Vols internationaux**

A partir de juin 2013 TASSILI AIRLINES à effectuer des vols internationaux vers Rome, Saint-Etienne, Grenoble, Lyon, Strasbourg, Marseille.

## **1.6 La flotte de Tassili Airlines**

La flotte de Tassili Airlines se compose de trente et un aéronef de divers types qui lui permettent de répondre de façon adaptée à la demande de marché aérien en Algérie, cette flotte est composée comme suit :

- ✓ 4 Boeing 737-800 SFP (8ZQ) : 7T-VCA, 7T-VCB, 7T-VCC, 7T-VCD ;
- ✓ 4 Dash8-Q400 (DH8D) : 7T-VCM, 7T-VCN, 7T-VCO, 7T-VCL ;
- ✓ 4 Dash8-Q200 (DH8B) : 7T-VCR, 7T-VCP, 7T-VCQ, 7T-VCS.

## CHAPITRE 2 : GENERALITE SUR L'ESPACE AERIEN

### 2.1 Introduction

Avant toute chose, précisions dans ce chapitre pour les lectures non familiers du monde de la navigation aérienne quelques notions utiles à la compréhension du reste de ce document.

On distingue deux types de contrôle aérien : le contrôle d'approche et le contrôle en route, correspondant à différentes étapes du vol d'un avion. Le contrôle d'approche s'applique dans les zones entourant les aéroports d'arrivée et de départ. Le contrôle en route s'applique entre ces zones. Tant qu'un avion est dans la zone entourant son aéroport de départ, et une fois qu'il a atteint celle qui entoure son aéroport de destination, il suit des cheminements bien déterminés et il est contrôlé, depuis le sol, par des contrôleurs. La densité du trafic autour des aéroports rend nécessaire le contrôle, pour assurer la sécurité des avions. Le fait que les avions suivent des cheminements prédéfinis facilite la tâche des contrôleurs.

La circulation aérienne en-route est organisée selon des itinéraires prédéterminés (on parle aussi parfois de « couloirs aériens »), jalonnés de points de report obligatoires et des balises radioélectriques. Le trafic étant moins dense qu'autour des aéroports.

L'espace aérien civil est découpé en secteurs, placés chacun sous la responsabilité d'une unité de contrôle d'espace. Il s'agit d'une équipe de deux contrôleurs chargée de régler les conflits de trajectoire entre les avions qui suivent des routes traversant le secteur, ou le groupe de secteurs, à sa charge.

### 2.2 Définitions

Le problème de la génération des trajectoires sans conflit met en jeu un certain nombre de termes dont il est utile de préciser le sens [1-2,13] :

**Définition 2.1 :- Plan de vol** - il contient tous les éléments indicatifs décrivant le vol prévu pour un avion. Ces informations sont déposées avant le départ auprès des services ATC avec, notamment les informations fondamentales suivantes :

- L'heure de départ ;

- Le niveau de vol demandé pour la phase de croisière ;
- La route prévue qui est décrite par une série de balises.

**Définition 2.2 :- La prévision de trajectoire** - Pour la plupart des projets d'automatisation, pour résoudre les conflits, commencer par les détecter, et pour les détecter il faut savoir prévoir la trajectoire des avions. Cette opération, sous-jacente à presque tous les modèles automatisés, est source redoutable des problèmes, dont certains sont bien dissimulés. Il faut d'abord comprendre que, si la prévision de trajectoire était parfaite, il serait possible de calculer la trajectoire d'un avion depuis son point de départ jusqu'à sa destination et de résoudre alors tous les problèmes susceptibles de se poser dès le début. Il n'en est hélas pas ainsi. Prévoir la trajectoire d'un avion de façon précise est une opération extrêmement complexe en raison d'un grand nombre de facteurs non connus (consignes compagnie, masse, etc.) ou même impossibles à connaître avec précision (conditions météorologiques par exemple). La prévision de trajectoire se fait donc généralement sur un horizon temporel limité, et en admettant certaines incertitudes sur les paramètres du vol. Les délais temporels d'anticipation des trajectoires se situent dans une fourchette de 10 à 30 minutes, à l'exception des systèmes dits « réactifs » qui utilisent une anticipation de l'ordre de 5 à 10 minutes.

**Définition 2.3 :- Séparations** - Une distance horizontale, qui est exprimée en milles nautiques (Nm), appelée norme de séparation horizontale, et une distance verticale, exprimée en pieds (ft), appelée norme de séparation verticale, sont définies. On dit que deux avions sont séparés quand la distance entre leurs projections sur un plan horizontal est supérieure à la norme de séparation horizontale ou quand la différence entre leurs altitudes est supérieure à la norme de séparation verticale.

Les valeurs de ces normes de séparation varient selon la classe de la zone de l'espace aérien dans laquelle on se place. Dans la méthode présentée dans ce travail, nous n'utiliserons que la norme de séparation horizontale, puisque nous supposerons que les avions volent dans un plan horizontal. Dans le cas du trafic en route cette norme dépend de plusieurs facteurs, mais est souvent proche de 5 milles nautiques.

**Définition 2.4:- Conflit élémentaire** - On dit que deux avions sont en conflit dès qu'ils sont plus séparés (Définition 2.3). Pour une durée  $t_f$  fixée, on dira que deux avions sont en conflit potentiel si la probabilité qu'un conflit ait lieu entre eux à l'intérieur de cette durée est non nulle. La résolution de conflit consiste à modifier les trajectoires des avions de manière à supprimer tout conflit potentiel entre eux.



**Définition 2.5 :- Cluster** - Un cluster est la fermeture transitive d'avions en conflit potentiel. Si un conflit potentiel (pour une durée temporel  $t_f$  donnée) existe entre un avion  $a_1$  et avion  $a_2$ , et que cet avion  $a_2$  est lui-même impliqué dans des conflits potentiels avec les avions  $a_3$  et  $a_4$ , alors les avions  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  et  $a_4$  forment un cluster. Dans toute la suite, pour plus de simplicité, on appellera conflit à  $n$  avions un cluster. Dans toute la suite, pour plus de simplicité, on appellera conflit à  $n$  avions un cluster contenant  $n$  avions.

Toute tentative de résolution de conflit (automatiquement ou non) doit tenir compte de cette notion de cluster. En effet, en reprenant l'exemple donné dans définition 2.5, la résolution séparée du conflit entre  $a_1$  et  $a_2$  serait inutile puisque la résolution du conflit entre  $a_2$  et  $a_3$ , en modifiant la trajectoire de l'avion  $a_2$  risquerait de faire apparaître de nouveau un conflit entre  $a_1$  et  $a_2$ .

La méthode présentée ici a pour but d'assurer une telle résolution de conflits, c'est-à-dire de fournir des trajectoires sans conflit à des avions impliqués dans des conflits potentiels. Dans le cadre d'une application au trafic réel de telle méthode.

**Définition 2.6 :- Routes directes** - La route directe d'un avion est le chemin le plus court, ou le plus avantageux pour l'avion (compte tenu des vents, par exemple) entre le point de sortie de la zone qui entoure l'aéroport de départ et le point d'entrée de celle qui entoure l'aéroport d'arrivée.

On envisage, dans le cadre des évolutions de l'organisation du trafic aérien de laisser les avions libre de choisir leur route dans certaine zones de l'espace aérien (celle ou le trafic est moins dense). Ces routes choisies par les avions sont appelées free routes<sup>1</sup>. Les avions pourront alors, s'ils souhaitent (c'est-à-dire si les compagnies aériennes le souhaitent), emprunter des routes directes.

La sectorisation de l'espace aérien, une fois les couloirs aériens fixés, est un problème difficile et intéressant. En effet, de nombreuses contraintes existent : la charge de travail correspondant à chaque secteur doit rester raisonnable pour que la sécurité soit assurée, la géométrie des secteurs se celle des couloirs aériens doit tenir compte des besoins de coordination entre contrôleurs au moment du passage d'un avion d'un réseau à l'autre. L'optimisation de l'utilisation des couloirs aériens, c'est-à-dire le choix a priori de route

---

<sup>1</sup> Il semble malheureusement qu'aucun terme français correspondant ne se soit imposé

suivant différents couloirs aériens entre un aéroport de départ et un aéroport de destination, peut être utilisée, pour réduire la congestion de l'espace aérien.

C'est souvent aux environs des balises, points de passage obligés de nombreux avions, qu'apparaissent les conflits.

**Définition 2.7 :- système d'évitement automatique** - On appellera système d'évitement automatique tout système visant à autoriser la résolution de conflit, que cette automatisation soit partielle (considérée comme une aide aux contrôleurs) ou totale.

Les définitions qui suivent correspondent à différentes approches de l'évitement aérien. Les différences entre ces approches sont réelles et généralement distinguées. Cependant les termes qui les désignent ne sont pas figés. On pourra trouver ailleurs les termes que nous employons ici (évitement centralisé, embarqué, distribué) utilisés pour désigner des notions différentes, où les notions que nous désignons par ces termes sont désignées par d'autres termes. Les définitions que nous donnons ici précisent le sens qui devra être donné à ces termes dans la suite de ce mémoire.

**Définition 2.8 :- système d'évitement centralisé** - On dira qu'un système d'évitement est centralisé, ou supervisé, quand les trajectoires sans conflits de tous les avions d'une zone donnée de l'espace aérien sont générées par une entité unique (que cette génération soit automatisée, ou assurée par un centre de contrôle). Ces trajectoires sans conflit sont alors imposées aux avions.

**Définition 2.9 :- système d'évitement embarqué** - On dira qu'un système d'évitement embarqué (ou éventuellement distribué) lorsque la trajectoire d'évitement de chaque avion générée individuellement (dans le cadre d'une application d'une telle méthode, elle serait la plus souvent générée à bord de l'avion lui-même, d'où le terme embarqué). On parle d'évitement réactif quand les actions d'évitement sont le résultat d'une commande continue, ou de commandes successives mais très rapprochées dans le temps.

**Définition 2.10 :- Intervalles de manœuvres** - Dans le cadre de l'évitement par point tournant (voir section 3.2), On appelle intervalle de manœuvres d'un avion les intervalles  $T_0$  et  $T_1$  (voir section 3.).

**Définition 2.11 :- Approche globale** - Cette méthode génère, pour un conflit impliquant  $n$  avions, les trajectoires simultanément, en minimisant le retard entraîné par les

déviations dues à l'évitement. Elle correspond à l'approche centralisée d'un système d'évitement.

**Définition 2.12 :- Approche séquentielle** - Elle consiste à générer successivement les  $n$  trajectoires des avions, selon un ordre de priorité, les  $(i-1)$  trajectoires déjà générées imposant des contraintes pour la génération de la trajectoire de l' $i$ -ème avion. Cette approche peut être utilisée dans une forme séquentielle d'un système d'évitement embarqué.

## 2.3 Gestion des courants de trafic aériens

Gestion des courants de trafic Aériens ou Air traffic flow management est un processus qui permet d'apporter les meilleures solutions aux services de la circulation aérienne quand la demande est supérieure à la capacité disponible.

Des procédures et des plans sont établis à l'avance, pour maintenir un haut niveau de sécurité dans la gestion du trafic, et rechercher l'équilibre entre la capacité des services ATC et la demande de trafic, tenant compte des besoins des utilisateurs de l'espace aérien et favorisant d'abord des solutions qui optimise la capacité [3-4].

### 2.3.1 Les objectifs de L'ATFM

- 1-Améliorer la sécurité du système ATM<sup>2</sup> en minimisant les pointes de trafic ;
- 2-Assurer un écoulement optimal du trafic aérien durant toutes les phases de l'opération d'un vol en équilibrant la demande et la capacité ;
- 3-Adapter le flux de trafic à la capacité en prévenant les surcharges et en lissant l'écoulement du trafic ;
- 4-Garantir la sécurité des vols ;
- 5-Limiter les contraintes sur le trafic ;
- 6-Limiter les retards.

Il est à noter que l'organe de régulation rend donc un double service vis-à-vis d'acteurs différents du trafic aérien:

---

<sup>2</sup> Air traffic contrôle

Le lissage de l'écoulement du trafic est essentiellement un service envers le contrôle aérien puisqu'il s'agit en fait de lisser la charge de travail des contrôleurs aériens pour leur permettre d'assurer au mieux la sécurité des vols.

La limitation des contraintes et retards est un service envers les AO<sup>3</sup> pour leur faciliter la planification des vols, minimiser les surcoûts d'exploitation (allongement des trajectoires, gaspillage des ressources à cause des retards, etc. ...).

### **2.3.2 Principe de l'ATFM**

La capacité ATC d'un centre de contrôle en route (ACC)<sup>4</sup> est définie comme le nombre d'unités de contrôle simultanément ouvertes. La capacité ATC<sup>5</sup> d'un secteur de contrôle est définie comme le nombre maximal d'aéronefs par heure permettant un écoulement sûr et ordonné du trafic dans ce secteur. L'ATFM<sup>6</sup> est donc le service destiné à contribuer à la sécurité et l'écoulement sûr et rapide de la circulation aérienne en faisant en sorte que la capacité ATC soit utilisée au maximum et que le volume de trafic soit compatible avec les capacités déclarées par l'autorité ATS<sup>7</sup> compétente. Si la demande excède la capacité, les courants de trafic sont dirigés de manière à ce que cette capacité ne soit pas dépassée. Comme il est difficile et peu économique d'arrêter un avion en l'air, on préfère le faire attendre au sol jusqu'à ce que les secteurs se trouvant sur son plan de vol offrent à nouveau une capacité suffisante. On met donc en place une régulation du trafic par le biais de créneaux au départ des aéroports concernés à la suite d'un dialogue entre les usagers (AO) et les organes de régulation (FMP<sup>8</sup>, CFMU<sup>9</sup>).

D'autres solutions peuvent également être utilisées, comme le changement de route ou d'altitude d'un certain nombre de vols.

## **2.4 Le problème de résolution de conflits**

Pour assurer la sécurité des avions durant leurs vols, il est nécessaire de contrôler en temps réel leurs agissements. C'est le rôle du contrôle du trafic aérien (que nous appellerons par la suite ATC), qui fait partie intégrante de l'ATFM. La notion de conflit est essentielle dans l'ATC. Pour des raisons de sécurité, une zone de sécurité est définie autour de chaque avion. Cette zone est tridimensionnelle et répond non seulement à l'évitement de collision

---

<sup>3</sup> Aircraft operator

<sup>4</sup> Centre de contrôle en route

<sup>5</sup> Air traffic contrôle

<sup>6</sup> Air traffic flow managment

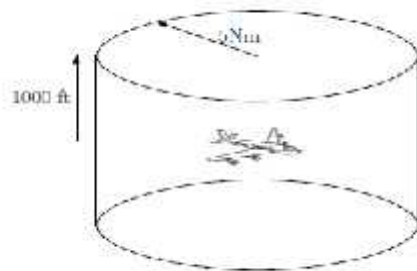
<sup>7</sup> Air traffic service

<sup>8</sup> Flow management position

<sup>9</sup> Central Flow Management Unit

mais également aux espacements nécessaires pour éviter les turbulences créées par les avions environnants.

La norme de séparation standard horizontale entre deux avions est de 5Nm. La norme de séparation standard verticale, quant à elle, est fixée à 1000ft. Ces distances de séparation définissent ainsi une zone de sécurité autour des avions comme illustré dans la figure-2-1.



**Figure 2-1** :Zone de sécurité d'un avion

Lorsqu'un avion pénètre dans la zone de sécurité d'un autre avion, ces deux avions sont dits en conflit. La notion de conflit traduit une violation des distances de séparation standard définie ci-dessus. La relation « est en conflit avec » définit une relation d'équivalence et chaque classe d'équivalence associée est appelée cluster de conflits.

La résolution de conflits, qui consiste à utiliser des manœuvres d'évitement pour assurer le respect des contraintes de séparation, est actuellement opérée par les contrôleurs aériens.

Cependant, du fait de l'augmentation du trafic, l'automatisation partielle ou totale de cette résolution est un problème très étudié pour fournir une aide à la décision au contrôleur. La résolution automatique de conflits devra donc assurer le respect des normes de séparation sur un horizon temporel choisi.

## **2.5 La conception actuelle**

L'objectif des organismes chargés de gérer la circulation aérienne est d'assurer la sûreté et l'efficacité de l'écoulement du trafic aérien. La gestion du trafic aérien est souvent décrite comme une imbrication de filtres dont le but est d'éviter la collision des avions circulant dans l'espace aérien :

### **2.5.1 Filtre Stratégique**

C'est le filtre le plus grossier. Son but n'est pas au sens strict d'éviter des conflits mais plutôt d'organiser le trafic de façons microscopique à moyen le long terme (supérieure à 6 mois) en termes de routes, secteurs, zones, etc. et de l'affectation des flux de trafic sur le réseau de routes en publiant par exemple les schémas d'évolution du trafic.

### **2.5.2 Filtre Pré-tactique**

Effectué un ou deux jours avant, il consiste à organiser une journée de trafic J, la veille (J-1) ou l'avant-veille (J-2). A ce moment on dispose de plus d'information sur les plans de vols, en fonction de trafic prévu et d'un schéma prévisionnel d'ouverture des secteurs aériens par les centres de contrôle.

### **2.5.3 Filtre tactique**

Le but de ce filtre est de protéger les contrôleurs de la surcharge de travail. Les compagnies déposent leurs demandes d'horaires de décollage de 1 à 3 heures avant le vol. L'ATFM tactique attribue des créneaux, en tenant compte de la quantité de trafic, de la capacité de contrôle, des autres créneaux de décollage, il s'agit plutôt de mesures d'ajustement qui prennent en compte des événements encore mal connus la veille. Ainsi, le trafic est mal connu à une journée avant le vol mais est bien connu entre 3 à 6 heures avant son arrivée.

### **2.5.4 Filtre ATC**

Le contrôle aérien est une action à terme, dont le but est d'éviter les conflits. C'est la phase clé consistant à un changement de cap d'un avion, un changement de niveau de vol, ou une modification de la vitesse. Ce processus est effectué tout au long de la période de trafic considéré, et doit donc être fait en temps réel. La visibilité du contrôleur est un peu supérieure puisqu'il dispose des plans de vol quelques minutes avant l'entrée de l'avion dans le secteur.

### **2.5.5 Filtre 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.

## 2.6 La gestion de l'espace aérien

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

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

## 2.7 Divisions de l'espace aérien

### 2.7.1 Espace aérien contrôlé

Espace aérien contrôlé situé au dessus d'une limite déterminée par rapport à la surface (200 m ou 700fts)/ MSL et qui comprend:

#### ) **La région de contrôle terminal TMA**

Située au carrefour des voies aériennes, Permet de protéger les trajectoires de départ et d'arrivée d'un aéroport.

#### ) **Les voies aériennes AWY**

Elles se présentent sous la forme de routes qui relient les TMA entre-elles, équipées d'aide à la navigation, la largeur des voies aériennes est fixée à 10NM.

#### ) **Les zones de contrôle CTR**

C'est un espace aérien contrôlé s'étendant verticalement à partir de la surface jusqu'à une limite supérieure spécifiée. Les limites latérales d'une zone de contrôle sont d'au moins 9,3 km (5 MN) à partir du centre de l'aéroport.

### 2.7.2 Espace aérien non contrôlé

Espace de trafic moindre, où l'intervention des services de la circulation aérienne est limitée à l'information et l'Alerte [21].

#### **1- Région Inférieure d'information de vol (FIR)**

Régions dans lesquelles les services d'information de vol et d'alerte sont assurés.

## 2- Région supérieure d'information de vol (UIR)

Englobe l'espace aérien situé à l'intérieur des limites latérales d'un certain nombre de FIR.

## 3- Zones à statut particulier

Ces zones sont beaucoup utilisées par les militaires pour protéger leurs évolutions, mais il en existe quelques-unes pour des besoins civils.

### 3-1-Zone Interdite P

Espace aérien de dimension définie, dans les limites duquel le vol des aéronefs est interdit.

### 3-2-Zone Réglementée R

Espace aérien de dimension définie à l'intérieur duquel les aéronefs en circulation aérienne générale sont subordonnés à des conditions spécifiées.

### 3-3-Zone Dangereuse D

Espace aérien de dimension définie à l'intérieur duquel se déroulent, pendant des périodes spécifiées, des activités qui peuvent être dangereuses pour les aéronefs.

La figure 2.2 représente la subdivision de l'espace aérien contrôlé.

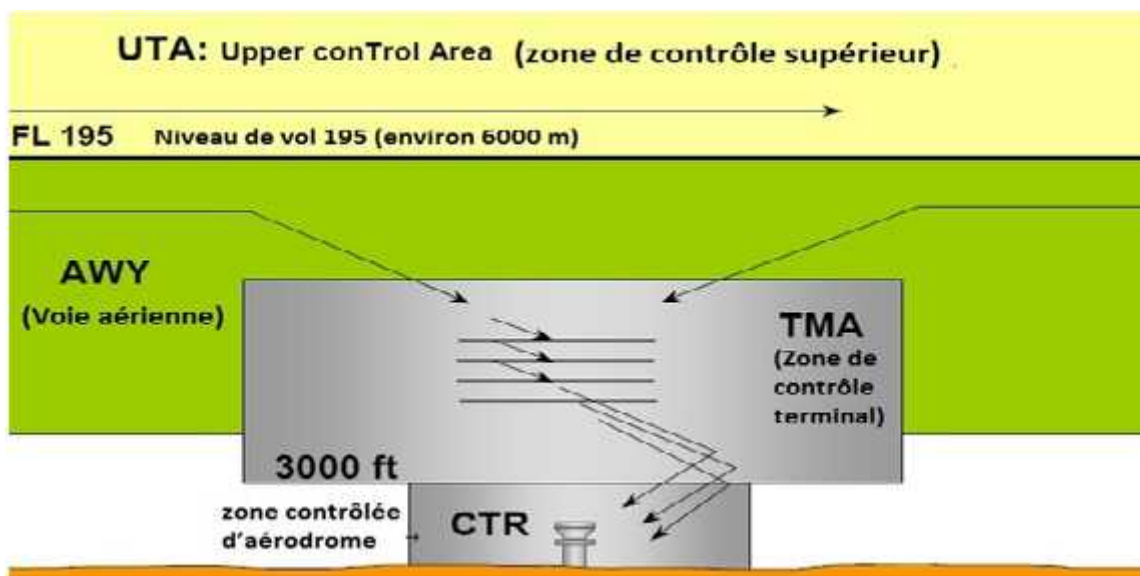


Figure-2- 2 :Subdivision de l'espace aérien contrôlé



## 2.8 Les classes d'espace aérien (contrôlé/non contrôlé)

Une Classe d'espace aérien est un espace aérien de dimension définie, désignée par une lettre de l'alphabet à l'intérieur duquel des types précis de vol sont autorisés et pour lesquels il est spécifié des services de la circulation aérienne et des règles d'exploitation.

La figure 2.3 représente les différentes classes de l'espace aérien.

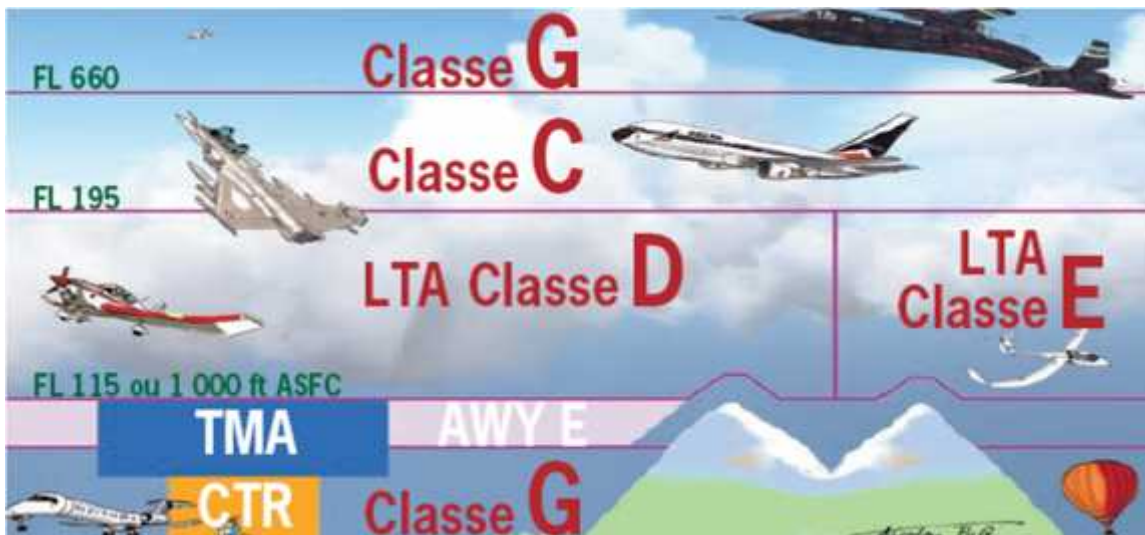


Figure-2-3 :Les Classes d'espace aérien

### ➤ Espace aérien contrôlé

#### -Classe A :

Services rendus

- séparation entre IFRs ;
- Service d'Information de vol;
- Service d'Alerte.

- Le vol VFR est interdit en classe A sauf dérogation expresse accordée par l'autorité compétente.

#### -Classe B :

Services rendus

- separation entre IFR ;
- séparation entre IFR et VFR ;
- séparation entre VFR ;
- Service d'Information de vol ;

- Service d'Alerte.

- Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires.

### **-Classe C**

Services rendus

- séparation entre IFR ;
- séparation entre IFR et VFR ;
- Information de trafic entre VFR ;
- Service d'Information de vol ;
- Service d'Alerte.

- Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires.

### **-Classe D**

Services rendus

- séparation entre IFR ;
- séparation entre IFR et VFR spécial ou VFR de nuit ;
- Information de trafic entre IFR et VFR ;
- Information de trafic entre VFR ;
- Service d'Information de vol ;
- Service d'Alerte.

-Le contact radio et la délivrance d'une clairance pour entrer dans l'espace sont obligatoires.

### **-Classe E**

Services rendus

- séparation entre IFR ;
- séparation entre IFR et VFR de nuit ;
- Information de trafic entre VFR ;
- Information de trafic entre VFR de nuit ;
- Service d'Information de vol ;
- Service d'Alerte.

❖ Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont :

- ) Distance par rapport aux nuages : 1500 mètres horizontalement et 300 mètres (1000 ft) verticalement ;

)] Visibilité 8 km au-dessus du FL 100 et 5 km au-dessous du FL 100.

La figure 2-4 représente les minimums conditions météorologiques de vol (la visibilité horizontale et la distance par rapport aux nuages) pour l'espace aérien contrôlé et non contrôlé.

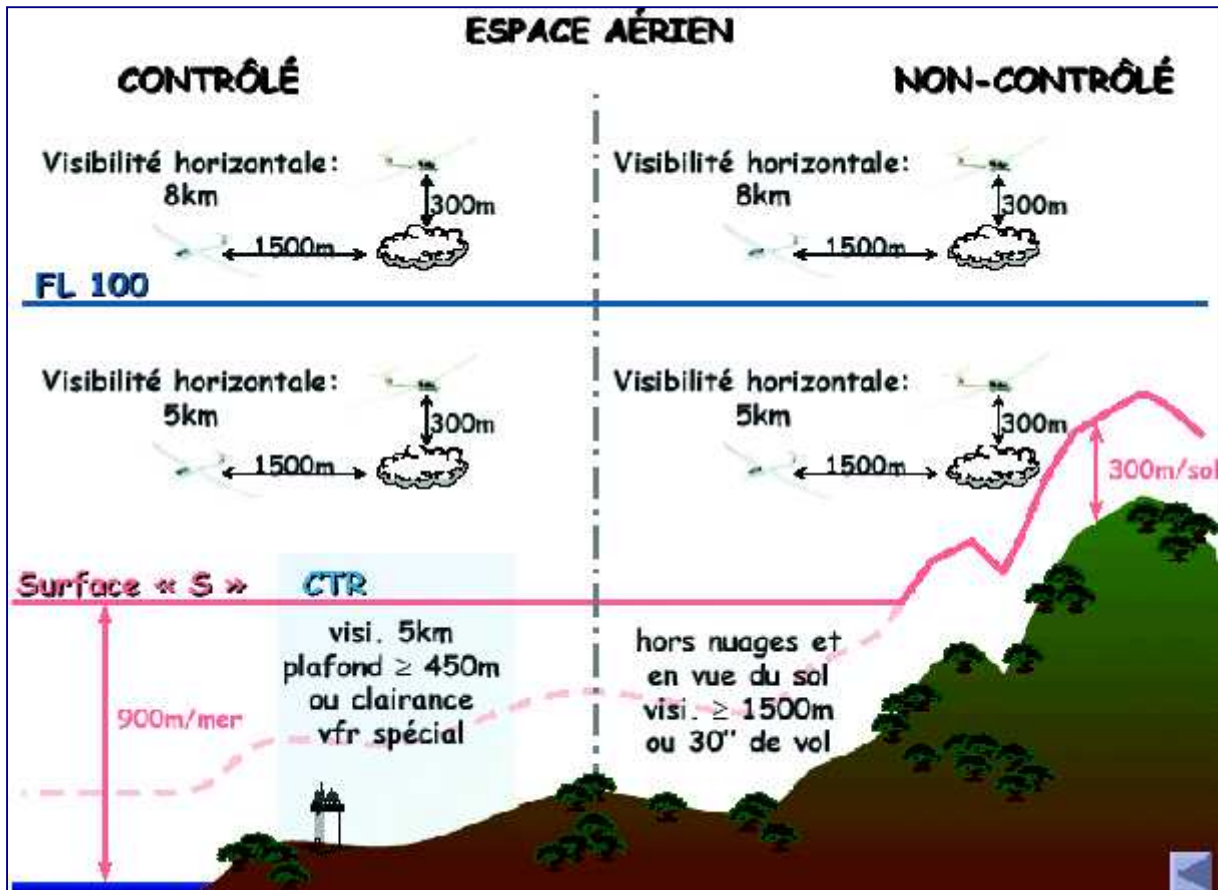


Figure-2-4 : Les minimums VMC de visibilité et de distance par rapport aux nuages.

➤ Espace aérien non contrôlé

-Classe F

Services rendus

- Services d'information et d'alerte, ainsi que le service consultatif de la circulation aérienne. Pas de service de contrôle.
- Le service consultatif de la circulation aérienne est un service permettant d'assurer autant que possible l'espacement entre les vols en régime IFR décidant d'utiliser ce service.

❖ Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont :

- distance par rapport aux nuages : 1500 mètres horizontalement et 300 mètres (1000 ft) verticalement ;
- visibilité 8 km au-dessus du FL 100 et 5 km au-dessous du FL 100.
- En dessous de 3000ft au dessus de sol ou de 1000ft au dessus de sol, la visibilité doit être de 1500 mètres ou 30 secondes de vol.

## **7-Classe G**

### Services rendus

- Service d'information de vol et d'alerte seulement, pas de service de contrôle.
- Les conditions météorologiques de vol à vue (VMC) sont les mêmes qu'en classe F.

# CHAPITRE 3 : LES METHODES UTILISEES POUR LA RESOLUTION DES CONFLITS AERIENS

## 3.1 Introduction

Le système de gestion de la circulation aérienne est un système complexe par bien des aspects : il comporte un grand nombre d'agents humains et techniques. Il doit pouvoir traiter des aéronefs ayant des performances et des équipements variés ; c'est un système ouvert dont l'arrêt rapide dans un état sécuritaire est impossible.

Depuis 40 ans l'informatique a été introduite dans la gestion de la circulation aérienne. L'automatisation a porté sur le traitement plan de vol et radar pour distribuer l'information pertinente aux contrôleurs sur les secteurs et faciliter les transferts des vols entre secteurs. Elle a permis de faire passer le trafic, mais a peu augmenté la productivité des contrôleurs. Dans les 10 prochaines années des outils d'assistance au contrôleur et au pilote permettront la sécurité et la capacité dans une mesure que l'on ne sait pas évaluer.

L'automatisation plus poussée a fait l'objet de nombreux projets de recherches (AERA aux USA, ARC 2000 Eurocontrol, etc..).

La fonction principale du contrôle de la circulation aérienne est d'assurer un écoulement sûr et ordonné des vols, en évitant les abordages entre aéronef en air ou au sol. Sa raison d'être est avant tout la sécurité.

L'automatisation consiste à un système (totalement ou partiellement) des tâches effectuées jusqu'à présent par un opérateur humain. Tant que l'automatisation n'est pas totale, l'opérateur garde un rôle et on parlera d'assistance automatisée.

La simple apparition de radar peut être déjà considérée, dans ce cadre, comme une forme élémentaire d'automatisation. L'automatisation est donc un long processus qui a ses racines aux origines du contrôle aérien et continue depuis sa lente progression.

## 3.2 Les deux principes de résolution d'un conflit

Lorsque deux avions sont en conflit, le contrôleur doit modifier la route des avions afin d'assurer le respect des normes de séparation. On peut citer deux principes de résolution souvent utilisés : l'évitement par l'offset et l'évitement par point tournant.

### 3.2.1 L'évitement par l'offset

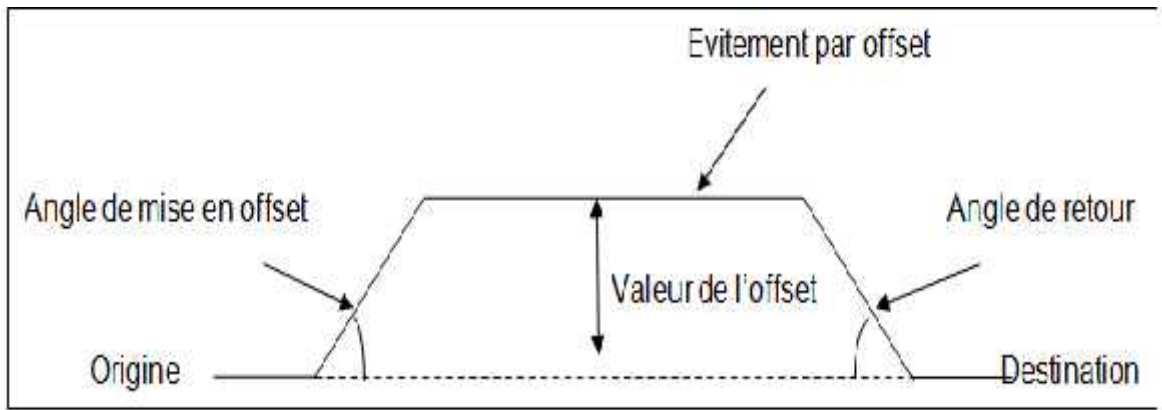
L'évitement par offset (figure 3-1) consiste à faire suivre à l'avion dévié une trajectoire parallèle à sa trajectoire optimale, déclarée par rapport à celle-ci, d'un côté ou de l'autre. L'évitement par offset comporte trois phases ; durant chacune de ces phases.

1. La phase de mise en offset : l'avion est dévié de sa trajectoire suivant un angle appelé angle de mise en offset, jusqu'à ce qu'il atteigne l'écartement désiré par rapport à sa trajectoire d'origine.

2. L'avion suit ensuite une trajectoire parallèle à sa trajectoire d'origine, pendant un temps variable, mais en tous cas suffisant à l'évitement du deuxième avion. La distance entre la trajectoire déviée et la trajectoire d'origine sera appelée dans la suite de la valeur de l'offset.

3. L'avion revient sur sa trajectoire initiale, l'angle de mise en offset comme l'angle de retour sur la trajectoire peuvent être fixés. La durée de la seconde phase (temps pendant lequel la trajectoire de l'avion reste parallèle à sa trajectoire) n'a pas d'incidence directe sur l'allongement de la trajectoire. Cependant, il est préférable que ce temps soit le plus court possible, pour les deux raisons suivantes :

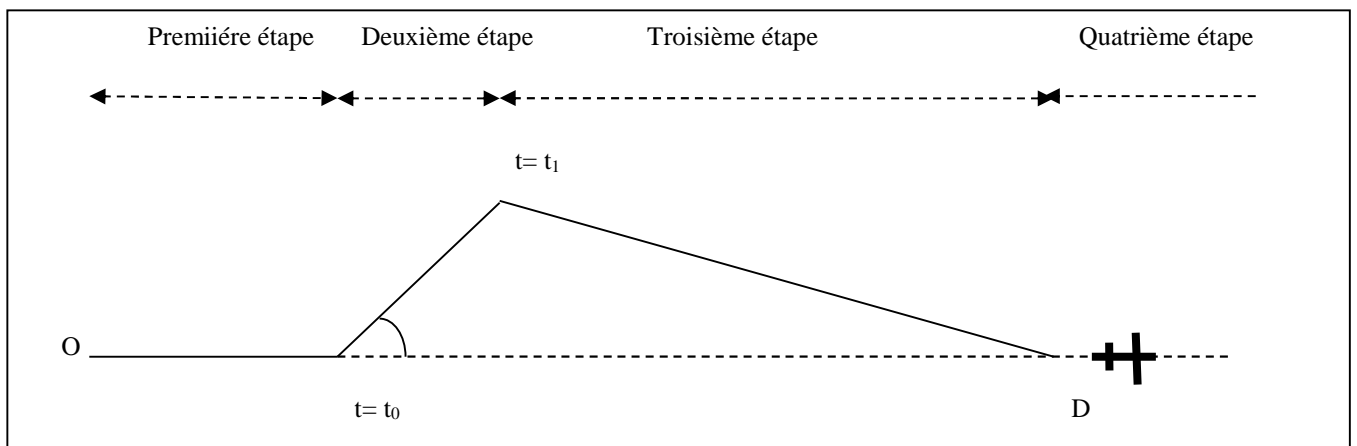
- ) On réduit ainsi le risque que pendant cette phase, la trajectoire de l'avion dévié n'interfère avec celle d'un autre avion.
- ) Le contrôle aérien est réparti entre plusieurs secteurs, et il est préférable, pour des raisons de coordination entre secteurs, qu'au moment où l'avion passe de l'un de ces secteurs à un autre, il rejoigne sa trajectoire initiale. Les secteurs sont par ailleurs conçus de manière à ce que les points de passage de l'un à l'autre soient suffisamment éloignés des balises, au voisinage desquelles, comme on l'a vu, surviennent le plus souvent des conflits [35][36].



**Figure 3-1** : Méthode d'évitement par offset

### 3.2.2 l'évitement par point tournant

Dans ce cas on choisit un point proche de la zone de conflit (figure 3-2) que l'avion dérouté survole avant de rejoindre le point de sortie initial. L'évitement par point tournant entraîne un retard moins important que l'évitement par offset.



**Figure 3-2** : Méthode d'évitement par point tournant

## 3.3 Modélisation de trajectoire

Dans cette partie nous présentons la modélisation de trajectoire que nous avons utilisées puis nous écrivons la formulation mathématique du problème de résolution automatique des conflits sous la forme d'un problème d'optimisation [35-36] .

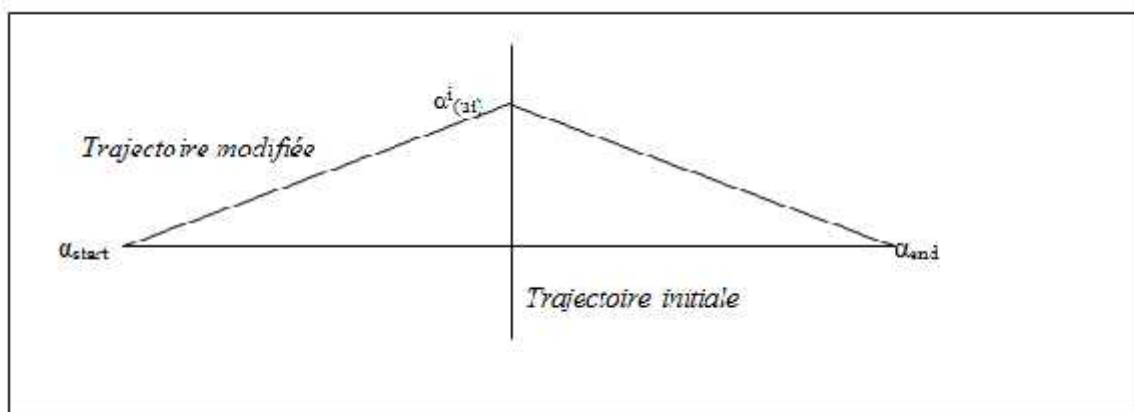
### 3.3.1 Trajectoire linéaire par morceaux

Nous utilisons une trajectoire linéaire par morceaux qui correspond aux manœuvres de point tournant .Ce type de manœuvre correspond exactement à l'ordre donné par un

contrôleur à un pilote pour résoudre un conflit. Ce choix de modélisation est donc adapté à une application opérationnelle immédiate.

Notre modélisation considère la trajectoire uniquement sur un horizon temporel donné. Nous nous intéressons ici à la planification tactique et donc à un horizon temporel d'approximativement 20 minutes. Nous considérons les points d'entrée et de sortie dans cet horizon temporel respectivement comme le point de départ et d'arrivée de l'avion. On suppose ici que la manœuvre de point tournant est imposée sur l'intégralité de notre horizon temporel et la trajectoire initiale est définie comme la ligne droite reliant point de départ et d'arrivée. Le point tournant est placé sur la médiatrice de la trajectoire initiale comme montré sur la figure 3.3.

Le point tournant sera en fait placé sur la médiatrice, pour tous les avions, par la méthode d'optimisation en charge de la résolution de conflits. La trajectoire de l'avion  $i$  sera notée  $i$ .



**Figure 3.3** : Modélisation de trajectoire linéaire par morceaux avec point tournant

Pour chaque avion  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) impliqué dans le conflit que nous cherchons à résoudre, nous disposons du point d'entrée et de sortie dans la zone de conflit :

$$\text{star} \left[ \begin{array}{c} X_{i0} \\ Y_{i0} \end{array} \right] \quad \text{et} \quad \text{end} \left[ \begin{array}{c} X_{i2} \\ Y_{i2} \end{array} \right]$$

Ainsi que de la vitesse de l'avion  $v_i$  que nous considérons constante.

À partir de ces données, et pour garantir que la trajectoire modifiée ne rallonge pas de manière excessive la trajectoire initiale, nous définissons une *bande de déviation maximale*

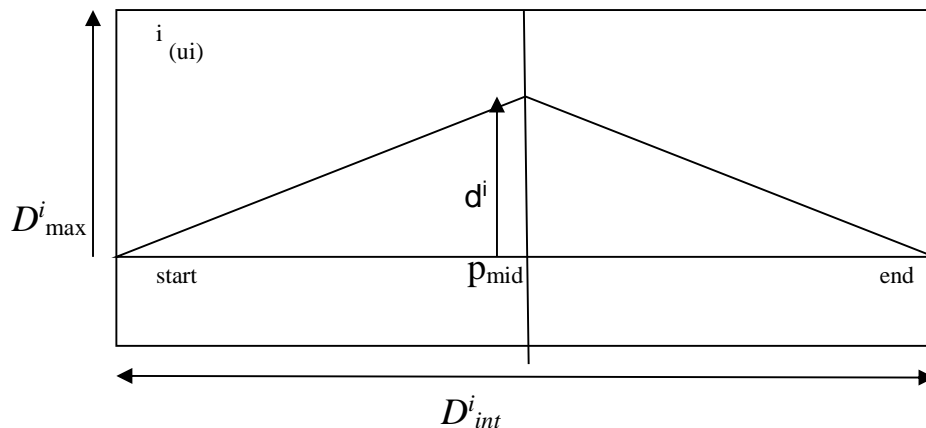


qui définit l'ensemble des positions que peut prendre le point tournant sur la médiatrice de la trajectoire initiale (voir figure 3.4). Ainsi, nous définissons pour chaque avion  $i$ ,

$$D_{max}^i = \alpha D_{init}^i, \text{ et } D_{init}^i = \| \text{end} - \text{start} \| \quad (3.1)$$

où  $\alpha$  est une proportion fixée à l'avance par l'utilisateur (nous avons choisi empiriquement  $\alpha = 0.3$  dans tous nos tests, ce qui engendrait un rallongement maximal de 10% de la trajectoire). Le point tournant, dont les coordonnées sont notées  $i(u_i)$ , sera donc placé à l'aide d'un pourcentage de cette bande de déviation maximale :  $u_i := \pm(100 d_i / D_{max}^i)\%$  où  $d_i$  est la distance entre le point tournant et la trajectoire initiale (de l'avion  $i$ ).

C'est ce paramètre  $u_i$  qui sera déterminé par la méthode d'optimisation. En d'autres termes, le vecteur  $u = (u_1, \dots, u_N)$  a comme composantes nos variables d'optimisation.



**Figure 3.4** : Modélisation de trajectoire linéaire par morceaux

Pour calculer la trajectoire  $i$  à partir de  $u_i$ , les coordonnées du point tournant de l'avion  $i$ , contenues dans le vecteur  $i(u_i)$ , sont nécessaires. Pour déterminer ces coordonnées à partir de notre paramètre  $u_i$ , on procède comme suit. On définit d'abord le vecteur directeur de la trajectoire de l'avion  $i$  :

$$i := i_{end} - i_{start} \quad (3.2)$$

À partir de cela, nous calculons la position de la base de la médiatrice notée  $p_{mid}^i$  (voir figure 3.4) :

$$p_{mid}^i = p_{start}^i + \frac{1}{2} \mathbf{q}^i \quad (3.3)$$

Nous devons également définir le vecteur  $\mathbf{q}^i$  orthogonal à la trajectoire initiale et de norme  $D_{max}$ . Pour cela, nous résolvons le système (3.4).

$$\begin{cases} (\mathbf{q}^i)^T \mathbf{q}^i = 0 \\ \|\mathbf{q}^i\| = D_{max} \end{cases} \quad (3.4)$$

Enfin, les coordonnées du point tournant sont déterminées de la manière suivante :

$$i_{(ui)} = p_{mid}^i + u_i \mathbf{q}^i \quad (3.5)$$

La manœuvre de point tournant ainsi définie décrit une trajectoire déviée sur la gauche de la trajectoire initiale lorsque  $u_i > 0$ , et sur la droite si  $u_i < 0$ . Avec cette modélisation, il nous est possible d'utiliser une courbe paramétrée par le temps.

La trajectoire  $i$  de l'avion  $i$  est donc complètement déterminée par la valeur  $u_i$  et par le temps,  $t$ , comme suit :

$$i(u_i, t) = (i_x(u_i, t), i_y(u_i, t)) \quad (3.6)$$

En utilisant les définitions précédentes et le fait que l'avion se déplace à vitesse constante, nous obtenons la position de l'avion en tout temps  $t$  :

$$i(u_i, t) = \begin{cases} p_{start}^i + t \mathbf{v}_i \frac{(\mathbf{l}(u) - \mathbf{l}_s)}{\|\mathbf{l}(u) - \mathbf{l}_s\|} & \text{si } t \in [0, t_{mid}^i] \\ i_{(ui)} + (t - t_{mid}^i) \mathbf{v}_i \frac{(\mathbf{l}_e - \mathbf{l}(u))}{\|\mathbf{l}_e - \mathbf{l}(u)\|} & \text{si } t \in [t_{mid}^i, t_{end}^i] \end{cases} \quad (3.7)$$

Où  $t_{mid}^i = \frac{\|\mathbf{l}(u) - \mathbf{l}_s\|}{v_i}$

et  $t_{end}^i = 2t_{mid}^i$  sont respectivement, le temps d'arrivée en  $i_{(ui)}$ , et le temps d'arrivée en  $i_{end}$ .

Nous avons donc défini notre modèle de trajectoire pour un avion en fonction du paramètre  $u_i$  défini plus haut. L'ensemble des variables  $u_i$ , pour  $i = 1, \dots, N$  seront utilisées par la méthode d'optimisation pour résoudre les conflits de manière optimale [37].

### 3.3.2 Modélisation du problème sous la forme d'un problème d'optimisation

Nous présentons ici une formulation mathématique du problème de résolution de conflits sous la forme d'un problème d'optimisation.

L'approche optimisée a pour but d'obtenir une situation sans conflit tout en optimisant le tracé des trajectoires selon des critères choisis (consommation, temps de trajet, équité entre avion, etc...). Nous nous concentrons spécifiquement plus spécifiquement sur la minimisation de la moyenne des distances parcourues par les avions. Nous présenterons d'abord la formulation semi-infinie de manière générale pour ensuite détailler les expressions de la fonction-objectif et des contraintes et de leurs dérivées pour la modélisation de trajectoire utilisées (linéaire par morceaux).

### 3.3.3 Formulation semi-infinie

Dans cette section, nous introduisons la formulation de type SIP qui traite des problèmes minimisant une fonction-objectif soumise à une infinité non-dénombrable de contraintes. Plus précisément, les contraintes sont des fonctions de la variable d'optimisation et d'un paramètre continu. C'est ce paramètre continu qui engendre une infinité de contraintes. La formulation classique d'un problème de SIP est :

$$\begin{array}{l} \text{Min } f(x) \\ g(x; t) \leq 0 \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \forall t \in [t_1, t_2] \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Où  $x$  est ici la variable d'optimisation de dimension finie,  $f$  est la fonction-objectif,  $g$  la fonction contrainte et  $t$  le paramètre continu appelé paramètre semi-infini. La contrainte doit donc être satisfaite pour une infinité de valeurs de  $t$  ( $t \in [t_1, t_2]$  et  $t$  est continu).

Cette approche nous permet de modéliser directement les contraintes de séparation à l'aide d'une seule contrainte pour chaque paire d'avions. En effet, les distances de séparation devant être satisfaites en tout temps, le temps est donc notre paramètre semi-infini. Nos variables d'optimisation sont, les  $u_i$  déterminant la position du point tournant de chaque avion  $i$ . Nous définissons un vecteur  $u$  contenant la valeur  $u_i$  des  $N$  avions. La dimension de notre

problème d'optimisation est donc réduite au nombre d'avions impliqués dans le conflit considéré.

Nous définissons la fonction-objectif  $f(u)$  comme la moyenne des  $f(u_i)$  sur les  $N$  avions :

$$f(u) = \frac{1}{N} \sum f(u_i) \quad (3.9)$$

Où chacune des fonctions  $f(u_i)$  est représentative de la différence relative de distance parcourue par l'avion  $i$  entre sa trajectoire modifiée et sa trajectoire initiale. Nous détaillerons la fonction objective plus précisément dans la partie **3.3.4**

Intéressons-nous maintenant aux contraintes de notre problème d'optimisation le respect des distances de séparation. Pour cela,  $^i u_i(t)$  représente la trajectoire 2D de l'avion  $i$ . La distance de séparation à l'instant  $t$  pour les avions  $i$  et  $j$  est :

$$\| ^i u_i(t) - ^i u_j(t) \| \quad (3.10)$$

Où  $\|\cdot\|^2$  est la norme  $l_2$ . Nous définissons la fonction  $c^{ij}(u; t)$  comme étant la distance au carré :

$$c^{ij}(u; t) = \| ^i u_i(t) - ^i u_j(t) \|^2 \quad (3.11)$$

afin de simplifier les calculs qui suivent.

Rappelons que nous travaillons uniquement dans le plan et que nous utilisons donc la distance de séparation horizontale  $= 5Nm$ . La valeur  $t_{min}^{ij} = \min(t_{end}^i, t_{end}^j)$ , avec  $t_{end}^i$  le temps de sortie de l'avion  $i$  (le temps où celui-ci atteint son objectif  $t_{end}^i$ ). Ainsi, la contrainte de séparation doit être respectée pour tout  $t \in [0, t_{min}^{ij}]$ . Par conséquent, nous pouvons formuler notre problème d'optimisation comme suit :

$$\min f(u) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(u) \quad \left\{ \begin{array}{l} c^{ij}(u; t) \leq 5Nm^2 \forall t \in [0, t_m] ; \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \\ j = i+1, 2, \dots, N. \end{array} \right. \quad (3.12)$$

la valeur  $t_{min}^{ij} = \min(t_{end}^i, t_{end}^j)$ , avec  $t_{end}^i$  le temps de sortie de l'avion  $i$  (le temps où celui-ci atteint son objectif  $t_{end}^i$ ), ainsi la distance de séparation standard doit être respectée pour tout

$t \in [0, t_m]$ .

### 3.3.4 La fonction-objectif

Ici, nous détaillons la fonction-objectif et ses dérivées dans le cas d'une modélisation linéaire par morceaux des trajectoires. En optimisation numérique, la connaissance de la sensibilité de la fonction-objectif par rapport aux variables d'optimisation est en effet une information cruciale qui doit être exploitée lorsque disponible.

#### 3.3.4.1 Cas de la modélisation linéaire par morceaux des trajectoires

L'expression de la fonction-objectif est triviale dans ce cas puisque la distance parcourue par un avion  $i$  en termes de  $u_i$  s'obtient directement. Soit  $T^i(u_i)$  la distance parcourue par l'avion  $i$  en utilisant le point tournant défini par  $u_i$ . Par le théorème de Pythagore et en utilisant le fait que  $D_{\max} = \lambda D_{\text{init}}$ , on obtient :

$$T^i(u_i) = 2 D_{\text{init}} \sqrt{\lambda u_i^2 + \frac{1}{4}} \quad (3.13)$$

À partir de cela, nous définissons précisément la fonction  $f^i(u_i)$  comme suit :

$$f^i(u_i) = \frac{(T^i(u_i))^2 - (T^i(0))^2}{(T^i(1))^2 - (T^i(0))^2} \quad (3.14)$$

Nous utilisons le carré de la distance parcourue car, sans inconvénient majeur du point de vue modélisation de notre problème opérationnel, nous parvenons ainsi à simplifier le calcul des dérivées. Nous normalisons de manière à considérer l'impact de la déviation par rapport à la trajectoire initiale (notons que  $T^i(0)$  correspond à la distance parcourue par la trajectoire initiale et que  $T^i(1)$  correspond à la pire déviation autorisée). Un simple calcul conduit finalement à :

$$f^i(u_i) = u_i^2 \quad (3.15)$$

La fonction-objectif s'exprime donc :

$$f(u) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(u_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2 \quad (3.16)$$

### 3.3.5 Les contraintes

Les contraintes semi-infinies ne peuvent être évaluées directement numériquement (puisque'il y en a une infinité). Par conséquent, pour l'expression des contraintes, comme ici, intègrent la contrainte sur le paramètre semi-infini pour la transformer en une contrainte unique. On se concentre sur la fonction contrainte  $C^{ij}(u)$  :

$$C^{ij}(u) = \int_0^{t_{min}^{ij}} (\max\{r^2 - c_{ij}(u; t); 0\})^2 dt \quad (3.17)$$

La contrainte n'est vérifiée que sur  $[0, t_{min}^{ij}]$  car au-delà de  $t_{min}^{ij}$ , l'avion « arrivé » en premier n'étant plus considéré, la contrainte n'a plus lieu d'être vérifiée. Ce faisant, nous obtenons une contrainte égalité unique pour chaque paire d'avions  $(i, j)$ .

Si cette contrainte n'est pas violée, la distance de séparation sera respectée en tout temps de l'intervalle d'intérêt  $[0, t_{min}^{ij}]$ . En effet, si les avions  $i$  et  $j$  ne respectent pas la distance de séparation en un certain temps  $t$ , alors, par continuité de  $C^{ij}$ , on a :

$$r^2 - c^i(u; t) > 0 \quad (3.18)$$

L'intégrale devient alors non-nulle, et la contrainte est violée. C'est parce que l'expression mathématique  $\max$  n'est pas dérivable que nous avons plutôt utilisé cette modélisation mettant en jeu le carré de la violation de la contrainte de séparation [37].

### 3.4 Analyse biographique des approches du problème de résolution de conflits

On distingue dans la littérature deux types d'approches du problème de résolution de conflits. Les approches opérationnelles, historiquement plus anciennes, généralement à l'initiative de l'autorité du contrôle aérien, tiennent largement compte du contexte opérationnel, mais ne s'attaquent pas toujours au problème d'optimisation sous-jacent. Les approches théoriques, apparues plus récemment, s'attaquent efficacement à la complexité du problème, en faisant parfois des hypothèses irréalistes dans un contexte opérationnel. De rare approche abordent le problème combinatoire tout en essayant de respecter les contraintes opérationnelles.

#### 3.4.1 Approches opérationnelles

##### 3.4.1.1 Des systèmes centralisés au sol

###### ) La tentative américaine abandonnée AERA

Les travaux de recherche de la MITRE sur AERA ont été financés par la FAA. La première phase de ce projet, AERA 1 permettait de prévoir les trajectoires des avions en fonction des intentions des pilotes et de détecter d'éventuelles violations de séparation standard ou de restriction de flux pour des plans de vol existant ou désignés par un contrôleur. C'était donc avant tout un outil d'aide à la décision qui ne proposait pas de solution aux opérateurs.

AERA2 proposait d'importantes nouvelles aides aux opérateurs, et notamment une liste de « résolutions recommandées par l'ordinateur » aux éventuels conflits élémentaires détectés par AERA 1. AERA 2 introduisait également des outils d'aide à la coordination entre contrôleurs.

Dans AERA 3, la responsabilité de séparer les avions était laissée à la machine. La structure AERA 3 était hiérarchique. Au niveau national, l'ATMS restait en l'état. Il assurait une gestion des flux de trafic acceptable pour AEAR 3.

AERA 3 se décompose en trois niveaux hiérarchiques :

- ASF (Automated Separation Function) séparait les paires d'avions ;
- MOM (Manœuver Option Manager) assurait le respect du contexte global par l'ASF (qui ne savait gérer que des paires d'avions séparées) ;
- AMPF (Airspace Mnanger Planing function) s'assurait que MOM pouvait opérer avec succès en prévenant les trop fortes densités de trafic.

ASF et MOM étaient les deux niveaux dont l'automatisation complète était envisagée. Néanmoins, le seul niveau détaillé clairement d'AERA 3 était l'ASF qui ne résolvait que des conflits à deux avions. Les objectifs de MOM étaient assez clairement définis. Par contre, son fonctionnement est toujours resté très flou et peu convaincant. La recherche d'optimalité global n'apparaissait pas du tout dans AERA3.

L'ASF était assuré par un algorithme appelé « GENTLE-STRICT » (GS) dont le but était de résoudre automatiquement des conflits de croisement horizontal entre deux avions en utilisant des manœuvres latérales d'offset. GS prévoyait :

- Une manœuvre d'offset latéral pour un des deux avions dit « Gentle » selon un sens prédéterminé.
- Une consigne de tenue de trajectoire pour l'autre avion dit « Strict » dans le but d'éviter les déviations supérieures à un certain seuil de tolérance par rapport à sa trajectoire nominale.

GS ne résolvait un conflit que dans le plan horizontal et ne changeait jamais les vitesses des avions ou leur niveau de vol. GS agissait le plus tard possible afin d'éviter les manœuvres inutiles.

Le projet AERA n'a jamais abouti. Les algorithmes utilisés ou envisagés dans le MOM n'ont jamais été évoqués dans les rapports disponibles. Sur le plan de la modélisation, AERA3 peut garder un intérêt. Par contre, ce projet n'apporte pas de réponse au problème d'optimisation globale dès que le nombre d'avions dépasse 3.[2 ,7]

## J) **ARC2000 et ses dérivés**

Le projet ARC2000 a été développé au centre expérimental d'Eurocontrol à la fin des années 80. Il s'agit du premier concept qui soit allé, avec un certain succès, jusqu'au stade de l'expérimentation en simulation arithmétique.

Le projet ARC2000, l'automatisation complète du contrôle en route européen, a connu de profonds changements depuis son origine. Néanmoins la modélisation en « tube 4D » des trajectoires d'avions est restée et a permis de définir des outils d'aide à la décision innovants et efficaces pour le contrôleur.

Si l'on est capable de prédire avec une très bonne précision la trajectoire d'un avion, on peut représenter celle-ci par une courbe dans  $R^4$ , les trois premières variables représentant la position dans l'espace de l'avion au temps  $t$ , la quatrième variable. Les imprécisions de mesure de positions et de tenue de trajectoires 4D transforment, dans un souci de réalisme, cette courbe en « tube » pour chaque avion de sorte que les différents tubes soient d'intersections vides. Pour cela, ARC2000 utilise un algorithme d'optimisation locale (de type « gradient ») qui permet, étant donné  $n$  tubes d'intersection vide, de construire un tube  $(n+1)$  d'intersection vide avec tous les précédents et minimisant le retard de l'avion  $(n+1)$ .

Le principe ARC2000 était donc originalement le suivant : le premier avion entrant dans le système se voyait affecter un tube optimal respectant son plan de vol.

Dès qu'un nouvel avion se présentait, son tube optimal était calculé en considérant les tubes précédemment affectés comme des contraintes fixes. Autrement dit, un tube déjà affecté n'était pas remis en cause. L'optimalité globale n'était pas donc recherchée. Dans le cas où un avion ne respectait pas le tube qui lui était affecté, il devait négocier un nouveau tube respectant tous autres tubes. La faiblesse de ce principe se caractérisait par son manque de robustesse. En effet, il est possible que le non respect d'un tube 4D soit lié à des événements météorologiques par exemple, et qu'il ne touche pas seulement un avion mais plusieurs. On pouvait alors craindre un phénomène chaotique qui remettait en cause le principe adopté[13,29].



Les hypothèses de départ d'ARC2000 le projetaient bien au-delà de l'an 2000. En effet, la négociation des tubes 4D supposait que les avions soient équipés de FMS-4D, ce qui n'était pas réaliste à court terme. En effet, même aujourd'hui, les meilleurs FMS ne peuvent garantir que la tenue d'un horaire sur point précis situé (relativement) loin dans le futur, mais en aucun cas une trajectoire 4D sur l'ensemble du vol.

Le plan stratégique d'ARC2000 consistait à garantir des trajectoires sans conflits pour les 20 minutes à venir. Il fallait en effet trouver un juste milieu entre prévoir des trajectoires sans conflits très longtemps à l'avance. Et ne pas tenir compte des conflits à consistait à prévoir la trajectoire dans sa totalité avec le moins possible de conflits tout en surveillant les conflits potentiels. 20 ou 30 minutes à l'avance. Les conflits étaient éliminés. Avant cette période, seuls les conflits qui étaient fermement diagnostiqués pouvaient entraîner une réorganisation des trajectoires

ARC2000 s'est ensuite tourné vers des hypothèses plus réalistes. La modélisation de la trajectoire totale sans conflit (de l'origine à la destination) semble avoir été abandonnée pour une gestion à 20 ou 30 minutes des groupes de conflits ou de clusters.

La recherche de solutions optimales a également évolué puisqu'au principe du « dernier arrivé dernier servi », a succédé une série de règles permettant de classer les avions du plus prioritaire et les manœuvres de la plus opportune [4].

Le projet ARC2000 a été arrêté au milieu des années 90.

Aussi le projet ARC2000 a été testé sur du trafic réel. De la même façon que pour AREA3. La modélisation du problème est intéressante mais les algorithmes de résolution de clusters ne s'attaquent pas au problème d'optimisation globale des trajectoires.[2,4,7,26]

## ) **Le projet SAINTEX**

Dans le projet SAINTEX du CENA, trois approches d'automatisation du contrôle en route étaient abordées.

Le scénario « Détection-Résolution » était un système orienté système expert. Le système essayait de reproduire le comportement du contrôleur. Les conflits étaient détectés en extrapolant les trajectoires d'avions 10 minutes dans le futur (6 minutes pour les avions évolutifs. Aussitôt détecté, un conflit était classé suivant différents critères tels que l'angle formé par les trajectoires, le rapport des vitesses, etc. pour chaque classe de conflits, une

manœuvres prédéfinie était appliquée. Le système expert ne pouvait résoudre qu'un conflit entre deux avions.

Dans le scénario « 4D », une trajectoire sans conflit était générée pour tout avion entrant dans le secteur. Une trajectoire était représentée par un ensemble de point et de contraintes verticales. Pour chaque avion, on construisait un tube 4D représentant sa trajectoire compte tenue des incertitudes sur sa vitesse et sa position. Pour construire un tube admissible (sans conflit), SAINTEX faisait diverses tentatives parant de trajectoire idéale (directe) vers des trajectoires de plus en plus pénalisantes mais résolvant les conflits. Du temps que l'on consacrait à la recherche d'une trajectoire admissible s'écoulait la qualité de la résolution. La trajectoire de l'avion était ensuite surveillée de manière à s'assurer que l'avion respectait bien la trajectoire qui lui avait été afféctée. Ce scénario, purement algorithmique, ressemblait fortement à celui décrit dans ARC2000 [35-36] .

Dans le scénario hybride, les avions stables gérés par le système Détection-Résolution et les autres par le système 4D.

Utiliser un système expert pour résoudre un conflit à deux avions ne se justifie pas. Le projet SAINTEX, par définition, s'intéressait à la gestion automatique d'espaces aériens peu saturés. Le problème de la résolution des clusters d'avion était évoqué mais non résolu [2,4].

### **3.4.1.2 Des systèmes distribués : avions autonomes et séparation embarquée**

#### **) FREER (FREER-Route Experimental Encounter Resolution)**

Le projet FREER est né en 1995 au centre expérimental Eurocontrol. L'idée est de généraliser les règles de résolution du vol à vue par des EFR (Extended Flying Rules). Les concepteurs de FREER ont complété les règles de l'air de façons à pouvoir d'une part prendre en compte toute les configurations de conflits à deux avions, et d'autre part de définir un ordre total sur l'ensemble des avions d »s lors qu'on s'intéresse à trois avions ou plus. Par exemple, si trois avions arrivent simultanément sur le même point en suivant des routes Nord, 120 degrés et 240 degrés, la règle de priorité à droite ne permet pas de définir l'ordre de priorité pour ces trois avions. Le fonctionnement de FREER dans ce contexte n'a jamais été précisément décrit.

#### **) Le projet FACE**

Le projet FACES, développé au CENA, résout le problème de la coordination des avions par un mécanisme de distribution de jetons. Cet algorithme permet de construire un ordre total

pour l'ensemble des avions, même si ceux-ci ne sont pas en visibilité directe les uns des autres. Une fois cette ordre défini, on utilise un algorithme classique en robotique (A\*) pour résoudre les conflits. FACES a été testé en simulation arithmétique sur du trafic réel [2] .

### **3.4.2 Approches théoriques**

#### **) Méthode des forces répulsives**

Karim Zeghal a une approche originale du problème, aboutissant à une solution distribuée du problème de la séparation des avions en route. Le principe de sa méthode est l'application aux avions des forces. Cette approche offre l'avantage de ne nécessiter ni communication ni négociation entre les avions, et être très robuste aux perturbations.

Elle laisse en revanche de côté l'optimisation des trajectoires et implique de pouvoir modifier à tout instant la direction de chaque avion. De plus, elle supporte mal une augmentation de la densité de trafic [24,30-31] .

Les forces utilisées sont de trois types (figure 3-5) :

#### **) Les forces attractives**

Elles sont dirigées vers la destination des avions.

#### **) Les forces répulsives**

Elles sont définies à partir d'un potentiel de danger, causé par un autre avion ou une zone interdite. Dans le cas d'un autre avion, par exemple, le potentiel de danger pourra être inversement proportionnel à la distance. Les forces répulsives, perpendiculaires aux lignes équipotentielles, dirigées vers les potentiels décroissant, entraînent un éloignement rapide des obstacles proches [24,30-31] .

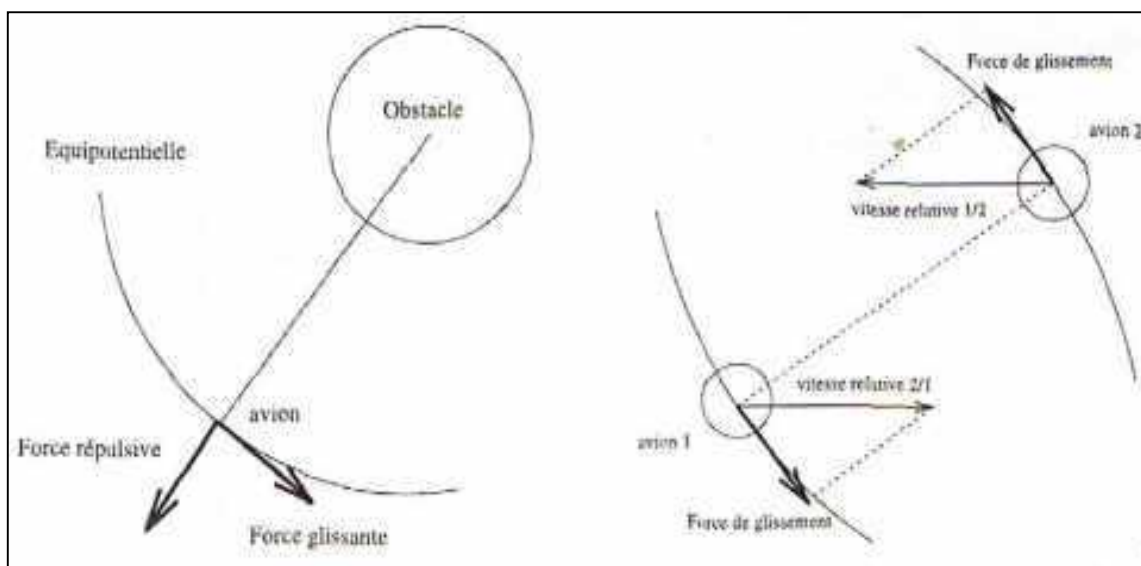
#### **) Les forces de glissement**

Elles ont tangentes à l'équipotentiel passant par l'avion, deux directions sont possibles : on choisit celle qui contribue à rapprocher l'avion de sa destination.

Ces forces de glissement le contournement des obstacles. Il est possible de définir ces forces de manière à ce que deux avions en conflit potentiel l'un avec l'autre aient des forces de glissement complémentaires. Cela introduit une coordination d'action sans concertation et permet d'obtenir des trajectoires d'évitement assez efficaces.

A partir des forces s'appliquant à un avion, sa trajectoire est modifiée en suivant la direction donnée par une combinaison de ces forces (pour un conflit impliquant deux avions, Karim Zeghal [31-32], très intéressants par l'originalité de la méthode proposée, ont comme atout majeur leur robustesse. Des inconvénients néanmoins subsistent encore :

- Les trajectoires obtenues, dans lesquelles le cap des avions varie constamment, sont difficiles à suivre pour les pilotes (et seraient pénibles pour les passagers). Une simplification des trajectoires obtenues serait nécessaire.
- La généralisation de la méthode à des conflits impliquant plus de deux avions, dans le cadre d'une augmentation de la densité du trafic, a été étudiée par J-F Boscoles résultats obtenus montrent que les limites du système sont vite atteintes [25] .



**Figure 3-5 :** Force répulsive et force glissante, forces de glissement coordonnées

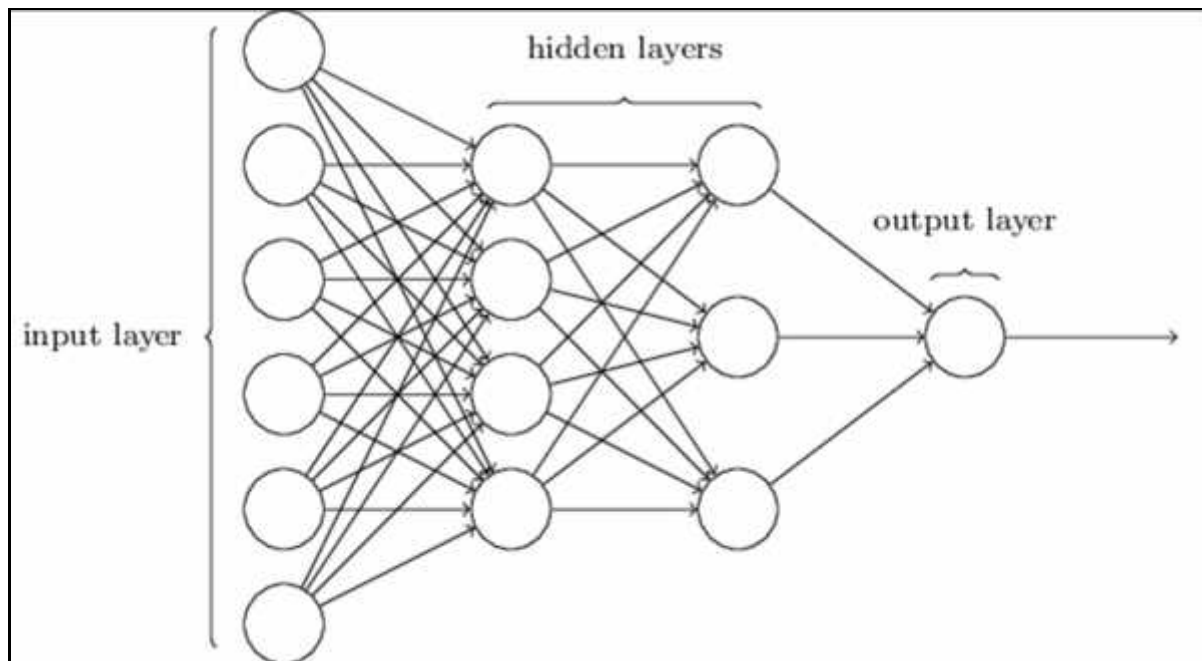
## ) Méthodes neuronales

Nicolas Durant et Frédéric Médioni [1,3] utilisent un algorithme génétique pour l'apprentissage d'un réseau de neurones qui agit sur les commandes d'un avion afin d'éviter un conflit. La figure 3-6 donne une idée de la structure du réseau de neurones utilisé en conflit à deux avions. Les données en entrée sont représentées sur la figure 3-7. La distance relative des deux avions, le relèvement angulaire  $\alpha$ , l'angle  $\beta$  entre les deux trajectoires, ou le relèvement  $\gamma$  de la destination sont les principales données utilisées pour les entrées du

réseau. Le réseau optimisé est ensuite testé sur des cas pris au hasard. Seul le plan horizontal est traité.

L'extension de la méthode au cas de conflits à trois avions est difficile. On peut tout d'abord chercher à optimiser un réseau de neurones prenant en compte pour chaque avion deux intrus au lieu d'un seul. F.Médioni montre dans sa thèse à quel point l'apprentissage devient difficile en raison de nombre important de configuration possibles. Il semble qu'il soit difficile d'obtenir des réseaux à la fois fiables et performants.

Médioni a également utilisé une méthode d'apprentissage par algorithmes génétiques utilisant la coévolution de réseaux de neurones et de configurations de conflits. Son travail a montré que la mise en œuvre de telles techniques est très lourde et nécessite beaucoup trop de réglages et de raffinements.[2,4,25,27,28]



**Figure 3-6** : structure du réseau de neurones

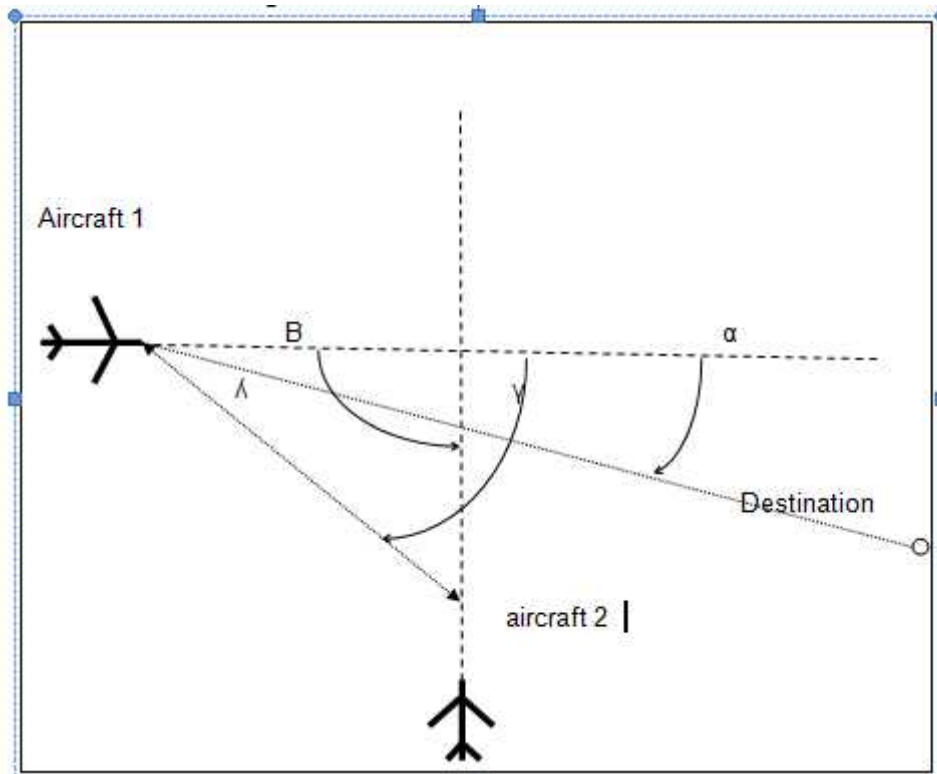


Figure 3-7: Données en entrée

### ) Une méthode utilisant la programmation linéaire

Dans le rapport de DEA, Frédéric Médioni met en évidence la possibilité de libéraliser le problème de résolution de conflits dans le plan horizontal à condition de modéliser les manœuvres s'évitement par des offsets (l'avion se met sur une trajectoire parallèle à sa trajectoire initiale pendant la durée de la manœuvre). La modélisation suppose que l'avion se déplace à vitesse constante, ce qui est loin d'être le cas dans la pratique. La linéarisation ne résout pas pour autant le problème combinatoire. Pour un conflit à deux avions dans le plan horizontal, l'espace des solutions admissibles se décompose en  $2^{n(n-1)/2}$  composantes connexes. Il s'agit de définir pour chacune des paires si le relèvement d'un des avions par l'autre évolue dans le sens trigonométrique ou dans le sens des aiguilles d'une montre. De plus la linéarisation requiert que pour chaque avion, on choisisse son sens de déviation (droite ou gauche). Au total, le nombre de programme linéaires à résoudre pour un conflit à  $n$  avions est  $2^{n(n+1)/2}$  soit par exemple 32768 pour un conflit à 5 avions [3].

Cette méthode permet de résoudre des cas théoriques assez facilement jusqu'à 5 ou 6 avions. Néanmoins, les hypothèses fortes faites sur la modélisation (vitesses constantes, pas de prise en compte de l'incertitude) la rendent inexploitable dans un contexte opérationnel.

## J **Une méthode basée sur la programmation semi-définie**

L'idée initiale a été introduite par Eric Fréon et été reprise par Pierre Dodin au LOG. Elle consiste à utiliser un algorithme de programmation semi-définie pour déterminer le sens de résolution de chaque paire d'avion en conflits. Une fois ce sens de résolution déterminé, une méthode d'optimisation convexe sous contraintes convexes permet de calculer les modifications de cap à imposer aux avions. Cette méthode ne permet pas de trouver une solution admissible dans tous les cas. Un processus de bruitage ou randomisation permet d'améliorer son taux de réussite sans toutefois rendre la méthode infaillible. Le cadre très simplifié du modèle choisi (vitesses constantes, avions dans un plan horizontal manœuvrant tous au même moment, pas de prise en compte de l'incertitude) ne laisse que peu d'espoir pour des applications concrètes.

### **3.5 Les méthodes et les techniques de résolution de conflits aériens**

#### **3.5.1 Méthode des intervalles**

Le problème de l'évitement aérien est un problème d'optimisation (minimiser les retards) sous contraintes (les avions devant rester séparés).

L'utilisation de la méthode des intervalles reposera sur le fait qu'elle calcule l'ensemble des positions possible de l'avion à tout instant  $t$  donné lorsque les instants de manœuvres  $t_0$  et  $t_1$  ne sont plus définis précisément mais peuvent prendre n'importe quelles valeurs à l'intérieur d'intervalles, appelées intervalles de manœuvres. Elle pourra ainsi déterminer les conséquences de l'utilisation des intervalles de manœuvre sur le respect par les avions des contraintes de séparation, ainsi que leurs retards.

Ceci permet d'appliquer au problème de l'évitement des algorithmes d'optimisation utilisant des méthodes des intervalles.

L'analyse d'intervalle a été originalement développée en 1996 par Moore comme un outil permettant de prendre en compte et de contrôler les erreurs d'arrondis dans les calculs numériques effectués sur ordinateurs.

L'intérêt d'utiliser les méthodes d'intervalles s'appuie sur les deux caractéristiques suivantes :

- J Les méthodes d'intervalles permettent d'utiliser des méthodes d'optimisation globales spécifiques.

- ) Elles permettent aussi la prise en compte des incertitudes inhérentes au problème à traiter. Ainsi, les méthodes d'intervalles permettront de considérer que les virages des avions dans le cadre de leurs trajectoires d'évitement n'auront pas lieu à des instants précis, mais prendront place dans des intervalles de temps.

### 3.5.1.1 Le principe

Le problème proposé à résoudre est un problème classique d'évitement : minimiser les retards des avions (retards entraînés par les altérations de leurs trajectoires due à l'évitement), sous la contrainte qu'il n'y ait aucun conflit entre les avions, c'est-à-dire que les avions restent toujours séparés deux à deux.

Dans cette partie deux avions sont séparés par distance  $d$ , si sur toute la durée de l'évitement, la distance entre eux reste toujours supérieure ou égale à cette distance  $d$ , on dira qu'ils restent séparés, sans préciser de quelle distance, quand ils sont séparés au sens de la définition ci-dessus, c'est-à-dire- que la distance entre eux restera supérieure ou égale à la norme de séparation.

Le principe de l'utilisation des méthodes d'intervalles que nous allons expliquer dans cette section repose sur les points suivants :

- ) Les trajectoires d'évitement possibles pour un avion éventuellement impliqué dans un conflit sont définies par certaines manœuvres, réalisées à des instants donnés. Dans le cadre de l'utilisation des méthodes d'intervalles, ces instants ne seront pas définis comme des nombres réels, mais comme des intervalles, représentant les intervalles de temps durant lesquels prendront place les manœuvres d'évitement.
- ) On pourra, au vu des intervalles dans lesquels prendront place les manœuvres d'évitement, savoir si les avions seront ou non séparés durant la durée de l'évitement. Cela sera possible en déterminant, pour un instant  $t$  donné, l'ensemble des positions que pourra occuper chaque avion en fonction des intervalles de temps dans lesquels prendront places ses manœuvres, puis en discrétisant le temps sur lequel sera conduit l'évitement, et en vérifiant, pour chaque pas de temps, si les positions possibles pour les avions susceptibles d'être impliqués dans un conflit sont telles que leur séparation sera, ou non, assurée.
- ) La première étape vers l'utilisation de telles méthodes d'intervalles est de calculer les positions susceptibles d'être occupées par un avion à un instant donné quand ses



manœuvres ne prennent pas place à des instants, mais à l'intérieur d'intervalles de temps.

### 3.5.2 Les algorithmes A\* (AStar)

Le principe de l'algorithme A\*, consiste à rechercher le meilleur chemin dans un arbre d'états, en redémarrant à chaque itération du meilleur nœud rencontré pendant la recherche

Ce principe nécessite une fonction de cout pour les transitions entre états, et une heuristique permettant d'estimer au mieux le cout des transitions restant entre le nœud courant des transitions restant entre le nœud courant et la meilleure solution possible dans le sous-arbre considéré.

L'algorithme gère une file d'attente à priorité, dans laquelle les nœuds sont insérés de façon ordonnée, en fonction du cout des transitions passées et de la valeur de l'heuristique. Le nœud de plus haute priorité (de plus bas coût), est retiré de la tête de la file d'attente, ses nœuds fils sont calculés, ainsi que le coût des transitions correspondantes, et les valeurs d'heuristiques. Les nœuds fils sont ensuite insérés dans la file d'attente et le processus est alors ré-tiré jusqu'à ce que l'on atteigne une feuille de l'arbre. Celle-ci est lors une solution de coût minimal.

Pour notre problème, l'algorithme A\* sera appliqué successivement à chaque trajectoire, en cherchant un chemin de coût minimal qui évite les trajectoires précédentes.

Les états représenteront des choix de déviation éventuelle, fait à chaque de la trajectoire. Pour parcourir l'arbre, il nous faut définir les règles permettant de produire des nœuds fils à partir d'un nœud père. Dans notre cas, les nœuds fils sont simplement les différentes possibilités pour la prochaine étape de la trajectoire.

Si une interférence est détectée entre le segment de trajectoire correspondant au nœud fils et une des trajectoires précédentes, le nœud est rejeté [22] .

### 3.5.3 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part avec une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (fitness) relative. Sur la base de

ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante.

# CHAPITRE 4 : LES ALGORITHMES GENETIQUES

## 4.1 Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre l'algorithme génétiques qui va être appliqué dans la suite de notre travail au problème du conflit aérien.

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle: croisements, mutations, sélection,...etc. Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne, puisque les premiers travaux de John Holland sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. L'ouvrage de David Goldberg a largement contribué à les vulgariser [12-13-14-15].

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données.

## 4.2 Les cinq éléments de l'algorithme génétique

**1. 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. Le choix du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Les codages binaires ont été très employés à l'origine. Les codages réels sont désormais largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs, pour l'optimisation de problèmes à variables continues.

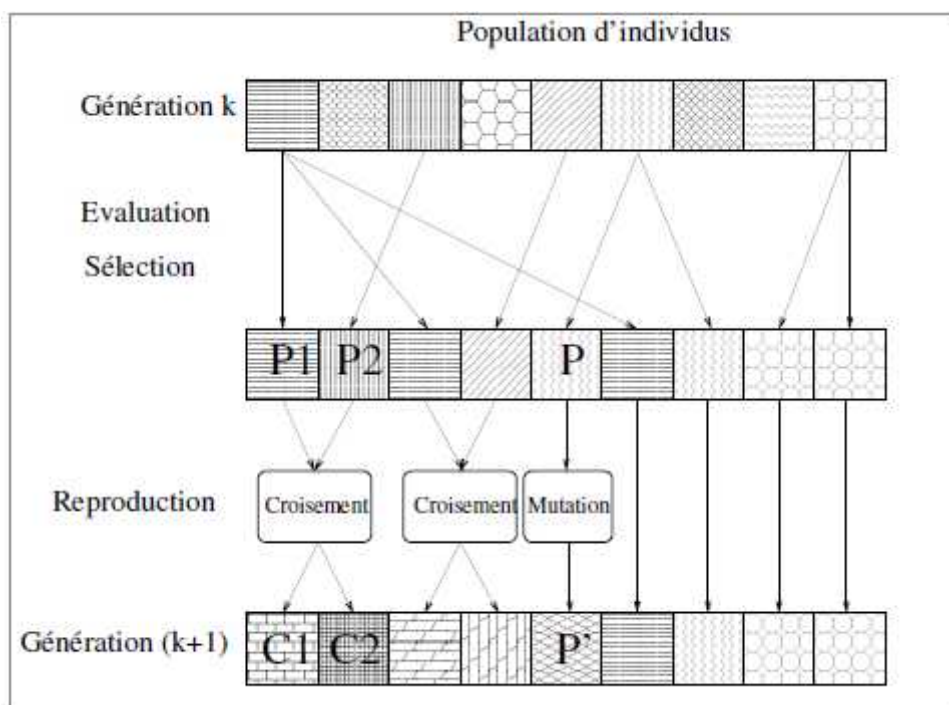
**2. Un mécanisme de génération de la population initiale :** Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers 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. Une fonction à optimiser :** Celle-ci prend ses valeurs dans  $\mathbb{R}^+$  et est appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu. Celle-ci est utilisée pour sélectionner et reproduire les meilleurs individus de la population.

**4. Des opérateurs :** permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'état.

**5. Des paramètres de dimensionnement:** taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique est représenté sur la figure 4-1.



**Figure 4-1 :** Principe général des algorithmes génétiques

On commence par engendrer 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  $P1$  et  $P2$  sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations.

L'opérateur de croisement est appliqué avec une probabilité  $P_c$  (généralement autour de 0.6) et engendre des couples d'enfants  $C1$  et  $C2$ . D'autres éléments  $P$  sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation est appliqué avec la probabilité  $P_m$  ( $P_m$  est généralement très inférieur à  $P_c$ ) et engendre des individus mutés  $P'$ . Les enfants ( $C1$ ,  $C2$ ) et les individus mutés  $P'$  sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population (la

figure 4-1 présente le cas où les enfants et les individus mutés remplacent les parents). Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis :

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori. C'est ce que l'on est tenté de faire lorsque l'on doit trouver une solution dans un temps limité.

- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus ou plus suffisamment rapidement.

## **4.3 Description détaillée**

### **4.3.1 Codage des données**

Historiquement, le codage utilisé par les algorithmes génétiques était représenté sous forme de chaînes de bits contenant toute l'information nécessaire à la description d'un point dans l'espace d'état. Ce type de codage a pour intérêt de permettre de créer des opérateurs de croisement et de mutation simples. C'est également en utilisant ce type de codage que les premiers résultats de convergence théorique ont été obtenus.

Cependant, ce type de codage n'est pas toujours bon :

- Deux éléments voisins en termes de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un codage de Gray.
- Pour des problèmes d'optimisation dans des espaces de grande dimension, le codage binaire peut rapidement devenir mauvais. Généralement, chaque variable est représentée par une partie de la chaîne de bits et la structure du problème n'est pas bien reflétée, l'ordre des variables ayant une importance dans la structure du chromosome, alors qu'il n'en a pas forcément dans la structure du problème.

Les algorithmes génétiques utilisant des vecteurs réels évitent ce problème en conservant les variables du problème dans le codage de l'élément de population, sans passer par le codage binaire intermédiaire. Certains les appellent RCGA (Real Coded Genetic Algorithms, d'autres parlent d'algorithmes évolutionnaires. La structure du problème est conservée dans le codage.

### **4.3.2 Génération aléatoire de la population initiale**

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est

naturel d'engendrer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état, en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si par contre, des informations a priori sur le problème sont disponibles, il paraît bien évidemment naturel d'engendrer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence. Dans l'hypothèse où la gestion des contraintes ne peut se faire directement, les contraintes sont généralement incluses dans le critère à optimiser sous forme de pénalités.

#### **4.3.3 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.

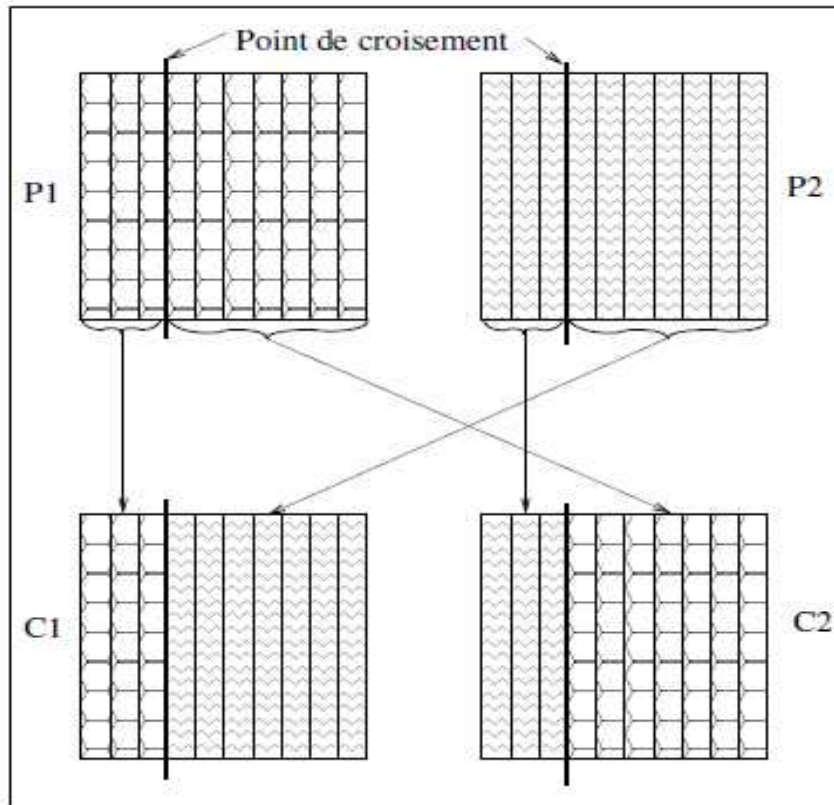
Il peut cependant être intéressant de conserver, tout en les pénalisant, les éléments non admissibles car ils peuvent permettre de générer des éléments admissibles de bonne qualité. Pour de nombreux problèmes, l'optimum est atteint lorsque l'une au moins des contraintes de séparation est saturée, c'est-à-dire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

#### **4.3.4 Opérateur de croisement**

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (slicing crossover). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de  $M$  gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes terminales de chacun des deux chromosomes, ce qui produit deux enfants C1 et C2 ( figure 4-2).



**Figure 4-2 : Croisement à 1 point**

On peut étendre ce principe en découpant le chromosome non pas en 2 sous-chaînes mais en n 3, 4, etc. (Voir figure 4-3).

Ce type de croisement à découpage de chromosomes est très efficace pour les problèmes discrets.

Pour les problèmes continus, un croisement “barycentrique” est souvent utilisé : deux gènes  $P_2(i)$  sont sélectionnés dans chacun des parents à la même position  $i$ . Ils définissent deux nouveaux gènes  $C_1(i)$  et  $C_2(i)$  par combinaison linéaire :

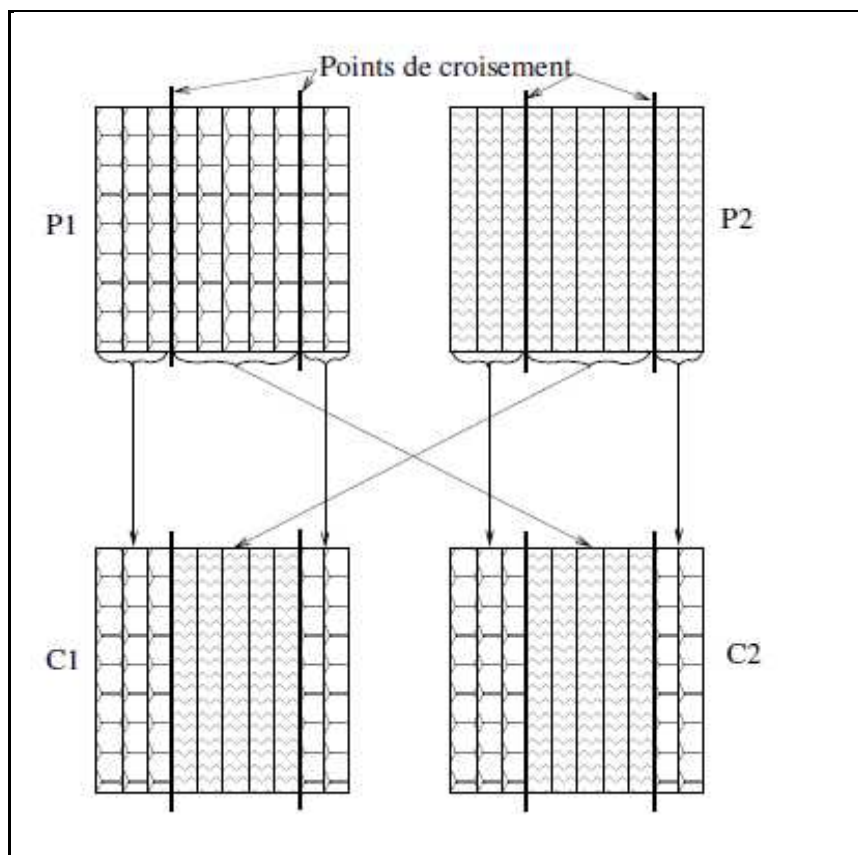
$$\begin{cases} C_1(i) = \alpha P_1(i) + (1 - \alpha) P_2(i) \\ C_2(i) = (1 - \alpha) P_1(i) + \alpha P_2(i) \end{cases}$$

Où  $\alpha$  est un coefficient de pondération aléatoire adapté au domaine d’extension des gènes (il n’est pas nécessairement compris entre 0 et 1, il peut par exemple prendre des valeurs dans l’intervalle  $[-0.5, 1.5]$ , ce qui permet d’engendrer des points entre, ou à l’extérieur des deux gènes considérés).

Dans le cas particulier d'un chromosome matriciel constitué par la concaténation de vecteurs, on peut étendre ce principe de croisement aux vecteurs constituant les gènes (voir figure 4-4) :

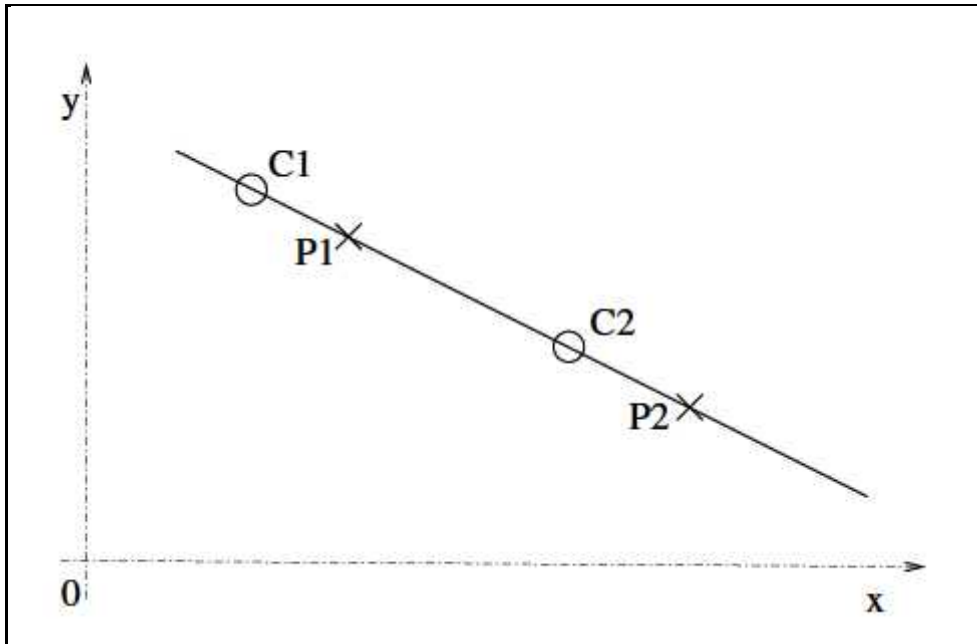
$$\begin{cases} C_1(i) = \alpha P_1(i) + (1 - \alpha) P_2(i) \\ C_2(i) = (1 - \alpha) P_1(i) + \alpha P_2(i) \end{cases}$$

On peut imaginer et tester des opérateurs de croisement plus ou moins complexes sur un problème donné mais l'efficacité de ces derniers est souvent liée intrinsèquement au problème.



**Figure 4-3 : croisements à 2 points**





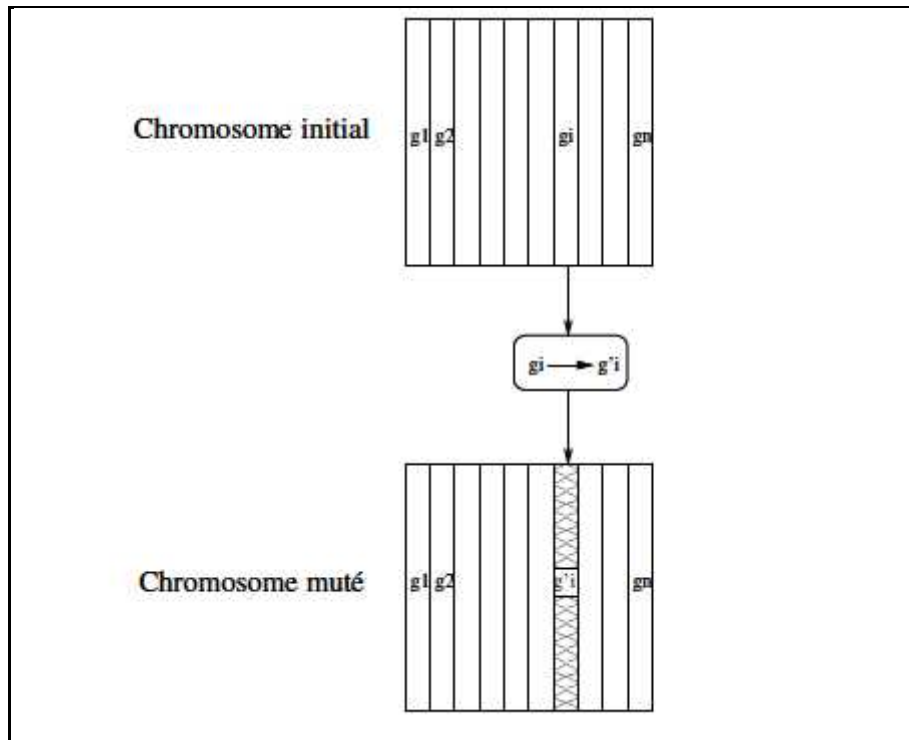
**Figure 4-4** :croisement barycentrique

#### 4.3.5 Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation apporte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité de parcours d'espace. Cette propriété indique que l'algorithme génétique sera susceptible d'atteindre tous les points de l'espace d'état, sans pour autant les parcourir tous dans le processus de résolution. Ainsi en toute rigueur, l'algorithme génétique peut converger sans croisement, et certaines implémentations fonctionnent de cette manière. Les propriétés de convergence des algorithmes génétiques sont donc fortement dépendantes de cet opérateur sur le plan théorique.

Pour les problèmes discrets, l'opérateur de mutation consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire (voir figure 4.5). Si la notion de distance existe, cette valeur peut être choisie dans le voisinage de la valeur initiale.

Dans les problèmes continus, on procède un peu de la même manière en tirant aléatoirement un gène dans le chromosome, auquel on ajoute un bruit généralement gaussien. L'écart-type de ce bruit est difficile à choisir a priori.



**Figure4-5** :Principe de l'opérateur de mutation

#### 4.3.6 Opérateur de sélection

A l'inverse d'autres techniques d'optimisation, les algorithmes génétiques ne requièrent pas d'hypothèse particulière sur la régularité de la fonction objectif. L'algorithme génétique n'utilise notamment pas ses dérivées successives, ce qui rend très vaste son domaine d'application. Aucune hypothèse sur la continuité n'est non plus requise. Néanmoins, dans la pratique, les algorithmes génétiques sont sensibles à la régularité des fonctions qu'ils optimisent. Le peu d'hypothèses requises permet de traiter des problèmes très complexes. La fonction à optimiser peut ainsi être le résultat d'une simulation.

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus d'une population et d'éliminer les mauvais. On trouve dans la littérature un nombre important de principes de sélection plus ou moins adaptés aux problèmes qu'ils traitent. Les deux principes de sélection suivants sont les plus couramment utilisés :

- Roulette wheel selection;
- Stochastic remainder without replacement selection;

Le principe de Roulette wheel selection consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness. On reproduit ici le principe de tirage aléatoire utilisé dans les roulettes de casinos avec une structure linéaire. Ces segments sont

ensuite concaténés sur un axe que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis on "regarde" quel est le segment sélectionné. Avec ce système, les grands segments, c'est-à-dire les bons individus, seront plus souvent choisis que les petits. Lorsque la dimension de la population est réduite, il est difficile d'obtenir en pratique l'espérance mathématique de sélection en raison du peu de tirages effectués. Un biais de sélection plus ou moins fort existe suivant la dimension de la population.

La Stochastic remainder without replacement selection évite ce genre de problème et donne de bons résultats pour nos applications. Décrivons ce principe de sélection :

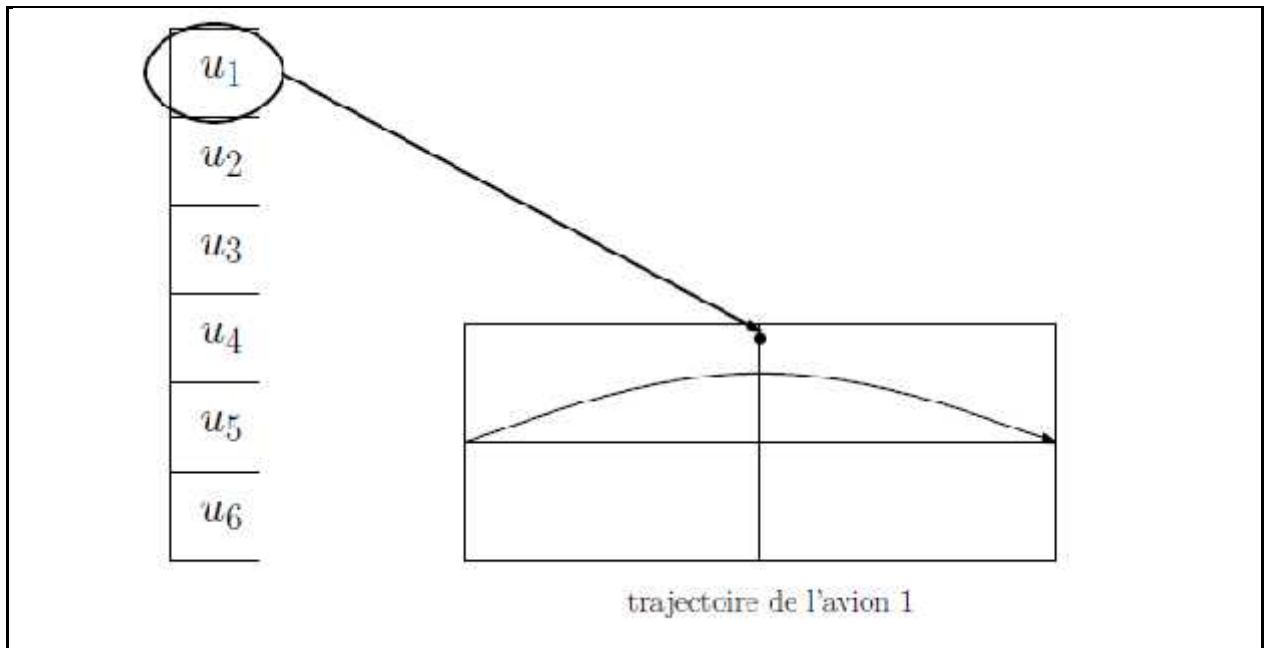
- Pour chaque élément  $i$ , on calcule le rapport  $ri$  de sa fitness sur la moyenne des fitness.
- Soit  $e(ri)$  la partie entière de  $ri$ , chaque élément est reproduit exactement  $e(ri)$  fois.
- La roulette wheel selection précédemment décrite est appliquée sur les individus affectés des fitness  $ri - e(ri)$ . Lorsque des populations de faible taille sont utilisées, ce principe de sélection s'avère généralement efficace dans les applications pratiques.

## 4.4 Étude d'application de l'algorithme génétique

### 4.4.1 Codage du chromosome

Initialement, dans les premiers AG, le chromosome représentant un individu (un point de l'espace d'état) était constitué d'une chaîne de bits. Celui-ci devait contenir toutes les informations nécessaires pour décrire le point de l'espace d'état concerné. Ce codage a évolué pour aboutir à une très grande diversité permettant, par exemple, d'utiliser directement les variables réelles d'un problème d'optimisation dont le domaine de recherche est  $R^N$ . La seule condition nécessaire du codage est qu'un chromosome détermine complètement une solution et qu'il puisse être manipulé par les opérateurs de croisement et de mutation [37] .

Nous avons choisi d'utiliser directement les variables d'optimisation  $ui$  (partie 3.3) en tant que gènes de notre chromosome : le  $i$ -ème gène d'un chromosome contient la valeur  $ui$ . Ainsi, la taille d'un chromosome est directement lié au nombre d'avions impliqués dans le conflit. Par exemple, pour un conflit à  $N = 6$  avions, le chromosome est représenté dans la figure 4.6. Chaque gène de notre chromosome correspond au placement du point de contrôle.



**Figure 4-6** -Encodage d'un chromosome pour une situation à  $N = 6$  avions

(ou point tournant, en modélisation linéaire par morceaux) d'un avion et définit entièrement la trajectoire de celui-ci.

#### 4.4.2 Génération de la population initiale

Pour générer la population initiale, nous avons, comme évoqué plus haut, deux possibilités.

Dans le cas où aucune information sur la position de la solution n'est disponible, le but est de recouvrir au mieux l'espace d'état. Une génération aléatoire est donc engendrée par des tirages uniformes sur chaque gène du chromosome. Dans le cas où l'utilisateur connaîtrait un sous-domaine de l'espace d'état où la solution se trouve, la population initiale est générée dans ce sous-espace.

Dans le cas d'une génération engendrée de façon aléatoire, il existe deux éventualités. Soit il est possible de savoir à l'avance si un point respecte les contraintes du problème d'optimisation, la population est alors générée aléatoirement dans le domaine admissible. Soit il n'est pas possible de le savoir, le respect des contraintes sera alors assuré via l'ajout d'une pénalisation dans la fonction-objectif et la population est uniformément distribuée sur tout l'espace d'état.

Dans notre cas, le problème étant un problème d'optimisation NP-difficile, il n'est pas facile de savoir dans quel sous-domaine se trouve une solution. Il est également difficile de

savoir à l'avance si un individu donné respecte les contraintes. Nous avons donc utilisé une pénalisation de la fonction-objectif (comme nous le verrons dans la partie suivante) et nous avons généré aléatoirement la population initiale en utilisant un tirage uniforme pour chaque composante [37].

#### 4.4.3 Calcul de la fitness

Nous détaillons ici la méthode d'évaluation de la fitness que nous avons utilisée avec les algorithmes génétiques.

##### 4.4.3.1 Évaluation des contraintes à l'aide de la formulation SIP

Dans un souci d'homogénéité entre les méthodes, nous avons ensuite employé la fonction objectif et les fonctions contraintes utilisées par les méthodes d'optimisation locale dans le calcul de la fitness. Cependant, les algorithmes génétiques ne prenant pas en charge les contraintes directement, nous avons pris compte des contraintes dans la définition de la fitness en ajoutant à la valeur de la fonction-objectif une pénalisation proportionnelle à la violation des contraintes. En reprenant les notations de la partie 3.3, la fitness est donc définie comme suit :

$$F(\mathbf{u}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(\mathbf{u}_i) + \omega \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M C^j(\mathbf{u}_i)$$

Où  $\omega$  est le poids des contraintes dans la fitness (paramètre de pénalisation). La valeur de ce paramètre est fixée à l'avance par l'utilisateur. On pourra également envisager de faire varier ce paramètre de pénalité dans notre optimisation. Une telle approche requiert l'utilisation d'une boucle extérieure augmentant  $\omega$  chaque fois que l'algorithme converge vers un optimum ne satisfaisant pas les contraintes, et démarrant avec une valeur initiale suffisamment petite pour permettre d'abord une exploration puis l'augmentant ensuite itérativement pour forcer la réalisabilité.

Cette formulation de la fitness permet de ne pas surévaluer la détection de conflits mais aussi, d'avoir une fitness continue. En effet, l'utilisation du nombre de conflits (valeurs entières) entraînait des discontinuités pour la fitness [37].

#### 4.4.4 Opérateur de sélection

L'opérateur de sélection simule le processus de sélection naturelle, en prélevant de bons individus (mais pas uniquement) dans la génération précédente auxquels différents

opérateurs génétiques sont appliquées. La fitness des individus est la seule information nécessaire pour la sélection.

Il existe différents principes de sélection dans la littérature :

- la roulette-wheel selection, pour laquelle chaque individu à une chance proportionnelle à sa fitness d’être sélectionné
- la sélection par rang, pour laquelle les meilleurs individus de la population sont sélectionnés
- la sélection par tournoi stochastique, détaillée ci-dessous.
- la stochastic-remainder-without-replacement selection qui duplique les individus plus ou moins de fois selon leur fitness avant que la sélection ne soit opérée sur cette nouvelle population .

Le tournoi stochastique consiste à tirer aléatoirement  $n$  individus dans la génération précédente pour ensuite sélectionner les  $\mu$  ( $n > \mu$ ) meilleurs. Ce procédé est ensuite répété pour constituer la population intermédiaire. Le rapport (choisi par l’utilisateur) entre  $n$  et  $\mu$  permet de régler la pression sélective. Le choix du tournoi stochastique est motivé par sa robustesse généralement reconnue ; il assure également une bonne diversité de la population au long des générations et évite en général les phénomènes de convergence prématurée [37].

#### 4.4.5 Opérateur de croisement

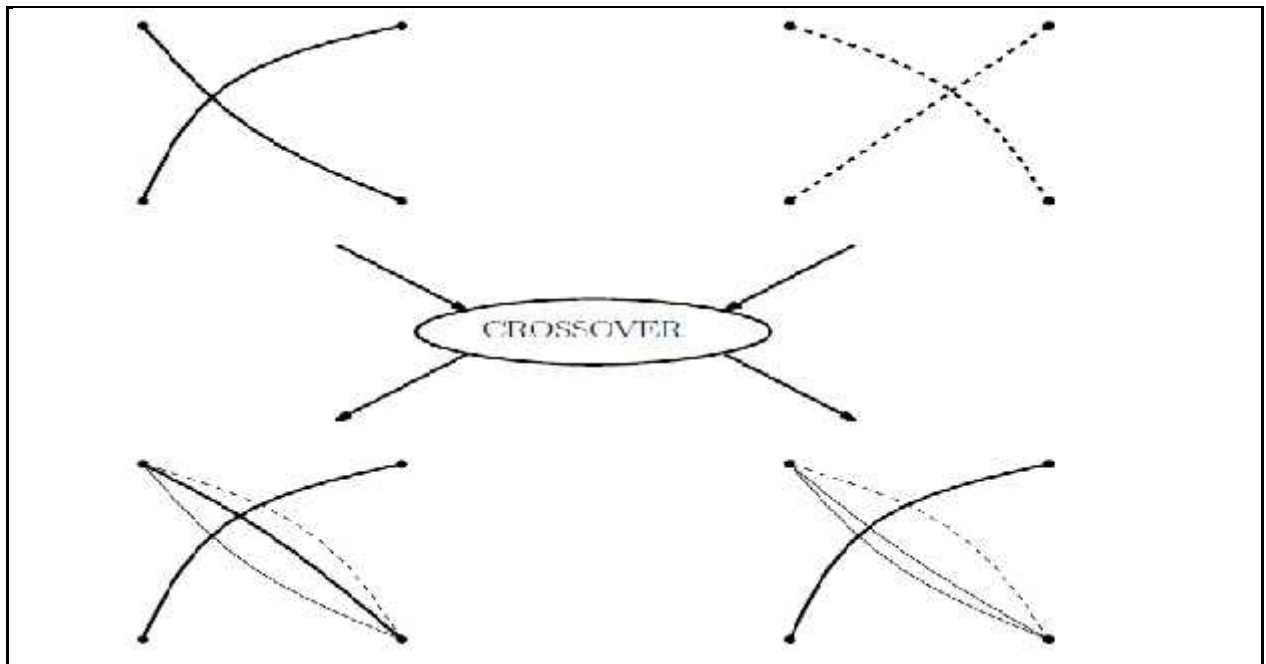
L’opérateur de croisement (ou crossover) a pour rôle d’enrichir la population de solutions par brassage des gènes des bons individus. Pour cela, des chromosomes enfants sont créés à partir de chromosomes parents en manipulant les gènes de ceux-ci. L’efficacité du croisement dépend donc fortement de la structure du chromosome.

Dans notre cas on a utilisé le croisement barycentrique, Ce type de croisement consiste à choisir un gène  $i$  dans chaque parent, et à utiliser deux transformations barycentriques pour obtenir les deux enfants comme suit. Soit  $P_1(i)$  et  $P_2(i)$  les gènes  $i$  de chaque parent et  $E_1(i)$  et  $E_2(i)$  ceux des enfants, le croisement barycentrique s’opère de la sorte:

$$\begin{cases} E_1(i) = \alpha P_1(i) + (1 - \alpha) P_2(i) \\ E_2(i) = (1 - \alpha) P_1(i) + \alpha P_2(i) \end{cases}$$

Où  $\alpha$  est un coefficient de pondération tiré aléatoirement à chaque croisement et déterminé de façon à assurer que les gènes enfants restent dans le domaine autorisé.

Dans notre implémentation, nous avons utilisé le croisement barycentrique puisque nous étudions un problème continu en  $u$ . La figure 4-7 illustre le résultat d'un croisement par une visualisation des trajectoires avant et après croisement.



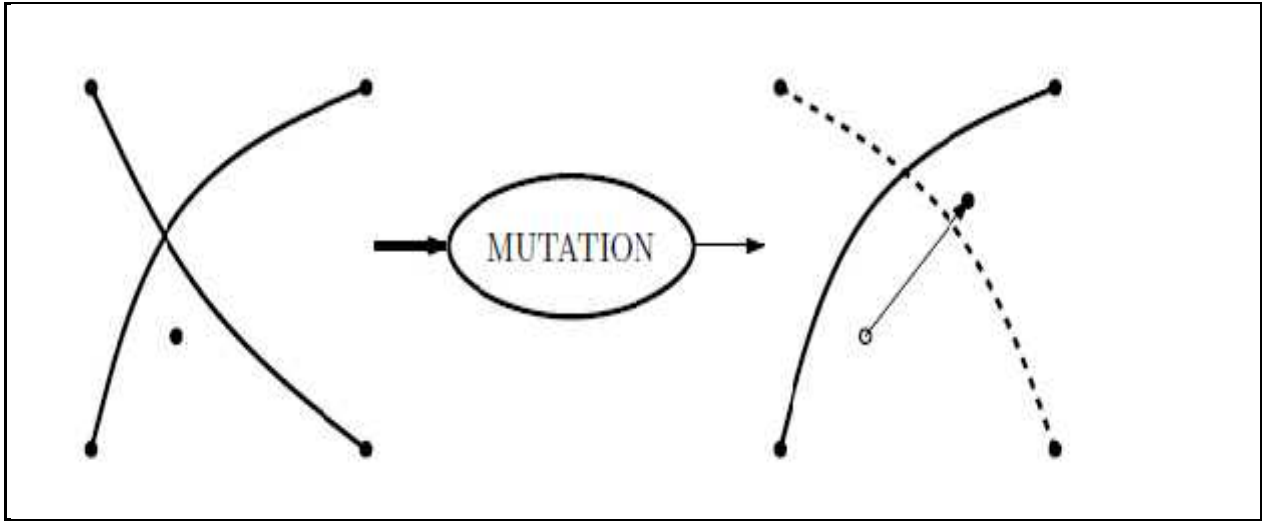
**Figure 4.7** – Trajectoires correspondant aux parents (en haut) et aux enfants issus d'un croisement barycentrique (en bas)

#### 4.4.6 Opérateur de mutation

L'opérateur de mutation, en générant de nouveaux gènes, a pour rôle de permettre d'explorer la totalité (en théorie) de l'espace d'état, ce qui correspond à la propriété d'ergodicité de parcours d'espace, essentielle aux AG pour leurs propriétés de convergence. En effet les preuves théoriques de convergence des AG peuvent fonctionner sans croisement, mais pas sans mutation.

L'opérateur de mutation fonctionne comme suit. Pour les problèmes discrets, un gène du chromosome est tiré aléatoirement et sa valeur est remplacée par une des autres valeurs possibles (tirée aléatoirement elle aussi). Dans le cas des problèmes continus, le gène est également tiré aléatoirement, et remplacé par une valeur aléatoire du domaine d'extension des gènes (espace d'état).

Pour notre problème, nous avons choisi de sélectionner un gène aléatoirement et de remplacer sa valeur par un tirage uniforme sur  $[-1, +1]$ . Notre opérateur de mutation est illustré par la figure 4.8 qui propose les trajectoires avant et après mutation, pour une situation à deux avions [37].



**Figure 4.8** – Trajectoires correspondant à un chromosome avant et après mutation (déplacement du point de contrôle d'une des trajectoires)



# CHAPITRE 5 : REALISATION DE PROGRAMME DE RESOLUTION CONFLIT AERIEN

## 5.1 Introduction

Pour résoudre le problème de l'évitement aérien, on cherche en général à construire des trajectoires sans conflit ayant une forme assez simple pour être facilement transmises et suivies par les pilotes. Dans le présent chapitre nous allons appliquer l'algorithme étudié précédemment.

## 5.2 Présentation d'environnement de développement de l'application

MATLAB est un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données. Le nom dérive de cette représentation : MATLAB = MATrix LABoratory.

Matlab permet de faire des calculs mathématiques 'semi-formels'. Il connaît un grand nombre d'opérations ou de fonctions mathématiques : fonctions usuelles, calcul matriciel et fonctions plus spécifiques.

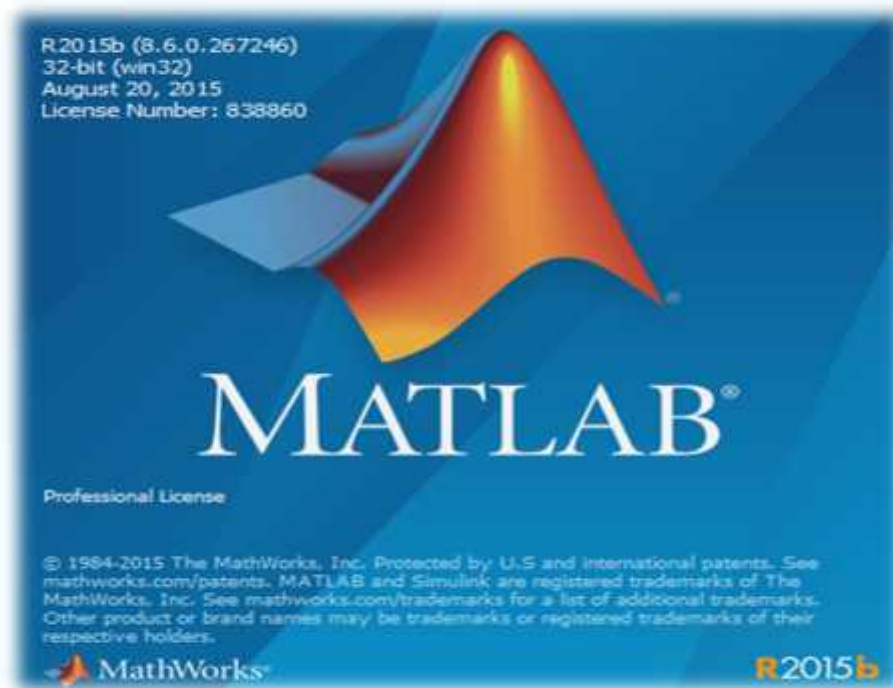
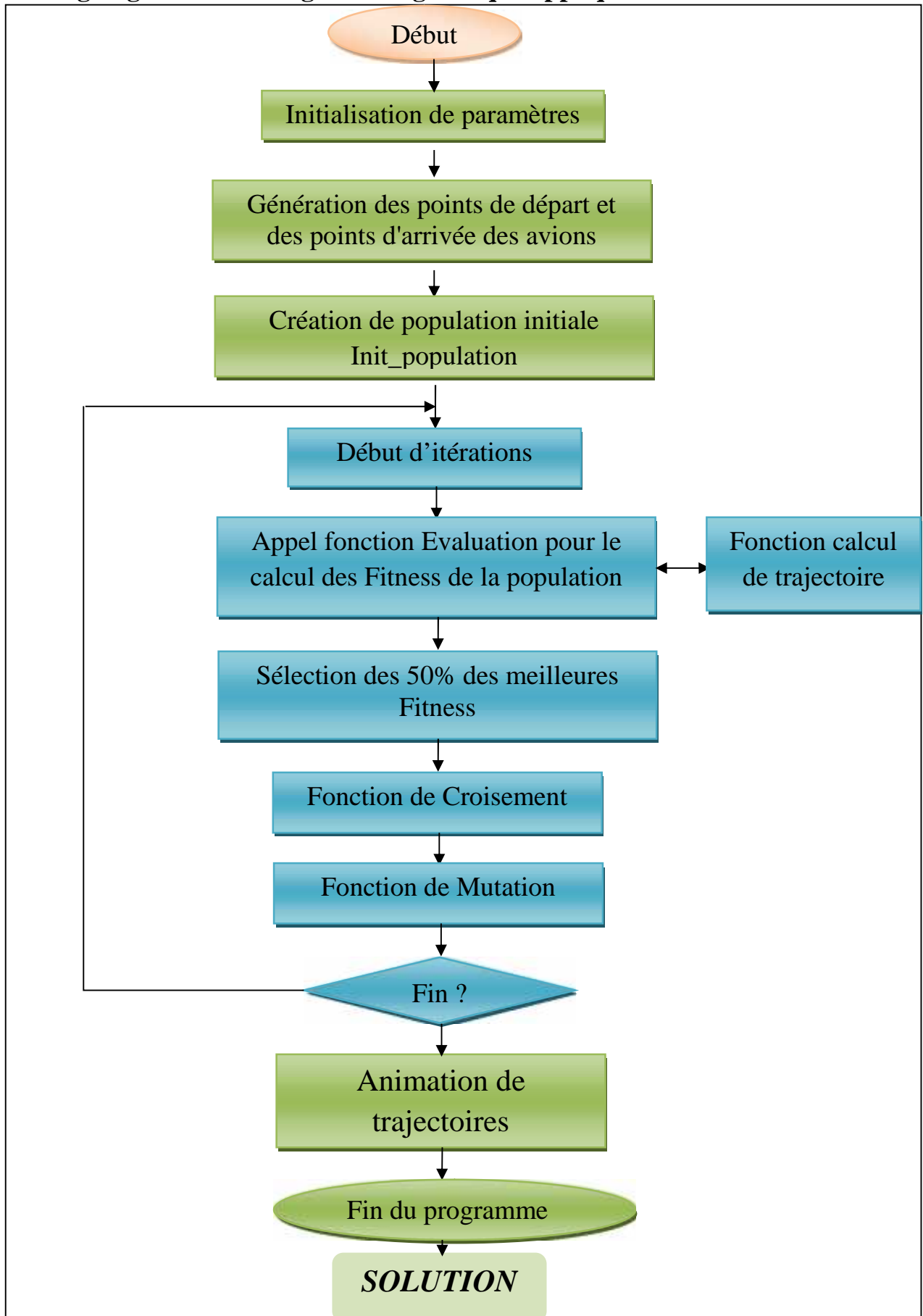


Figure 5.1 : Matlab 2015 utilisé pour le développement de programme

MATLAB étant disponible sur différentes plateformes matérielles. On se retrouve alors dans un environnement dit fenêtre de commande dans lequel on peut écrire des commandes ou exécuter des fonctions. Matlab est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées, Matlab peut aussi être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.

### 5.3 Organigramme de l'algorithme génétique appliqué :



## 5.4 Explication de déroulement de programme

Le programme est conçu pour deux avions. Il comprend :

- Un programme principal (initialisation, appel des fonctions, tracé des trajectoires) ;
- Fitness : fonction pour le calcul de la fitness ;
- Croisement : fonction qui effectue le croisement ;
- Trajectoire : fonction qui calcule les trajectoires des avions ;
- Mutation : fonction qui effectue la mutation des individus.

L'algorithme débute tout d'abord par une initialisation des paramètres. Par la suite et selon le principe du rond-point le programme génère les points de départ et ensuite les points d'arrivées des avions et finalement la création de la population initiale des individus.

Ensuite on commence l'itération n°1 qui représente la première génération;

Cette génération va être évaluée et une valeur de fitness va être affectée pour chaque individu, puis les individus sont triés selon l'ordre croissant de leur fitness (les meilleures fitness au sommet de vecteur);

La moitié des individus (les meilleurs en fitness) seront sélectionnés pour être croisés;

Parmi la population d'individus restantes, des couples sont tirés au hasard et sont croisés pour donner naissance chaque fois à deux individus enfants ayant une partie des gènes de leurs parents et donc une fitness élevée; à la fin du processus de croisement, nous obtenons une population complète d'individus ayant des gènes meilleures que la population précédente.

La génération résultante va être mutée : pour cela une partie de la population est sélectionnée et certains paramètres des individus sont modifiés.

La génération qui est passé epar le croisement et la mutation correspond à la génération suivante. Elle va être évaluée et passer pas ces mêmes étapes de croisement et de mutation jusqu'à ce que le critère d'arrêt de l'algorithme soit satisfait: la solution "optimale" est ainsi trouvée.

### 5.4.1 Initialisation des paramètres de l'algorithme génétique

Nous avons choisi d'étudier pour simplifier uniquement le cas de conflit entre deux avions. L'étude peut être généralisée à un nombre quelconque d'avions.

Nous avons fait aussi l'hypothèse que tous les avions possèdent la même vitesse et nous fixons l'intervalle de temps durant lequel nous résolvons les conflits.

Au début du programme il faut initialiser un certain nombre de paramètres. a titre d'exemple, nous donnons les valeurs suivantes :

Niter =20 : c'est le nombre d'itérations de l'algorithme ;

N = 4\*13 : taille de la population d'individus;

v=100; vitesse des avions en m/s;

dt=1 : le pas du temps ( les résultats plus précis sont obtenus avec des pas plus fins) ;

T = 1200s donc 20 minutes : temps durant lequel nous allons résoudre le conflit ;

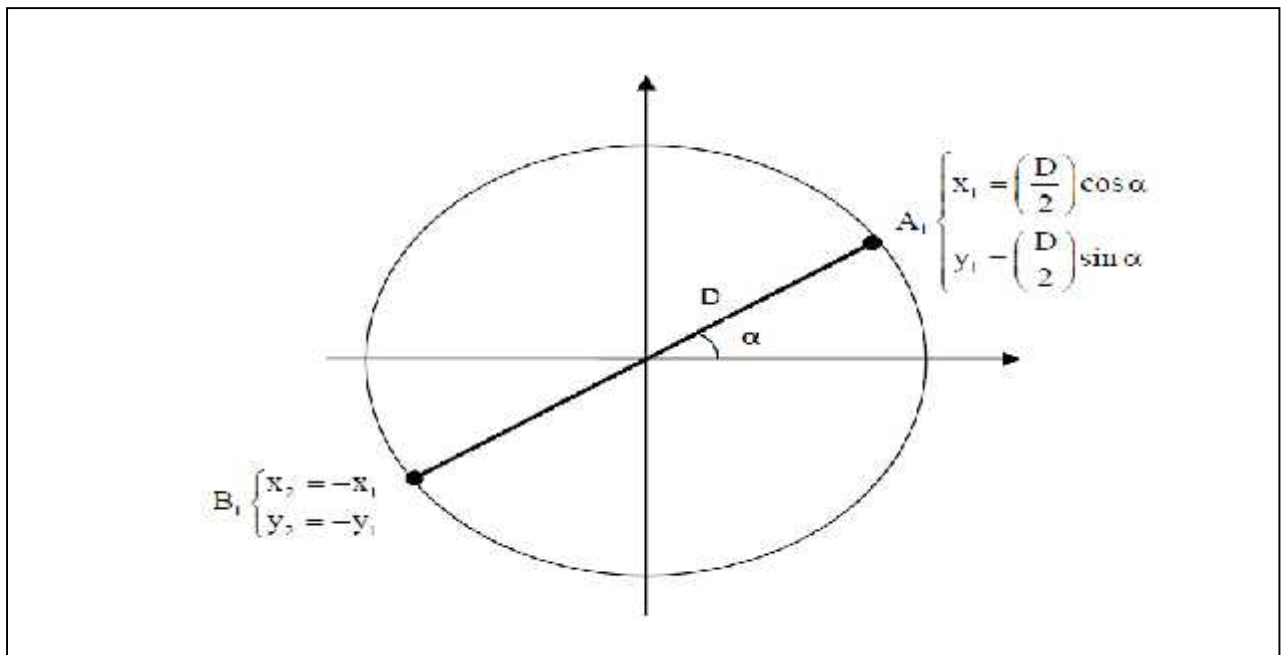
D=v\*T: distance entre le point de départ et le point d'arrivée identique pour tous les avions.

to : distance minimale de séparation entre avions pour éviter un conflit aérien .

#### 5.4.2 Génération de points de départ et d'arrivée des avions

Pour tester l'algorithme, on utilise la technique du rond-point qui consiste à placer les points de départ et d'arrivée sur un cercle et tous les avions convergent vers le centre du cercle. Ce sont les conditions les plus contraignantes.

On doit indiquer au début du programme principal le diamètre D du cercle et l'angle de chaque avion (figure 5-2).



**Figure 5.2** : Exemple de génération de point de départ et d'arrivée d'avions

### 5.4.3 Création de la population initiale

La création de population initiale est réalisée par la fonction "p" qui consiste à former un tableau de N colonnes et de M lignes où N représente le nombre d'individus de la population. Et M représente le nombre des avions, on détermine tout d'abord le paramètre  $u_i$  qui représente le point tournant pour l'avion i en le tirant aléatoirement entre -1 et +1.

ensuite, on détermine  $u_j$  qui représente le point tournant pour l'avion i en le tirant aléatoirement entre -1 et +1.

Tableaux 5-1 et 5-2 ainsi que la figure 5.3 montrent des exemples d'initialisation d'individus de la population.

	u(le point tournant)
Avion N°01	0.6294
Avion N°02	0.8116

	u(le point tournant)
Avion N°01	-0.7461
Avion N°02	0.8268

Tableau 0-1 individus N°1 de la population

Tableau 0-2 individus N°2 de la population

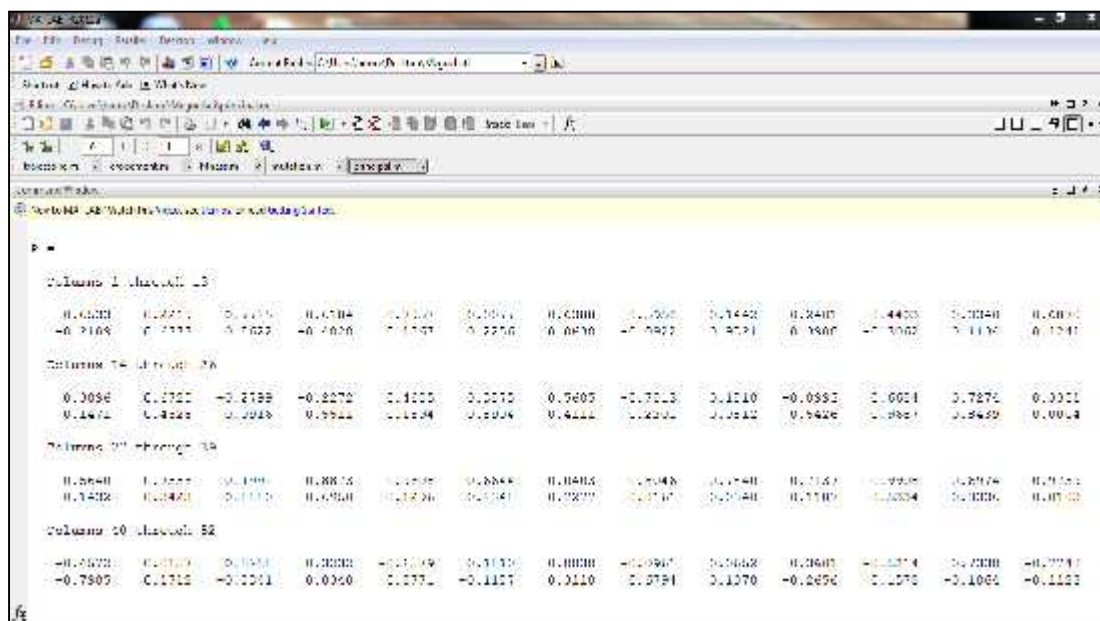
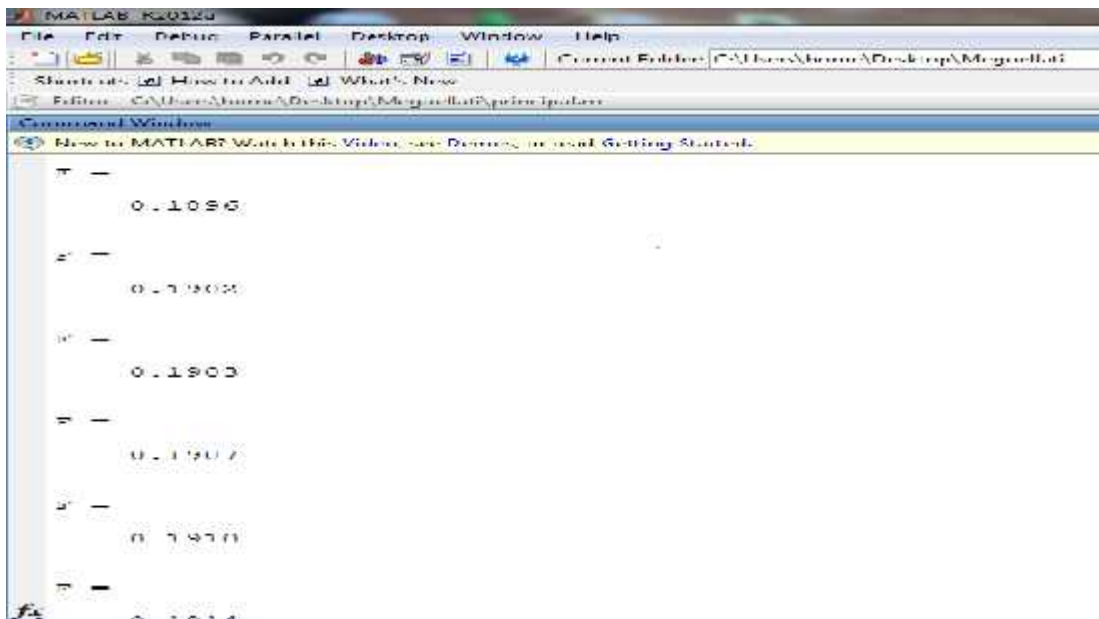


Figure 5.3 : Exemple de simulation de création de population de 52 individus sur MATLAB.

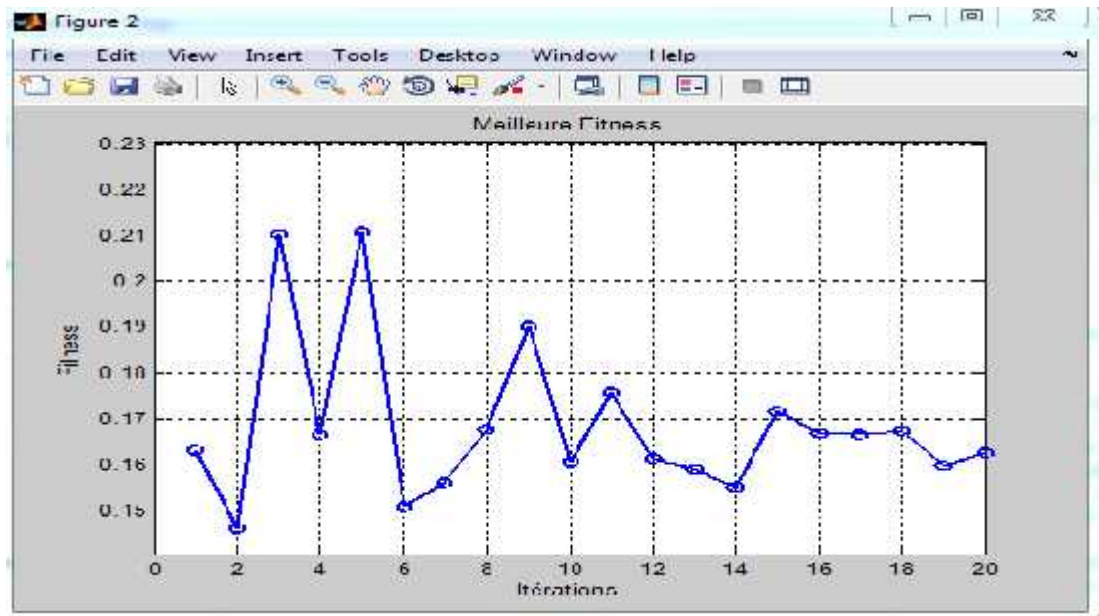
### 5.4.4 La fonction d'évaluation(fitness)

La fonction fitness applique la méthode présentée dans le chapitre 4 (voir partie 4.4.3) et affecte des valeurs de fitness aux individus de la population comme illustré dans la figure 5.4 où on a donné quelques valeurs. Le graphe de la figure 5.5 présent l'évolution

de la meilleure fitness des générations successives et montre ainsi la convergence de l'algorithme.



**Figure 5.4 :** Les valeurs résultant de l'évaluation des individus.



**Figure 5.5 :** L'évolution de la meilleure fitness des générations successives

Dans l'algorithme utilisé, on minimise la fitness à chaque itération elle doit décroître. Donc en principe cette fonction strictement décroissante. La décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais de fait de la mutation elle peut augmenter de temps en temps.

#### **5.4.5 Fonction de croisement et mutation**

Les résultats de l'opération de croisement puis la mutation qui est expliquée déjà au chapitre 4.

#### **5.5 Discussion de différents cas de conflit**

Dans les figures suivantes nous allons présenter un ensemble de configurations différentes de trajectoires afin de mesurer les performances de l'algorithme génétique de résolution des conflits. Pour cela, les points de départ des avions seront pris de plus en plus proche sur le cercle afin de rapprocher les trajectoires.



### 5.5.1 Cas de deux avions

#### ➤ Premier cas : Croisement de trajectoires à 90°

C'est le cas le plus simple, les deux avions suivent deux trajectoires qui se coupent perpendiculairement. Le tableau 5.3 suivant indique les données pour les deux trajectoires.

Avion	X <sub>0</sub> (Nm)	Y <sub>0</sub> (Nm)	°	V (kt)	T(s)	D(Nm)	Pas de calcul (dt)
A	32	0	0	100	20*60	64	1
B	0	32	90				

Tableau 5-3 : Données initiales des deux avions du premier cas

La figure 5-6 montre les deux trajectoires en bleu pour l'avion 1 et en rouge pour l'avion 2. Dans la solution obtenue, on remarque que l'avion 1 exécute un virage vers la droite et l'avion 2 exécute aussi un virage vers la droite.

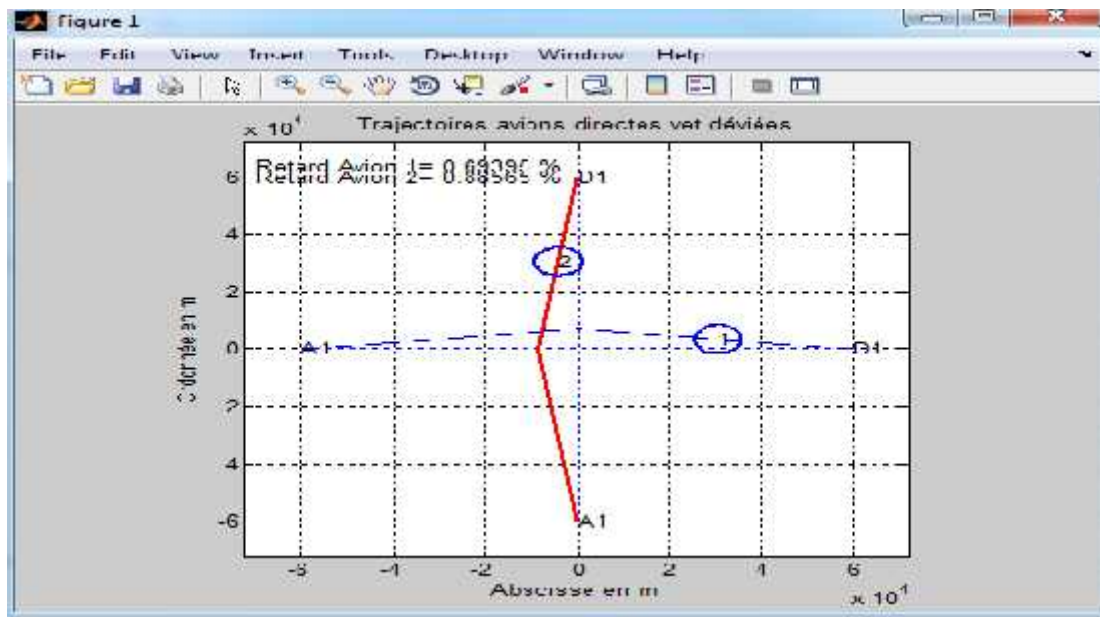
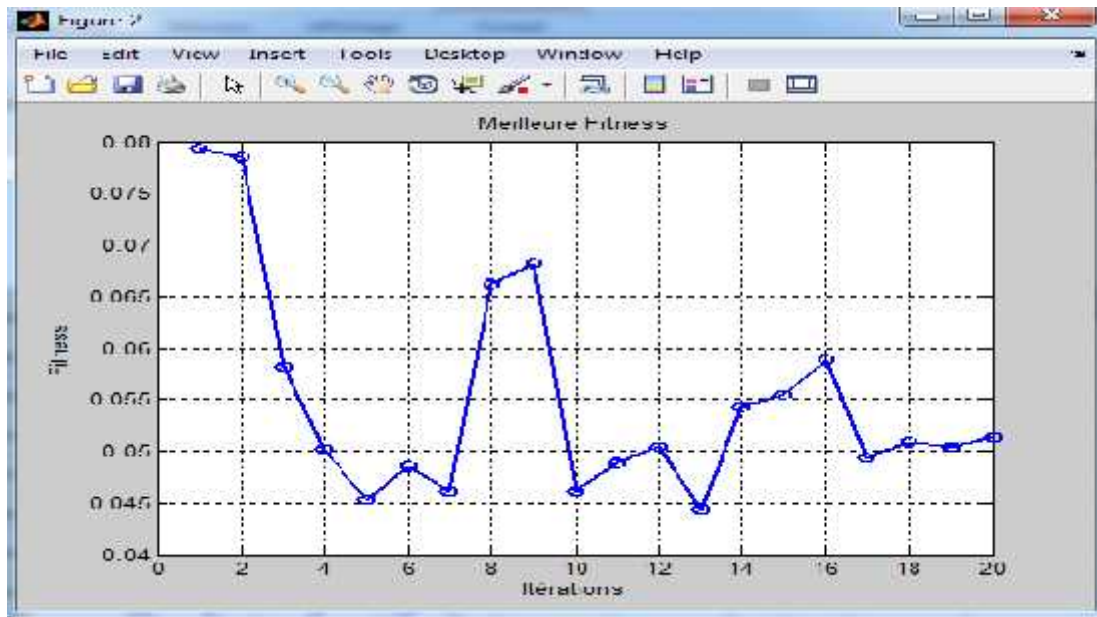


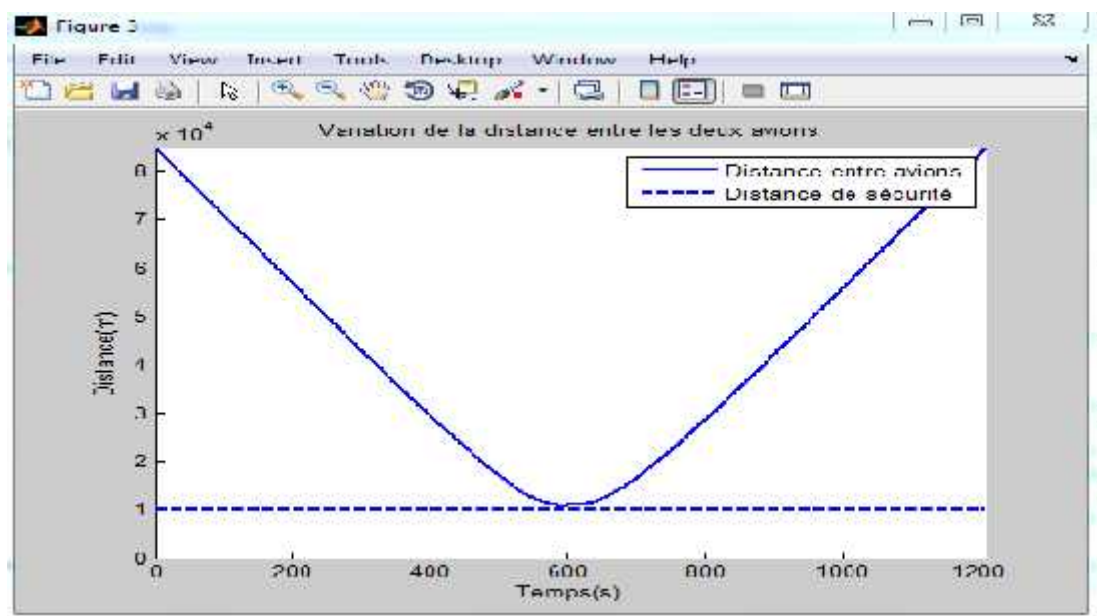
Figure 5-6: Trajectories des deux avions Cas  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$

La figure 5-7 montre l'évaluation de la fitness en fonction des itérations pour  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$ . On remarque que la fitness est décroissante dans les itérations N°(2,3,4,5,7,10,13,15,17,19), cette décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais dans les itérations N°(6,11,12,14,16,18,20) elle est croissante à cause de la mutation.



**Figure 5-7:** la meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de  $\alpha_1=0^\circ$  et  $\alpha_2=90^\circ$

La figure 5-8 montre la variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=0^\circ$  et  $\alpha_2=90^\circ$ . Elle passe par un minimum pratiquement égale à la distance minimale de sécurité de 10000 m (ligne bleu en pointillés) à environ  $t=600s$ . comme cette distance reste toujours supérieure à 10000 m, il n'y a donc aucun conflit.



**Figure 5-8 :** Variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=0^\circ$  et  $\alpha_2=90^\circ$

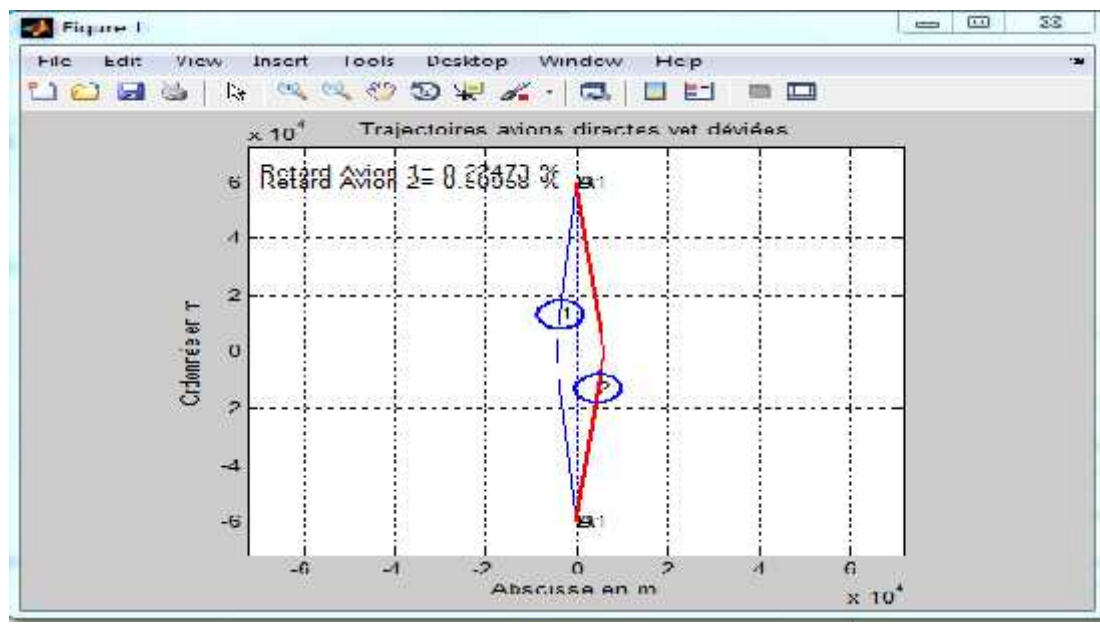
➤ **Deuxième cas : conflit face à face**

Nous présentons maintenant un cas intéressant en pratique où les deux avions suivent la même trajectoire en se dirigeant l'un vers l'autre. Le tableau 5.4 suivant indique les données pour les deux trajectoires.

Avion	X <sub>0</sub> (Nm)	Y <sub>0</sub> (Nm)	(°)	V (kt)	T(s)	D(Nm)	Pas de calcul (dt)
A	0	-32	-90	100	20*60	64	1
B	0	32	90				

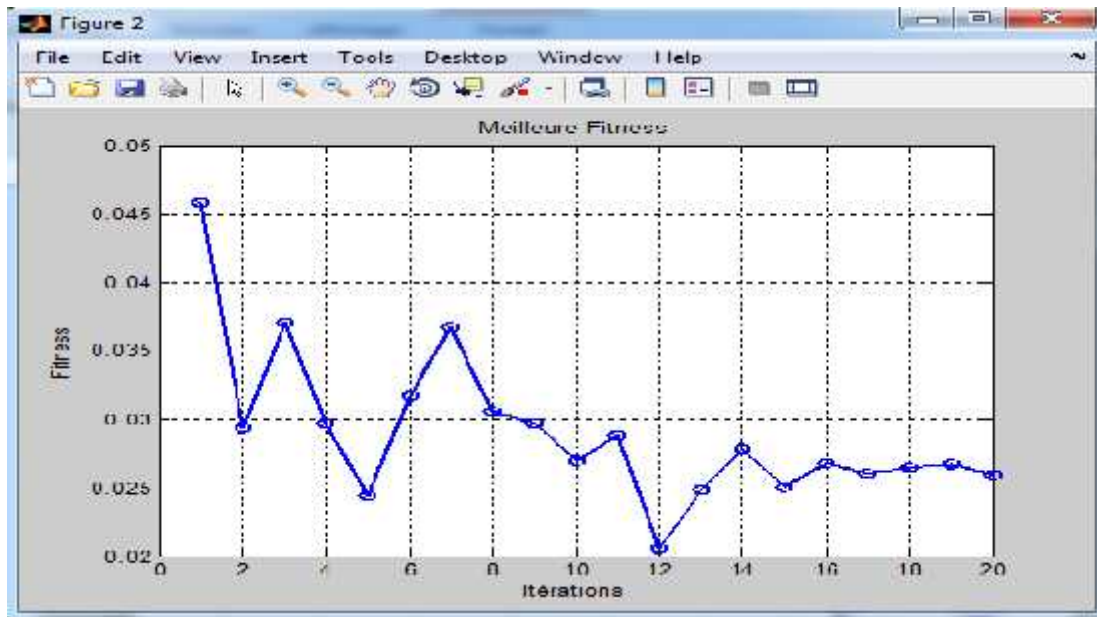
Tableau 5-4: Données initiales des deux avions du deuxième cas

La figure 5-9 montre les deux trajectoires en bleu pour l'avion 1 et en rouge pour l'avion 2. Dans la solution obtenue, on remarque que l'avion 1 exécute un virage vers la droite et l'avion 2 exécute aussi un virage vers la droite.



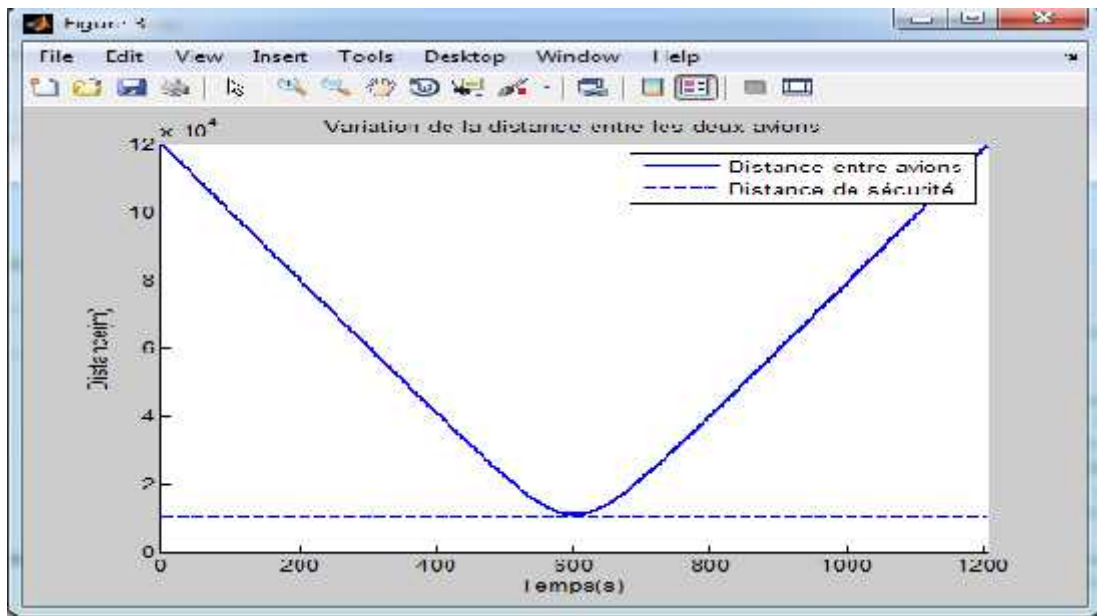
**Figure5-9** : Trajectoires des deux avions Cas  $\alpha_1=-90^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$

La figure 5-10 montre l'évaluation de la fitness en fonction des itérations pour  $\alpha_1=-90^\circ$ ,  $\alpha_2=90^\circ$ . On remarque que la fitness est décroissante dans les itérations N°(2,4,5,8,9,10,12,15,17,20), cette décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais dans les itérations N°(3,6,7,11,13,14,16,18,19) elle est croissante a cause de la mutation.



**Figure 5-10** : La meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de  $\alpha_1 = -90^\circ$  et  $\alpha_2 = 90^\circ$

La figure 5-11 montre la variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1 = -90^\circ$  et  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Elle passe par un minimum pratiquement égale à la distance minimale de sécurité de 10000 m (ligne bleu en pointillés) à environ  $t = 600$ s. comme cette distance reste toujours supérieure à 10000 m, il n'y a donc aucun conflit.



**Figure 5-11** : Variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de

$\alpha_1 = -90^\circ$  et  $\alpha_2 = 90^\circ$

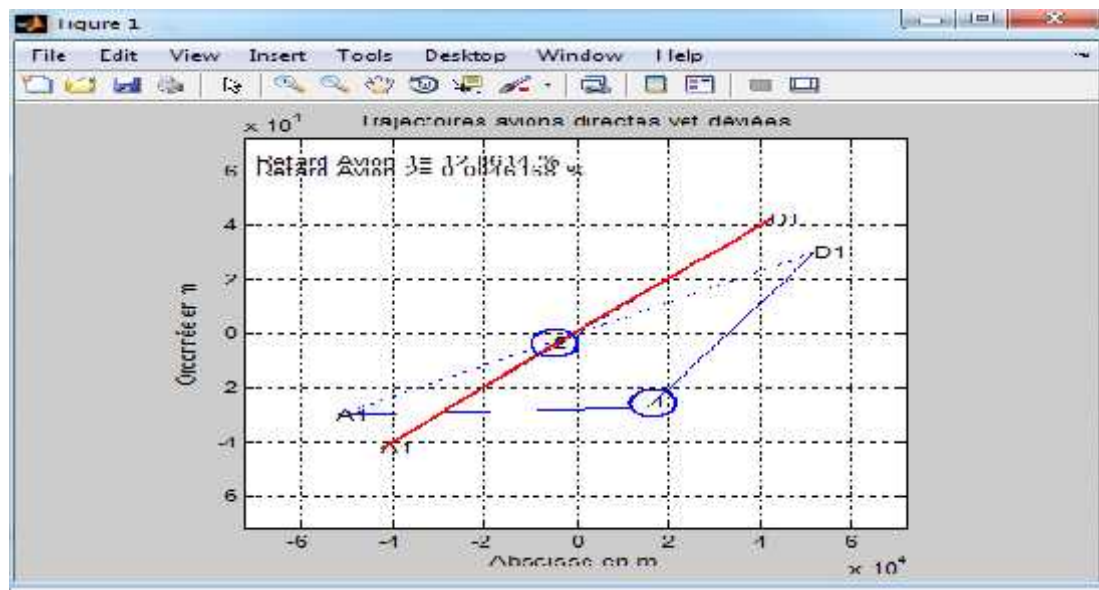
➤ **Troisième cas : convergence avec angle moins de 90°**

Dans ce scénario, les deux trajectoires sont un peu plus proches. Le tableau 5-5 suivant indique les données pour les deux trajectoires.

Avion	X <sub>0</sub> (Nm)	Y <sub>0</sub> (Nm)	(°)	V (kt)	T(s)	D(Nm)	Pas de calcul (dt)
A	28	16	30	100	20*60	64	1
B	23	23	45				

Tableau 5-5: Données initiales des deux avions du troisième cas

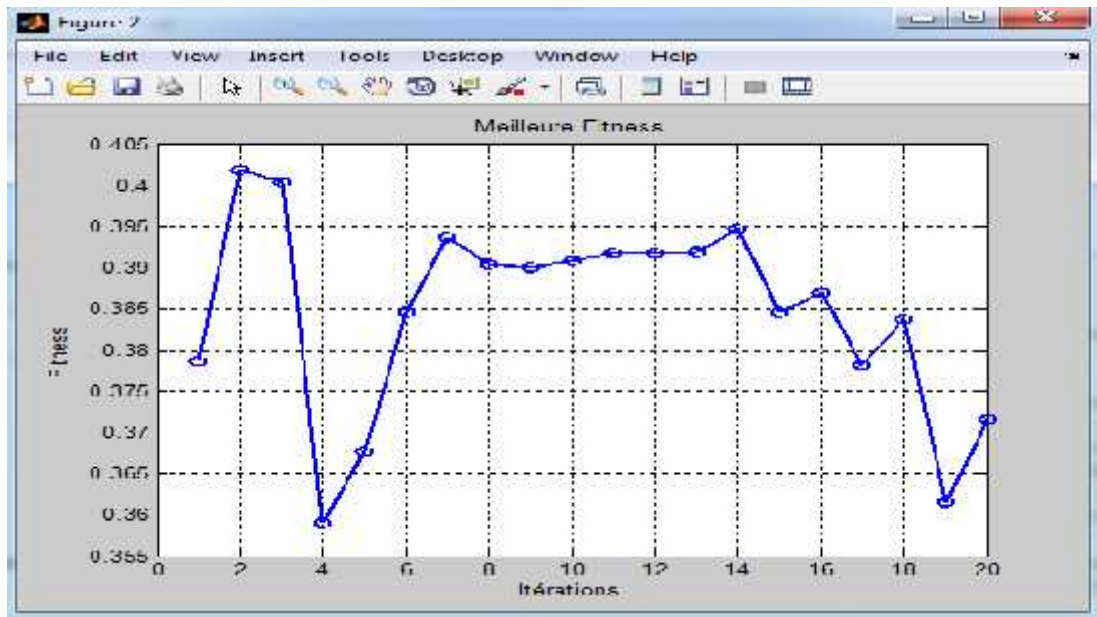
La figure 5-12 montre les deux trajectoires en bleu pour l'avion 1 et en rouge pour l'avion 2. Dans la solution obtenue, on remarque que l'avion 1 exécute un virage vers la gauche, et cette déviation engendre un retard relatif en pourcentage de 12.86%. par contre l'avion 2 ne subit aucune déviation de sa trajectoire.



**Figure5-12:** Trajectoires des deux avions Cas  $\alpha_1=30^\circ$ ,  $\alpha_2=45^\circ$

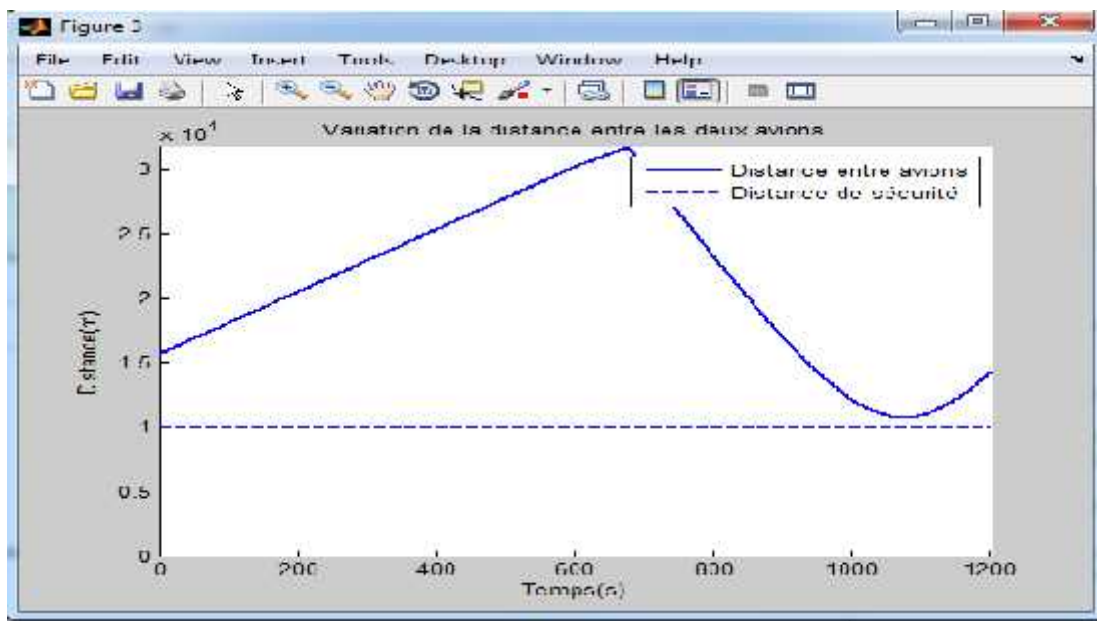
La figure 5-13 montre l'évaluation de la fitness en fonction des itérations pour  $\alpha_1=30^\circ$ ,  $\alpha_2=45^\circ$ . On remarque que la fitness est décroissante dans les itérations N°(3,4,8,9,12,15,17,19), cette décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais dans les itérations N°(2,5,6,7,10,11,13,14,16,18,) elle est croissante à cause de la mutation.





**Figure 5-13:** la meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de  $\alpha_1=30^\circ$  et  $\alpha_2=45^\circ$

La figure 5-14 montre la variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=30^\circ$  et  $\alpha_2=45^\circ$ . Elle passe par un minimum pratiquement égale à la distance minimale de sécurité de 10000 m (ligne bleu en pointillés) à environ  $t=1300s$ . comme cette distance reste toujours supérieure à 10000 m, il n'y a donc aucun conflit.



**Figure 5-14 :** variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=30^\circ$  et  $\alpha_2=45^\circ$

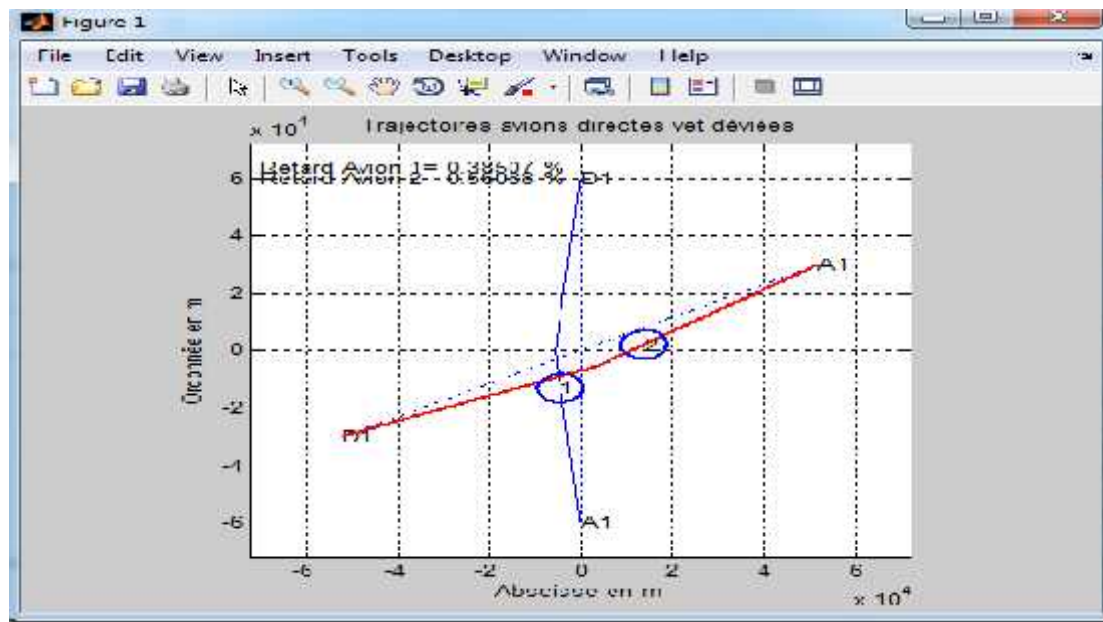
### ➤ Quatrième cas

Le tableau 5-6 suivant indique les données pour les deux trajectoires.

Avion	X <sub>0</sub> (Nm)	Y <sub>0</sub> (Nm)	(°)	V (kt)	T(s)	D(Nm)	Pas de calcul (dt)
A	0	32	90	100	20*60	64	1
B	28	16	210				

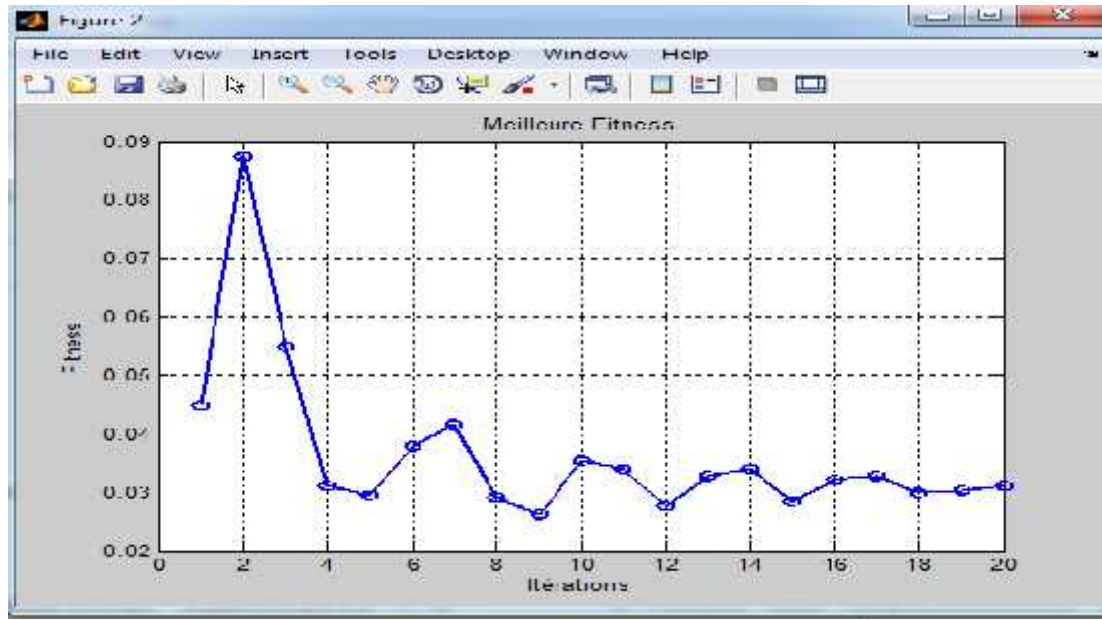
Tableau 5-6: Données initiales des deux avions du quatrième cas

La figure 5-15 montre les deux trajectoires en bleu pour l'avion 1 et en rouge pour l'avion 2. Dans la solution obtenue, on remarque que l'avion 1 exécute un virage vers la droite et l'avion 2 exécute aussi un virage vers la droite.



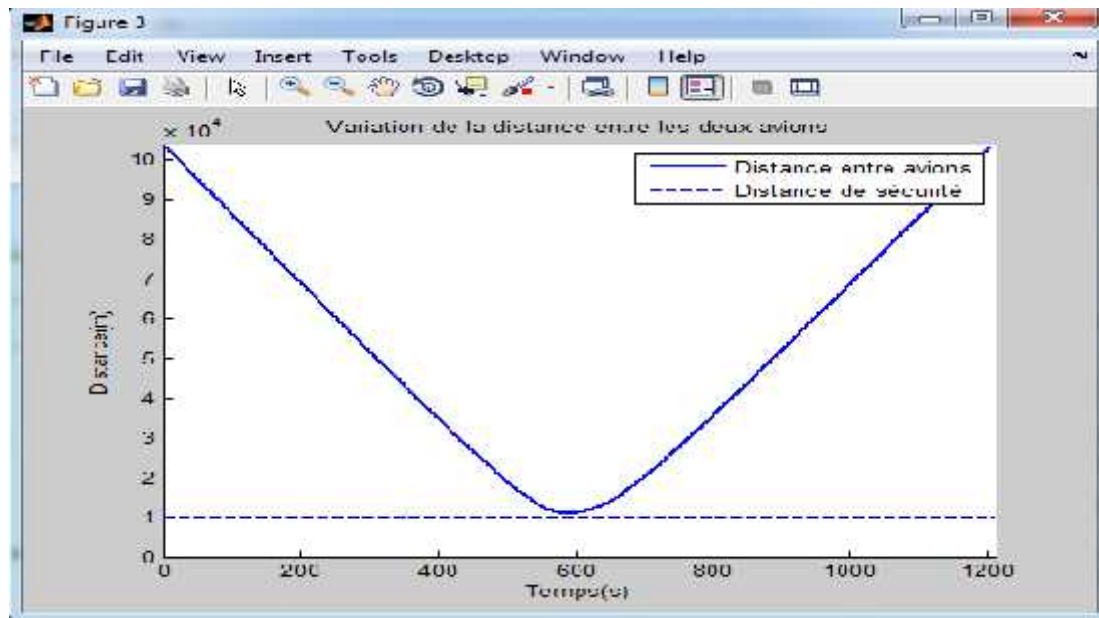
**Figure5-15** : Trajectoires des deux avions Cas  $\alpha_1=90^\circ$ ,  $\alpha_2=210^\circ$

La figure 5-16 montre l'évaluation de la fitness en fonction des itérations pour  $\alpha_1=90^\circ$ ,  $\alpha_2=210^\circ$ . On remarque que la fitness est décroissante dans les itérations N°(3,4,5,8,9,11,12,15,18), cette décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais dans les itérations N°(2,6,7,10,13,14,16,17,19,20) elle est croissante à cause de la mutation.



**Figure 5-16:** la meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de  $\alpha_1=90^\circ$  et  $\alpha_2=210^\circ$

La figure 5-17 montre la variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=30^\circ$  et  $\alpha_2=45^\circ$ . Elle passe par un minimum pratiquement égale à la distance minimale de sécurité de 10000 m (ligne bleu en pointillés) à environ  $t=600s$ . comme cette distance reste toujours supérieure à 10000 m, il n'y a donc aucun conflit.



**Figure 5-17 :** variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=90^\circ$  et  $\alpha_2=210^\circ$



### ➤ Cinquième cas

Le tableau 5-7 suivant indique les données pour les deux trajectoires.

Avion	X <sub>0</sub> (Nm)	Y <sub>0</sub> (Nm)	(°)	V (kt)	T(s)	D(Nm)	Pas de calcul (dt)
A	0	32	90	100	20*60	64	1
B	16	28	300				

Tableau 5-7: Données initiales des deux avions du cinquième cas

La figure 5-18 montre les deux trajectoires en bleu pour l'avion 1 et en rouge pour l'avion 2. Dans la solution obtenue, on remarque que l'avion 1 exécute un virage vers la droite et l'avion 2 exécute aussi un virage vers la droite.

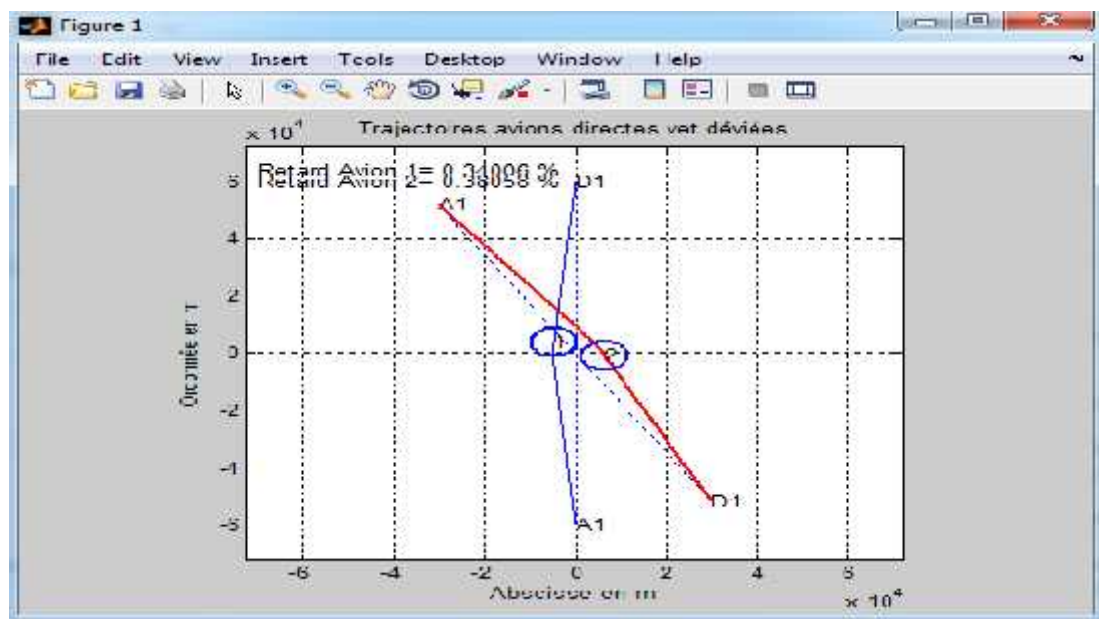
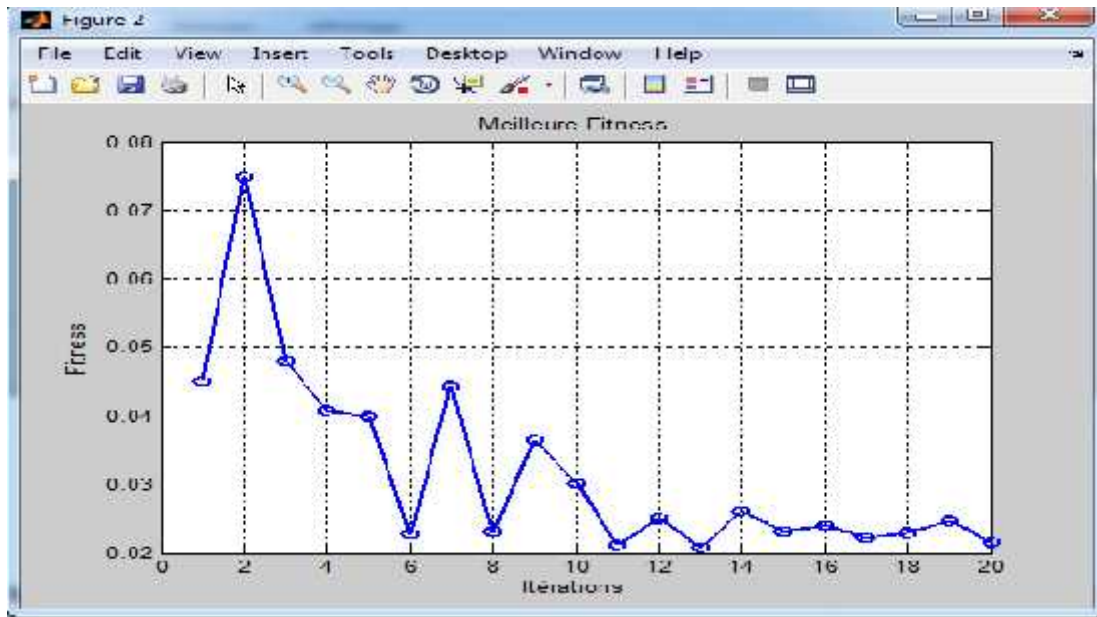


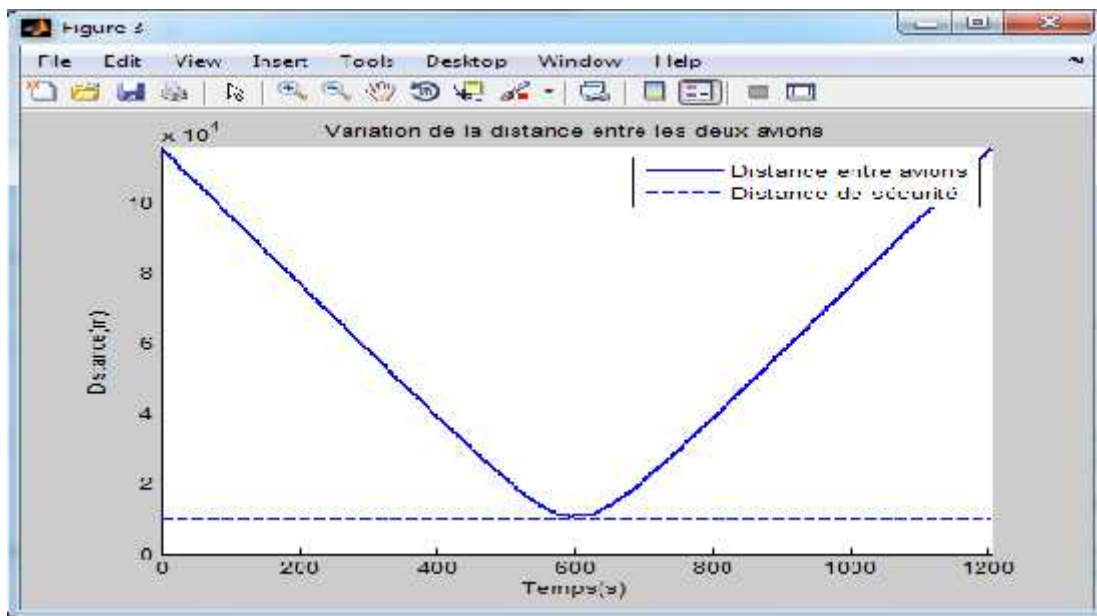
Figure 5-18 : Trajectoires des deux avions Cas  $\alpha_1=90^\circ$ ,  $\alpha_2=300^\circ$

La figure 5-19 montre l'évaluation de la fitness en fonction des itérations pour  $\alpha_1=90^\circ$ ,  $\alpha_2=300^\circ$ . On remarque que la fitness est décroissante dans les itérations N°(3,4,5,6,8,10,11,13,15,17,20), cette décroissance prouve que l'algorithme converge bien, mais dans les itérations N°(2,7,9,12,14,16,18,19) elle est croissante à cause de la mutation.



**Figure5-19** : la meilleure fitness en fonction d'itérations, cas de  $\alpha_1=90^\circ$  et  $\alpha_2=300^\circ$

La figure 5-20 montre la variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=90^\circ$  et  $\alpha_2=300^\circ$ . Elle passe par un minimum pratiquement égale à la distance minimale de sécurité de 10000 m (ligne bleu en pointillés) à environ  $t=600s$ . comme cette distance reste toujours supérieure à 10000 m, il n'y a donc aucun conflit.



**Figure 5-20** : variation de la distance entre les deux avions en fonction du temps cas de  $\alpha_1=90^\circ$  et  $\alpha_2=300^\circ$

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Nicolas Durand. Optimisation de trajectoires pour la résolution de conflits aériens en route. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, Mai 1996.
- [2] J.-M Alliot, T.Schiex, F.Garcia : « Intelligence artificielle et informatique théorique ». 2<sup>ème</sup> édition Cépadues mars 2002. ISBN 2.85428.5786.
- [3] Frédéric Médioni, « Méthodes d'optimisation pour l'évitement aérien : systèmes centralisés, systèmes embarqués ». Thèse doctorat informatique de l'école polytechnique. 11 décembre 1998.
- [4] Xavier Olive, « Résolution de conflits par algorithmes stochastiques parallèles ». Mastère à l'école National supérieur de l'aéronautique et de l'espace, Février à juillet 2006.
- [5] Frédéric Médioni, « Optimisation de la résolution de conflits par algorithmes stochastiques et programmation linéaire ». DEAENAC ,6 juillet 1994.
- [6] Delahaye Daniel, « Optimisation de la sectorisation de l'espace aérien par algorithmes génétiques », Thèse de Doctorat, ENSAE, 1995.
- [7] David Gianazza, « Algorithme évolutionnaire et A\* pour la séparation en 3D des flux de trafic aérien ». Journal européen des systèmes automatisés, volume 38 10/2004.
- [8] Géraud Granger, « Détection et résolution de conflits aériens : modélisation et analyse », Thèse doctorat informatique de l'Ecole Polytechnique 28 octobre 2002.
- [9] Nicolas Barnier, « Automatisation de la gestion du trafic aérien ». Article laboratoire global d'optimisation Europe, 10 mai 2006.
- [10] Pierre-Selim Huard, « Résolution de conflits par régulation en vitesse et ordonnancement ». Master sciences de la modélisation, et de l'information et des systèmes, ENAC Février 2006.
- [11] EUROCONTROL « Stratégie de gestion de la circulation aérienne pour les années 2000 ». Volume 1 2003.
- [12] Alech Nicolas, « Rapport de stage de 3<sup>ème</sup> année ». ENSEEIHT, 15 Juin 1994.
- [13] Manuel d'information aéronautique d'Alger, Circulaire d'information aéronautique, Série A N°01 du 28 Février 2002.
- [14] Nicolas Barnier, « Application de la programmation par contraintes à des problèmes de gestion du trafic aérien ». Thèse de doctorat de l'INPT soutenue le 6 décembre 2002.
- [15] Nicolas Durand, « Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien ». Thèse doctorat informatique INPT, 5 octobre 2004.

- [16] Nicolas Archambault, Gérard Granger and Nicolas Durand, « Heuristiques d'ordonnement pour une résolution embarquée de conflits aériens par une méthode séquentielle ».publication ENAC 2009.
- [17] David Gianzza, « Algorithmes évolutionnaire et A\* pour la séparation en 3 Ddes flux de trafic aérien ».Journal européen des systèmes automatisés année 2005.
- [18] N.Durand et J-B. Gotteland, « A sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes,Volume 2, Hors-série (7 mars 2003).
- [19] Frédéric Koriche, « Colonies de fourmis fourrageuses »,DEA ENAC 2007.
- [20] La lettre de l'académie nationale de l'air et de l'espace, automatisation du transport aérien,n°48 2006.
- [21] Benaissa Rachid, « Détection et resolution de conflits aérien », mémoire de magistère,Institut d'aéronautique, Blida, Septembre 2004.
- [22] Otmani Abouelkacem, « Etude et modélisation de la déssectorisation de l'espace aérien »,PFE Ingénieur, Institut aéronautique, Blida 2005.
- [23] Nicolas Monmarché, « Algorithme de fourmis artificielle :applications à la classification et à l'optimisation ».Thèse de doctorat soutenue le 20 décembre 2000.
- [24] Alliot Jean-Marc, « Techniques d'optimisation stochastiqueappliquées aux problèmes du trafic aérien ». Thèse d'habilitation à diriger des recherches, INPT ,mai 1996.
- [25] Bosc Jean-O.Catoni « Large deviations for Annealing ». Thèse de Doctorat, Unvercité de Paris XI, 1990.
- [26] Fadda Alessandro. « Etude de problèmes inverses par algorithmes d'évolution et réseaux de neurones ». Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, 1998.
- [27] Fron Xavier, Maudry Benard et Tumelin Jean-Claude « Arc 2000 : Automaic Radar Control ». Rapport technique, Eurocontrol, 1993.
- [28] Gaudière Gervais, « Résolution de conflits aériens par réseaux de neurones ».DEA ENAC, 1995.
- [29] Y.Lecun « Modèles connexionnistes de l'apprentissage ». Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 1987.
- [30] Niedringhaus W.P , « Mathematical formulation for planning automated aircraft separation for AERA3» .Rapport technique, FAA, 1989.
- [31] Zeghal Karim, « Techniques réactives pour l'évitement » Rapport technique ,ONERA ,Juin 1993.
- [32] Zeghal Karim, « Vers une théorie de la coordination d'actions.Application à la navigation aérienne » . Thèse de D octorat, Université Paris VI, 1994.

[33] N .Archambeault, « V.N.Duong, E».

[34] J. Dréo, A. Pérowski, P.Siarry, and E.Taillard. « métaheuristiques pour l'optimisation Difficile ». Eyrolle, 2003. ISBN : 2-212-11368-4.

[35] Doc OACI 4444 « procédures pour les services de navigation aérienne ». Quatorzième édition (2001).

[36] David Gianazza, « Optimisation des flux de trafic aérien ». Thèse d'état, Novembre 2004.

[37] Clement Peyronne « Modélisation mathématique et résolution automatique de conflits par algorithmes génétiques et par optimisation locale contenue » thèse de Doctorat à l'université de Toulouse et l'école nationale de l'aviation civile 12/12/2012.

[38] Nicolas Durand « Heuristiques d'ordonnancement pour une résolution embarquée de conflits aériens par une méthode séquentielle ».

## Conclusion générale

L'étude qui a été réalisée dans ce travail tend à montrer qu'une automatisation est aujourd'hui possible sur un plan purement technique. Les outils disponibles( GPS, FMS de dernière génération, Data-Link, puissance de calcul ....etc), permettraient certainement d'aider à réaliser une automatisation en s'affranchissant à peu près totalement de toute intervention humaine.

En revanche, le problème de la transition vers un tel système est loin d'être résolu. Car ce problème a de multiples facettes : psychologiques (un passager accepterait-il de monter dans un avion automatisé), sociale, et également technique (basculement d'un système à un autre qui est de nature radicalement différente).

L'algorithme génétique peut être utilisé pour trouver la solution optimale de n'importe quel problème. Nous l'avons appliqué pour trouver la trajectoire optimale entre un point de départ et un point de destination, en évitant tout obstacle de n'importe quel type surtout mobile (avion dans notre cas), en minimisant la distance, le temps ou/et la consommation.

D'après les différentes études et simulations qu'on a faites dans ce travail, l'algorithme génétique utilisé peut représenter une technique fiable pour la résolution de conflits, tout en respectant la contrainte du coût minimum (le chemin optimal et retard minimal).

Comme perspectives on peut dire que l'intégration de ce code dans le système d'avion, peut être applicable, en ajoutant d'autres contraintes (comme l'ordonnement) et rendre ce dernier autonome pour prendre en charge la résolution de conflits avec une consommation minimum du carburant.