



**MEMOIRE de MASTER**  
En  
**MATHEMATIQUES**

**Spécialité** : Recherche opérationnelle  
**Option** : aide à la décision

**THEME**

Optimisation d'atterrissage des avions sur  
une plate-forme aéroportuaire à dense trafic

Présenté par :  
**Mezahem Sarah**  
**Kaidi Massilia**

Devant le jury composé de :

<b>Nom et prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
Ouanes Mohand	Professeur	Président
Guettaf Rabe	MAA	Encadreur
Aouane Mohouhand	MAA	Examineur

Soutenu le 06-10-2019

## ***Remerciements***

*Tout travail de recherche n'est jamais totalement l'œuvre d'une seule personne, à cet effet, je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance et mes vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance au directeur de ce mémoire Mr. Rabah Guettaf pour l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer au cours de son encadrement.*

*Ensuite à Messieurs les membres du jury qui ont eu l'amabilité d'accepter d'évaluer ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents ma famille, mes amis, à la mémoire de ma grand-mère qui a été toujours dans mon esprit et dans mon cœur.*

Mezahem Sarah

## *Remerciements*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Monsieur Guettaf Rabah. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.*

*Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes sœurs, et mon frère, pour leurs encouragements.*

*Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

Kaidi Massilia

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	6
<b>1. Position du problème :</b> .....	7
<b>1.1. L'environnement aéroportuaire :</b> .....	8
1.1.1. Introduction .....	8
1.1.2. Infrastructures aéroportuaires .....	8
1.1.3. Le trafic aéroportuaire .....	11
<b>1.2. Gestion du trafic aérien :</b> .....	13
1.2.1. Introduction .....	13
1.2.2. Gestion de l'espace .....	13
1.2.3. Le contrôle du trafic aérien .....	15
<b>1.3. Les conflits entre les avions :</b> .....	17
1.3.1. Détection des conflits .....	17
1.3.2. Résolution des conflits.....	20
<b>1.4. La congestion :</b> .....	23
1.4.1. Les causes de congestion.....	23
1.4.2. Traitement de la congestion.....	24
<b>1.5. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM :</b> .....	25
1.5.1. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM aux USA .....	25
1.5.2. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM dans le reste du monde ....	26
<b>2. Modélisation du problème :</b> .....	28
<b>2.1. Contraintes d atterrissages normaux :</b> .....	29
2.1.1. Introduction .....	29
2.1.2. Le choix de la piste pour l'atterrissage.....	29
2.1.3. Le contrôle des aéronefs à l'arrivée.....	30
<b>2.2. Contraintes d'atterrissages d'urgences</b> .....	31
<b>2.3. Différentes décision à prendre pour l'atterrissage :</b> .....	34
2.3.1. Ordre de priorité pour l'atterrissage .....	34
2.3.2. Comment se passe une descente d'urgence .....	35

<b>3. Résolution du problème</b> .....	36
<b>3.1. Ordre de priorités d'atterrissage d'urgence</b> .....	37
<b>3.2. Algorithme d'optimisation atterrissage</b> .....	38
<b>Conclusion</b> .....	52
<b>La Bibliographie</b> .....	53

## **Introduction générale :**

La recherche opérationnelle est une science qui étudie et résout des problèmes économiques (mathématiquement), elle regroupe l'ensemble des méthodes et techniques rationnelles visant à trouver la meilleure décision ou résultat possibles. C'est ce qu'on appelle "aide à la décision", dans la mesure où elle analyse, modélise et résout une situation complexe pour permettre au décideur d'évaluer et de choisir la solution la plus efficace.

Apparue juste avant la seconde guerre mondiale dans le domaine militaire, la recherche opérationnelle a vu son champ d'application s'élargir au milieu économique, industriel, agricole...

Pour notre part, cette analyse s'est étalée sur le domaine de l'aéronautique plus précisément la tour de contrôle afin d'aider le contrôleur aérien à prendre une décision concernant l'atterrissage des avions sur une plateforme aéroportuaire à dense trafic.

Ce document est divisé en trois parties : la première partie comprend un aperçu sur l'environnement aérien et ses infrastructures, les problèmes auxquels sont confronté le transport aérien et les fournisseurs des services de l'ATC (Air Traffic Control) et de l'ATM (Air Traffic Management).

La seconde partie se compose de notions qui caractérisent la phase d'atterrissage.

Enfin la dernière partie on a élaboré un algorithme qui prend en considération la pluparts des situations possible de l'arrivée d'un avion et prise de décision qui aidera le contrôleur de la tour de contrôle.

# **Chapitre 1 : Position du problème**

Notre problème consiste à faire atterrir des avions sur une plateforme aéroportuaire à dense trafic. Pour cela on doit prendre en considération toutes les situations possibles (problèmes liés à l'atterrissage) d'une arrivée d'un avion.

On établira un algorithme qui doit prendre en compte toutes les difficultés qu'un avion rencontrera lors de la procédure d'approche avec ordre de priorité d'atterrissage.

Au passage on liera, les problèmes de congestion, des retards et d'atterrissages suivant les normes de l'OACI (Organisation internationale de l'Aviation Civile) [13].

## **1.1. L'environnement aéroportuaire**

### **1.1.1 Introduction :**

La connaissance de l'environnement aéroportuaire et des procédures qui lui sont rattachées permet de mieux comprendre les modalités d'écoulement du trafic aérien au sol : l'objectif est de fournir une description de tous les équipements qui pourraient être utilisés sur un aéroport et de donner un aperçu général des conditions de circulation des aéronefs et des toutes contraintes qui doivent être considérées lors de la conception d'un simulateur de trafic aéroportuaire.

### **1.1.2 Infrastructures aéroportuaires :**

D'une manière très générale, les infrastructures d'un aéroport se divisent en trois catégories principales, qui s'utilisent de manières très différentes : les aires de stationnement, les aires de piste, et les voies de circulation qui les relient. [1]

#### **1.1.2.1 Postes de stationnement :**

La circulation des avions dans les aires de stationnement se caractérise par des vitesses très faibles : la proximité des bâtiments et des autres avions impose un suivi précis des tracés au sol.

Les postes de stationnement (ou parkings) d'un aéroport sont regroupés par la proximité aux *terminaux*, eux même regroupés en *aérogares* et deux principaux types de stationnement peuvent être distingués :

– **Les parkings reliés à une passerelle d'accès** : ils facilitent l'embarquement et le débarquement des passagers et simplifient les opérations de traitement au sol de l'avion, ce qui permet de minimiser le temps d'escale.

– **Les parkings non connectés aux installations** : l'accès à l'avion se fait par l'intermédiaire d'un *transbordeur*. Ces parkings sont plus souvent utilisés pour des vols longs courriers (la perte de temps à l'embarquement leur est moins dommageable) ou pour le transport de marchandises.



La sortie du parking peut en revanche s'effectuer par une manœuvre autonome de l'avion, en marche avant.

Des normes officielles fixées par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), imposent des marges de sécurité et définissent les types géométrie du parking, de ses voies d'accès et de la présence d'éventuels systèmes d'aide au guidage de l'avion. Certaines installations peuvent être configurables : la disponibilité d'un parking dépend alors de l'occupation des parkings voisins.

#### 1.1.2.2 Pistes :

L'utilisation des pistes d'un aéroport est caractérisée par des vitesses élevées et des procédures (de décollages et d'atterrissages) qu'il est impossible d'interrompre : des *aires de piste* délimitent un espace protégé dans lequel aucun mobile ne doit s'engager sans autorisation. Ces aires sont généralement définies par des zones rectangulaires axées sur la piste, dont l'écartement est fixé par des normes officielles, en fonction des équipements et des conditions d'exploitation de l'aéroport (les écartements à l'axe de piste couramment admis sont 90 mètres par *beau temps* et 150 mètres en conditions météorologiques *dégradées*).

En pratique, les aires de piste sont matérialisées par des voies d'accès particulières, appelées bretelles d'entrée ou de dégagement de la piste :

– **Les bretelles d'entrée (ou de traversée) de la piste** sont caractérisés par un point d'arrêt obligatoire, signalée par un marquage au sol et des panneaux spécifiques : le pilote doit attendre l'autorisation explicite du contrôle avant de franchir ce point.

– **Les bretelles de dégagement** se divisent en plusieurs catégories, selon la vitesse maximale autorisée à l'entrée de la bretelle après (ou pendant) l'atterrissage : certaines sont notamment *rapides*, car elles permettent d'expédier la libération de la piste avant que la phase de freinage de l'avion soit totalement achevée.

Comme pour les parkings, des normes et des procédures d'exploitation déterminent les types d'avions autorisés à utiliser chaque piste, en fonction de sa largeur, sa longueur et de ses bretelles d'accès. Les pilotes portent la responsabilité finale du choix de la piste, en fonction des performances de l'avion (qui dépendent notamment de son poids, de l'altitude et de la température).

#### 1.1.2.3 Voies de circulation :

Les grandes plateformes aéroportuaires sont caractérisées par des voies de circulation (ou *taxiways*) complexes, matérialisées par des tracés au sol continus :

– Chaque portion est nommée, ce qui permet de décrire un chemin à suivre par une succession de portions à emprunter.

– Des panneaux de signalisation informent les pilotes des particularités liées à chaque zone de l'aéroport et les guident tout au long de leur cheminement. En règle générale, aucune notion de priorité ni de limitation de vitesse n'est précisée : le séquençage des avions à une intersection relève du contrôle au sol et les avions doivent rouler « au pas ».

Là encore, des normes définissent les marges de sécurité et les types d'avions autorisés à circuler sur chaque portion de *taxiway*, en fonction de la largeur de la voie et de sa proximité à certaines installations. Certaines voies peuvent également être dépendantes, dans la mesure où

l'accessibilité de l'une se définit en fonction de l'utilisation des autres et des types d'avions concernés.

#### 1.1.2.4 Autres aménagements :

De nombreux aménagements particuliers peuvent être entrepris sur les grandes plateformes, au niveau des parkings, des *taxiways* ou des pistes pour améliorer la gestion du trafic. Deux d'entre eux sont très répandus et interviennent directement dans la définition de la capacité de l'aéroport :

– **Les aires d'attente** permettent d'isoler certains avions du reste du trafic, pour modifier l'ordonnancement des avions sur certains axes de circulation ou pour gérer toute sorte de problèmes techniques. Elles se matérialisent par des espaces libres nommés, qui s'avèrent très utiles au séquençage optimisé des mouvements sur la piste et autour des parkings.

– **Les aires de dégivrage** sont indispensables au maintien du flux de départ dans certaines conditions météorologiques dégradées : les avions y sont recouverts d'un produit antigivre pour assurer leur décollage. L'effet du produit n'est bénéfique que pendant un temps limité, de l'ordre d'un quart d'heure (passé ce délai, le décollage devient impossible). Le dégivrage de l'avion ne peut donc se faire au parking que si l'avion est sûr de pouvoir décoller dans le temps imparti. Sinon, seule l'utilisation de ces aires, situées près des pistes, permet le décollage de l'avion. Dans tous les cas, la gestion des opérations de dégivrage des avions s'avère extrêmement délicate car elle cause des retards considérables.

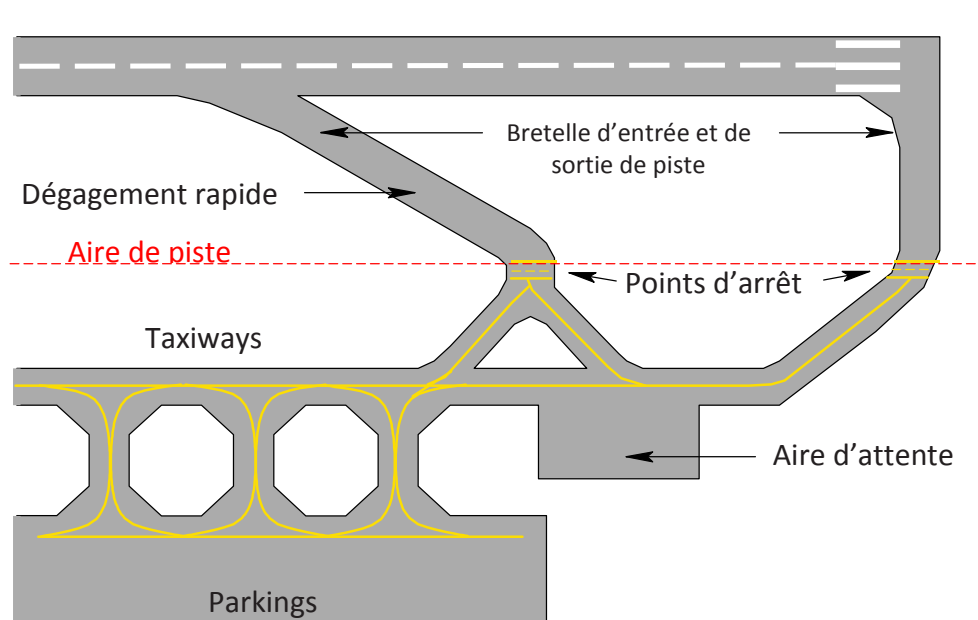


FIG 1 – Infrastructures aéroportuaires

## 1.1.3 Le trafic aéroportuaire :

### 1.1.3.1 Contrôle d'aéroport :

La grande diversité des opérations au sol nécessite souvent la coexistence de différentes positions de contrôle au sein d'un même aéroport : [1]

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

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

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

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

### 1.1.3.2 Capacité d'un aéroport :

Comme toute portion de l'espace aérien, un aéroport admet une capacité : l'ensemble du dispositif mis à la disposition des compagnies aériennes (installations et système de contrôle) aboutit à un débit maximal d'avions pouvant être traité [1]. Différentes définitions de la capacité d'un aéroport sont distinguées :

**La capacité théorique de l'aéroport** est le nombre de mouvements que le dispositif aéroportuaire pourrait idéalement écouler durant un temps spécifié sans tenir compte de la qualité de service (figure 2). Cette capacité correspond donc à un seuil ultime ou de saturation qu'il est en pratique impossible d'atteindre.

**La capacité opérationnelle (ou pratique)** correspond au débit maximal que l'aéroport peut réellement écouler, sans que la qualité de service en soit dégradée au delà d'un seuil fixé (figure 2). Ce seuil correspond en pratique à un niveau de sécurité requis (respect des règles de la circulation aérienne) et à un retard moyen ne devant pas être dépassée (3 à 4 minutes par avion par exemple). En général, cette capacité peut se déduire directement de l'analyse du trafic réel et de ses retards

**La capacité de programmation** est la capacité affichée officiellement : elle est utilisée pour limiter le trafic aéroportuaire en amont, lors de l'attribution des créneaux aux compagnies. La différence entre la capacité de programmation et la capacité opérationnelle correspond à une marge de fonctionnement. Elle est relative aux incertitudes existant sur la demande : cette marge est d'autant plus importante que la demande finale de trafic dépasse la demande formulée lors la programmation. [1]

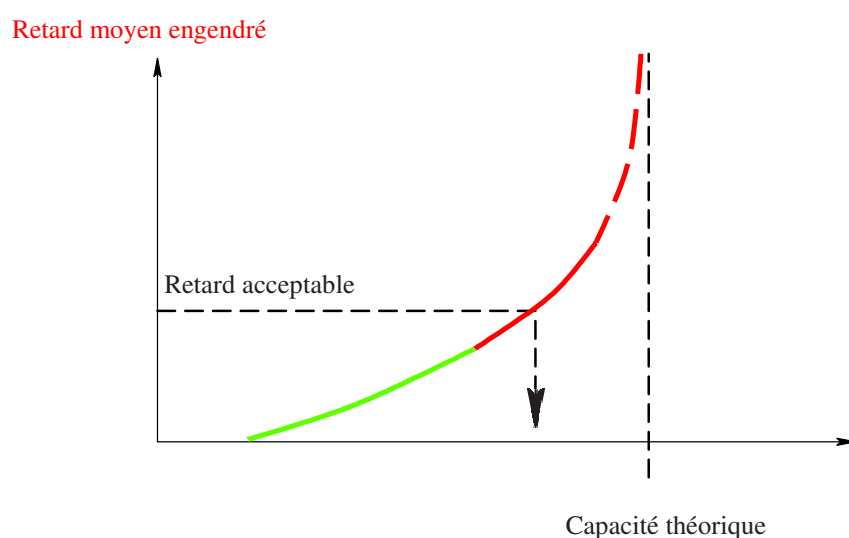


FIG. 2 – Capacité(s) de l'aéroport

## 1.2. Gestion du trafic aérien

### 1.2.1 Introduction :

La gestion du trafic aérien (en anglais Air Traffic Management ou ATM) est l'ensemble des activités menées pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic aérien. Cette gestion du trafic aérien s'est lentement organisée, pour se diviser aujourd'hui en grands modules : la gestion de l'espace aérien et le contrôle du trafic aérien.

### 1.2.2 La gestion de l'espace aérien :

#### 1.2.2.1 Mode de vol :

Les vols peuvent être classés en deux catégories, selon le niveau d'équipement des appareils et les qualifications des pilotes :

**Vol VFR** (Visual Flight Rules) : Les avions de la catégorie VFR doivent assurer eux-mêmes leur séparation les uns par rapport aux autres par des moyens visuels. C'est un type de vol plus adapté à l'aviation de tourisme, où la règle de base pour la séparation entre avions et l'évitement d'obstacle est « voir et éviter ». [2]

**Vol IFR** (Instruments Flight Rules) : C'est le service de contrôle aérien qui assure la séparation des avions de cette catégorie avec les autres vols, Le pilote utilise ses instruments source de connaissance de l'environnement (avion de ligne et d'affaires en générale).

#### 1.2.2.2 La classification des espaces aériens :

Les espaces aériens sont catégorisés en plusieurs classes (de A à G) qui permettent de distinguer quels services fournis à quels types de vols :

#### \*Espaces aériens contrôlé :

**Classe A** : ils se trouvent au dessus du niveau de vol 180 FL (FL 180 correspond à une altitude de 18000 pieds) ; uniquement les vols IFR qui sont autorisés.

**Classe B** : tous les vols sont admis et contrôlés.

**Classe C** : tous les vols sont admis, mais seul les vols IFR/IFR ou IFR/VFR qui sont contrôlés.

**Classe D** : tous les vols sont admis, mais seul les vols IFR/IFR qui sont contrôlés.

**Classe E** : il s'agit de l'espace contrôlé situé en dessous du niveau de vol 180 et loin des aéroports.

**\*Espaces aériens non contrôlé :**

**Classe F et classe G :** espace non contrôlé. Les vols ne sont pas connus par des services de contrôle.

Classe	Type de Vol	Séparation	Contact avec le Contrôleur	Clairance Nécessaire	Limitation de Vitesse
<b>A</b>	IFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS (Indicated Air Space) sous 10000 ft/FL 100
<b>B</b>	IFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
	VFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
<b>C</b>	IFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
	VFR	Séparation VFR/IFR Information de trafic VFR/VFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
<b>D</b>	IFR	Séparation IFR/IFR Information de trafic IFR/VFR	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
	VFR	Information de trafic seulement	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
<b>E</b>	IFR	Séparation IFR/IFR seulement Information de trafic IFR/VFR autant que possible	<b>Oui</b>	<b>Oui</b>	250 kt IAS sous 10000ft/FL 100
	VFR	Information de trafic seulement autant que possible	<b>Non</b>	<b>Non</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
<b>F</b>	IFR	Séparation autant que possible ou Information de trafic IFR/IFR	<b>Oui</b>	<b>Non</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
	VFR	<b>Non</b>	<b>Non</b>	<b>Non</b>	250 kt IAS sous 10000 ft/FL 100
<b>G</b>	IFR	<b>Non</b>	<b>Oui</b>	<b>Non</b>	250 kt IAS sous 10000ft/FL 100
	VFR	<b>Non</b>	<b>Non</b>	<b>Non</b>	250 kt IAS sous 10000ft/FL 100

FIG.3 – liste des classes d’espaces aériens.

## 1.2.3 Le contrôle du trafic aérien :

Le contrôle du trafic aérien ATC (en anglais Air Traffic Control) a pour objectif d'assurer la sécurité du trafic et donc d'éviter les abordages entre les aéronefs opérant dans le système. La mission première reste donc la sécurité.

### 1.2.3.1 Organisation générale

Les organismes du contrôle aérien sont responsables de l'écoulement du trafic dans l'espace dont ils ont la charge. Le service rendu aux usagers doit offrir des garanties de sécurité mais aussi le meilleur débit possible. L'espace aérien est pour cela partitionné en différentes positions de contrôle, dont la fonction est liée à la nature du trafic à gérer. Trois principales catégories fonctionnelles de positions de contrôle se distinguent (figure 4) :

#### a- Le contrôle au sol :

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

#### b- Le contrôle d'approche :

Gère les avions aux alentours d'un aéroport, pendant leur phase de descente ou de montée. Le système de surveillance est identique à celui des secteurs en route ; il gère aussi : [3]

- \* Les autorisations d'approche aux appareils IFR
- \* La préparation et la réalisation des séquences d'approches (régulation des appareils)
- \* Les transits des appareils IFR et VFR dans la zone de contrôle (TMA)
- \* Les arrivées et les départs des appareils VFR qui traversent sa TMA
- \* Les approches de tous les aéroports en dessous de sa TMA

Les contrôleurs d'approche ont une densité de trafic élevée, car toutes les trajectoires convergentes vers un même point avant la piste. Ils peuvent employer des techniques de contrôle plus souples : des limitations de vitesse sont souvent imposées et peuvent être associées à des réductions de normes de séparation, comme ils peuvent aussi mettre les avions en attente dans des «stacks»<sup>1</sup> ; L'avion en bas de la stack est dirigé vers l'aéroport lorsque la piste est prête à le recevoir, libérant ainsi un niveau pour l'avion immédiatement au dessus.

---

<sup>1</sup> Une stack est une zone de l'espace aérien où on empile les avions en les faisant tourner.

### c- Le contrôle en route :

Il s'agit du contrôle hors zone d'approche ; Les avions contrôlés suivent des routes prédéfinies, à une altitude (niveau de vol) généralement élevée et dans des couloirs aériens réservés (Airways). La surveillance du trafic aérien dans ces espaces aériens se fait le plus souvent par l'intermédiaire d'un écran radar et d'un contact radio avec les pilotes. [1]

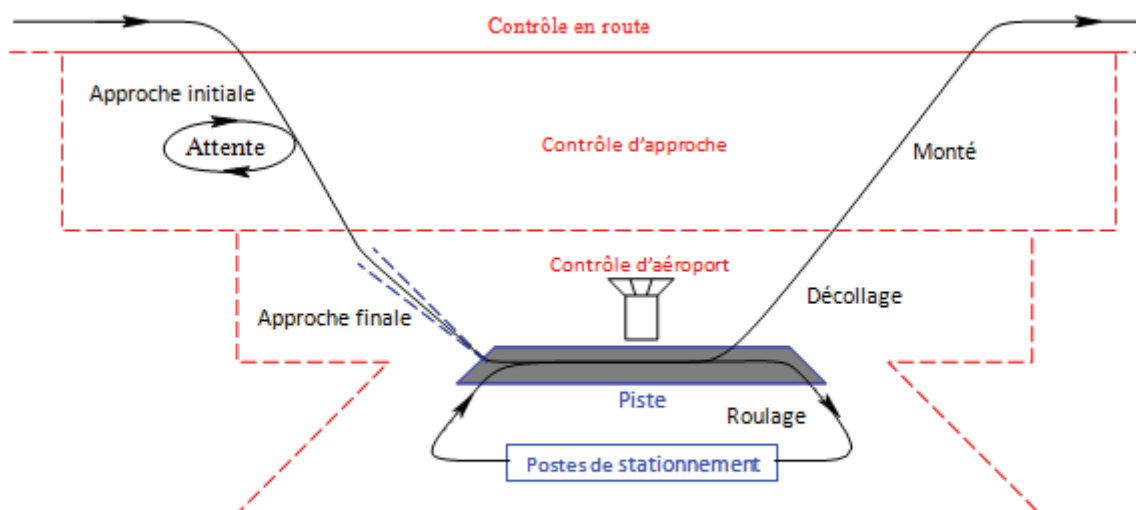


FIG.4 – Positions de contrôle du trafic

### 1.2.3.2 Régulation du trafic

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

#### a- L'organisation à long terme :

Est le filtre le plus macroscopique : son but est d'organiser le trafic plus de 6 mois en avance. La distribution des créneaux aéroportuaires pour la saison semestrielle suivante est un exemple : des règles spécifiques fixées par l'IATA (International Air Transport Association) déterminent l'attribution de ces créneaux aux compagnies, en fonction de la capacité estimée des aéroports.

#### b- L'organisation à court terme (pré-tactique) :

Consiste à réguler le trafic aérien à partir des informations plus précises disponibles dans un intervalle de temps d'une semaine et un jour avant. Cette régulation se base sur les plans de



vol déposés, décrivant les intentions des compagnies, la capacité disponible, calculée en fonction du nombre prévu de positions de contrôle ou encore les données des années ou des semaines précédentes, lorsque certains phénomènes répétitifs sont attendus (pointes de trafic aérateur des jours fériés par exemple). En Europe, cette régulation est effectuée par un organisme centralisé : le CFMU (Central Flow Management Unit). Elle aboutit à des créneaux de décollage imposés à certains vols : ces créneaux correspondent à une heure précise de décollage, généralement retardée par rapport à l'heure initialement demandée, que les avions concernés doivent respecter (le contrôle d'aéroport en est averti et participe à leur application).

### **c- L'organisation en temps réel (tactique) :**

Permet également d'ajuster les flux de trafic aérien en fonction d'événements imprévus ou mal connus la veille (comme les phénomènes météorologiques par exemple). La régulation peut suivre le même processus que dans l'organisation à court terme (des créneaux sont imposés aux vols qui n'ont pas encore décollé), mais aussi se matérialiser par des changements de route (ou de destination) des vols en cours, ou même des annulations de vols.

## **1.3. Les conflits entre avions :**

Un conflit est une situation de perte d'espace de sécurité minimum entre deux avions.

### **1.3.1 Détection de conflits :**

#### **1.3.1.1 Règles de séparation :**

Dans cette partie, les notions classiques de conflits entre une paire d'avions et de détection de ces conflits par un modèle prédictif sont reprises et adaptées au trafic au sol sur un aéroport. L'objectif est donc de détecter l'ensemble des violations de normes de séparation prévisibles, étant donné une description de la situation, ou plus précisément un ensemble de trajectoires et de manœuvres imposées sur l'horizon de prédiction. Ceci nécessite la définition d'un modèle de séparation :

– Le modèle de séparation est généralement une simplification des règles réelles : certaines de ces règles peuvent en effet dépendre de phénomènes non modélisés comme les conditions météorologiques (les règles de séparation liées aux turbulences de sillages des avions peuvent par exemple être adaptées en fonction du vent) ou de certaines pratiques opérationnelles qui seraient difficiles à définir rigoureusement. Pour éviter que cette simplification rende les solutions caduques, il faut veiller à ce que le modèle reste toujours plus pénalisant que les règles réelles.

– Les méthodes de résolution doivent faire le moins d'hypothèses possible sur le modèle de séparation, afin que l'affinement ou l'adaptation de ce dernier ne modifie pas leur efficacité.

– Le modèle de séparation dépend du cadre étudié : pour le trafic au sol, on peut notamment distinguer les séparations au roulage seulement (assurée par la fréquence SOL, en dehors de toute aire de piste) et les séparations imposées pour les séquences de piste (gérées par la fréquence LOC). Il est cependant difficile et pénalisant de séparer les deux problèmes, qui ne sont pas indépendants :

– Pendant les périodes chargées de la journée, les files d'attente d'avions au décollage peuvent atteindre des tailles conséquentes et bloquer certaines voies de circulation éloignées des aires de piste.

– L'ordre dans lequel les départs se présentent à la piste est le résultat de toute leur phase de roulage et modifie considérablement les retards engendrés. Pour ces raisons, toutes les règles de séparation définies pour le trafic au sol seront modélisées et classées en trois catégories : les règles au parking, au roulage et dans les aires de piste. En fonction des objectifs d'une simulation, chacune des catégories pourra éventuellement être occultée.

#### **a- Séparations au parking :**

Les avions garés sont supposés isolés du reste du trafic (dans la plupart des cas, les voies de circulation sont prévues pour éviter tout problème avec ces avions). Seule l'occupation du parking est donc considérée (deux avions ne peuvent occuper un parking au même moment). Les dépendances pouvant exister entre parkings ne seront donc pas modélisées par des règles de séparation (car ces dépendances ne sont pas décrites). La cohérence des parkings affectés aux avions ne sera donc pas remise en cause et sera supposée éviter ces problèmes.

#### **b- Séparations au roulage :**

Au roulage, une norme de séparation en distance  $D$  est requise : la distance entre deux avions doit toujours être supérieure à cette norme (la valeur communément admise dans les simulateurs d'aéroport étant de 60 mètres). En réalité, la norme de séparation peut être réduite sur certaines voies de circulation particulières, en fonction du type des avions. Cet aspect pourrait facilement être modélisé (le type des avions est connu) mais ces voies ne sont pas décrites. Seule la norme de séparation  $D$  est donc considérée dans la version actuelle du simulateur, ce qui modélise une règle générale de séparation plus restrictive que la réalité.

#### **c- Séparations dans les aires de piste :**

Dans les aires de piste, les règles de séquençement suivantes viennent s'ajouter à la norme de séparation en distance  $D$  définie dans la partie précédente :

**1. Un seul décollage ou atterrissage à la fois** est autorisé sur chaque piste.

**2. Une séparation en temps** est imposée entre chaque décollage ou atterrissage. Ce temps sera défini en fonction du type (décollage ou atterrissage) et de la catégorie de turbulence de sillage (léger, moyen ou lourd) des deux avions impliqués. Le modèle correspond aux règles « standard » de séparation, les mesures minimales observées lui sont inférieures sauf pour les catégories L dont le nombre est trop faible pour que les observations soient représentatives.

**3. La circulation dans les aires de piste** est autorisée derrière un éventuel décollage ou un atterrissage en cours. Ceci concerne les départs rejoignant l'axe de piste ou les avions traversant la piste au roulage. Cette règle autorise donc l'alignement multiple des avions sur la piste, comme cela est souvent pratiqué par les contrôleurs pour optimiser une séquence de décollage

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, qui fait partie intégrante de l'ATM. La notion de conflit est essentielle dans l'ATC (Air Traffic Control).

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 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 (1Nm=1852m). La norme de séparation standard verticale, quant à elle, est fixée à 1000ft (1ft=0.305m). Ces distances de séparation définissent ainsi une zone de sécurité autour des avions comme illustré dans la figure 5.

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.

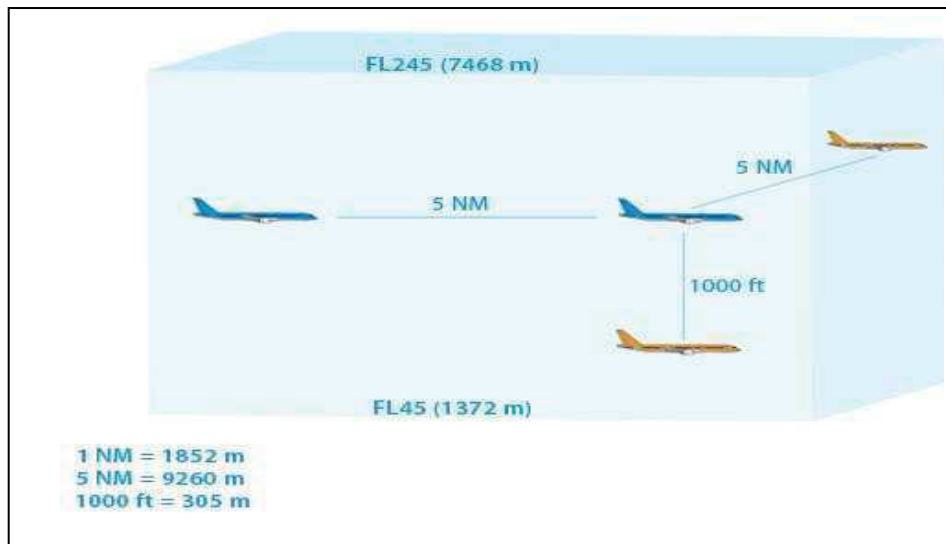


FIG.5 - Zone de sécurité d'un avion

### 1.3.1.2 Modélisation des incertitudes : [4]

Dans la détection de conflits, les taux de fausse alarme et de non-détection sont très dépendants de la qualité de la prévision des trajectoires et d'une modélisation fine des incertitudes. Il existe au moins deux façons de modéliser l'incertitude des positions futures :

\* Encadrer cette incertitude par des intervalles de confiance, ou de tolérance. Cette approche permet de définir une « boîte » autour des positions nominales futures, dans laquelle la présence de l'avion est assurée avec une certaine probabilité, ou certain niveau de certitude.

\* Définir une probabilité de présence de l'avion à chaque point le long de sa route prévue. Selon la modélisation des incertitudes, la détection de conflits reviendra donc soit à déterminer quand la distance entre zones d'incertitudes sera en dessous des normes de séparation verticales et horizontales, soit à déterminer si la probabilité d'une perte de séparation est supérieure à un certain seuil fixé.

## 1.3.2 Résolution des conflits :

### 1.3.2.1. Qu'est-ce que la résolution de conflits ?

Résoudre un conflit consiste à trouver des trajectoires alternatives, dont la déviation est minimale par rapport aux trajectoires initiales, et qui respectent les normes de séparation.

Il s'agit donc d'un problème d'optimisation sous contraintes. La fonction à minimiser est relativement simple. Par contre pour des modélisations réalistes, la forme analytique des contraintes de séparation n'est pas immédiatement accessible : l'évaluation des contraintes de séparation nécessite généralement une simulation du trafic aérien, avec un calcul des trajectoires alternatives et une détection de conflits.

Au-delà de cette formulation, les objectifs d'une résolution de conflits peuvent être divers :

- \* Trouver une solution, même de qualité médiocre.
- \* Chercher un optimum local.
- \* Chercher un optimum global, pour l'ensemble des déviations de trajectoires, qui est un problème plus difficile que les précédents.
- \* Prouver l'existence de solution, ou leur absence.
- \* Prouver l'optimalité des solutions trouvées.

### **1.3.2.2. Méthode de résolution de conflit :**

Pour surveiller le trafic aérien, les contrôleurs aériens disposent généralement d'un écran radar affichant l'ensemble des vols présents dans leur secteur ainsi que ceux qui sont à même d'y entrer dans un futur proche. La majorité des informations est donc regroupées sur une interface interactive 2D, sur laquelle le contrôleur s'appuie pour anticiper et résoudre les conflits potentiels entre les aéronefs. Une grande partie du travail du contrôleur consiste donc à évaluer mentalement les différents scénarios possibles pour prendre les décisions adéquates afin de garantir la sécurité des vols avec l'augmentation du volume du trafic, la charge de travail potentielle des contrôleurs est susceptible d'augmenter. Ainsi une part considérable de la recherche dans la gestion du trafic aérien s'attache à proposer des solutions afin de faciliter leur tâche, ces méthodes sont connues sous le nom de détection et résolution de conflits aériens.

La détection et la résolution des conflits potentiels font partie intégrante du travail quotidien du contrôleur aérien. Le contrôleur aérien dispose de trois méthodes pour résoudre un conflit potentiel :

- le changement de niveau de vol.
- le changement de cap.
- le changement de vitesse.

Ou une combinaison de ces trois méthodes. Dans la pratique, seules les deux premières méthodes sont fréquemment utilisées par les contrôleurs des espaces aériens. La régulation de vitesse seule est difficile à mettre en œuvre car elle ne modifie pas la trajectoire 3D des vols, contrairement au deux autres méthodes. Pour le contrôleur cela représente une difficulté supplémentaire car visuellement, sur l'écran radar, la résolution du conflit n'apparaît que très progressivement. Ainsi, de façon globale, les contrôleurs préfèrent les clairances de réaffectation de niveau de vol ou de modification de cap et se focalisent sur ces méthodes de résolution de conflit.

### 1.3.2.3 Type de manœuvres utilisées :

Actuellement, lorsque les avions sont en vol, il est de la responsabilité du contrôleur d'assurer le respect des normes de séparation entre avions à tout instant. Pour cela, il utilise généralement deux types de manœuvres : le point tournant et la mise en offset (présentées dans la figure 6 et 7). Ces deux manœuvres se font dans le plan horizontal.

Les manœuvres verticales sont utilisées uniquement dans les phases de montée ou de descente, par le biais de mise en pallier temporaire. Dans le trafic en-route, les manœuvres verticales ne sont utilisées par les contrôleurs qu'en dernier recours, de par leur coût élevé en termes de carburant.

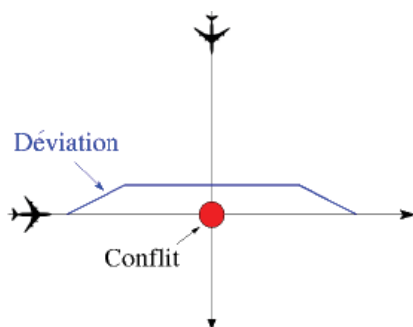


FIG.6 – offset

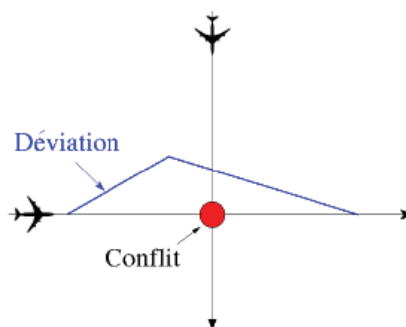


FIG .7– point tournant

## 1.4. La congestion :

La congestion est utilisée comme une mesure de la complexité du trafic. On considère que plus la congestion sera faible et plus le trafic sera facile à contrôler [5]. On comprend bien que plus le nombre d'avions est important dans une zone et plus il est difficile de les contrôler. On définit alors qu'une zone est congestionnée lorsque plusieurs avions sont en interaction, c'est-à-dire lorsqu'ils sont proches les uns des autres. Plus le nombre d'avions dans un voisinage donné sera important et plus cette zone sera considérée comme congestionnée.

### 1.4.1. Les causes de la congestion aérienne :

Le transport aérien bénéficie d'une considération particulière. Cependant, il souffre d'un défaut majeur : la congestion. [6]

Ci-dessus on peut citer certaines causes :

- **Des capacités aéroportuaires insuffisantes :** Les principaux aéroports des pays développés sont saturés c'est à dire que la demande des compagnies aérienne souhaitant utilisé ces aéroports est supérieure à l'offre de ceux-ci en terme de capacité.
- **Un partage inégal de l'espace aérien entre les vols civils et militaires :** les militaires peuvent à tout moment activer une zone militaire dans laquelle aucun avion civil ne doit circuler, beaucoup reconnaissent que des efforts ont été faits. Désormais, grâce à des négociations, les militaires désactivent une zone, en autorisant le trafic aérien civil à la traverser à nouveau, dès qu'ils n'en ont plus besoin et libèrent ces zones pendant les périodes de fort trafic aérien.
- **Un sous-effectif du contrôleur aérien :** Généralement, dans les services gérés par l'état, la revendication d'une hausse des effectifs est la première avancée, ce qui n'apparaît pourtant pas dans le cas du contrôle aérien. Des représentants syndicaux ont eux-mêmes reconnu que le contrôle aérien ne souffrait pas d'une pénurie de contrôleurs. Cela peut s'expliquer par les importants avantages obtenus à la suite d'une mobilisation générale en 1991. Une grande partie des revendications des contrôleurs fut acceptée, portant essentiellement sur de fortes hausses salariales, assorties d'une revalorisation du diplôme d'Ingénieur Civil de la Navigation Aérienne, et une augmentation des effectifs.
- **Les retards :** Les retards dans le transport aérien peuvent être perçus sous différents angles. Un premier point de vue adopté est celui des passagers et des compagnies aériennes. Il consiste à comparer l'heure d'arrivée prévue avec l'heure d'arrivée effective. Un voyage en avion d'un aéroport à un autre se décompose en trois phases : le roulage à

l'aéroport de départ, le vol entre le décollage et l'atterrissage, le roulage à l'aéroport d'arrivée. En l'absence de contraintes, chacune de ces phases s'opère sur une durée de temps précise. Cependant, des retards peuvent avoir lieu lors de chacune de ces phases, un retard de l'avion au départ de son point de stationnement pouvant également s'ajouter.

- **Une mauvaise organisation du contrôleur aérien.**

## **1.4.2. Le traitement de la congestion :**

La façon de considérer et de traiter la congestion est différente selon les pays. En particulier, les États Unis et l'Europe ont une façon très différente de traiter la congestion, et cela entraîne des effets forts différents en termes d'accès aéroportuaire et en termes de retards. [7]

### **Le « laisser faire » américain :**

Aux USA quand la demande excède l'offre (ce qui est le cas sur bon nombre d'aéroports) il se produit un rationnement par le biais de queues : La plupart des aéroports aux USA fonctionnent sur un principe « premier arrivé premier servi ». Il n'y a pas de coordination exacte au niveau aéroportuaire pour allouer la capacité.

Concrètement cela veut dire que chacun attend son tour pour décoller et atterrir, avec pour conséquences immédiates des queues et des retards. L'idée est que les compagnies, étant rationnelles, vont chercher à se coordonner en terme d'horaires afin d'éviter des surcharges trop importantes. Même si cela fonctionne dans une certaine mesure, la résultante de ce système est néanmoins un niveau de congestion et de retards importants dont les passagers se plaignent régulièrement.

Les retards sont en effet un souci important du passager américain, et la ponctualité des vols fait partie des indicateurs surveillés et diffusés par l'administration de l'aviation civile américaine (la FAA : Federal Aviation Administration). Un des atouts de la compagnie Southwest, préférée des américains (selon les enquêtes annuelles de satisfaction) est justement d'utiliser des aéroports secondaires non congestionnés. Ce qui pouvait passer au départ (dans les années 70) pour un handicap (aéroports plus petits, loin des centres-villes, moins bien desservis...) est devenu au fil du temps un avantage indéniable (meilleure ponctualité pour le passager et pour la compagnie possibilité de programmer plus de rotations dans une journée et donc d'avoir des coûts plus bas).

La théorie économique explique facilement pourquoi un tel système de « laisser faire » est inefficace et génère des retards importants : en effet les utilisateurs considèrent les coûts de congestion qu'ils subissent, mais pas ceux qu'ils font subir aux autres compagnies. On dit qu'ils n'internalisent pas les coûts complets de la congestion. La résultante est un niveau de délais trop élevé, ce qui favorise les usagers (compagnies ou aviation générale) qui ont des coûts de délais faibles. Ceux-ci n'étant pas forcément ceux qui seraient prêts à payer le plus pour l'utilisation de la capacité, on a une allocation finale de la capacité inefficace. Malgré tout ce système a l'avantage d'utiliser au maximum la capacité (la capacité réelle peut varier dans le temps, par exemple en fonction de la météo) et de laisser un accès à toutes les compagnies (mais des barrières à l'entrée sur les marchés peuvent exister à d'autres niveaux)



Quatre aéroports (« high density airports ») font exception à ce système, étant donné le très haut niveau de demande excédentaire qui y est constatée.

### **La méthode européenne :**

En Europe et en général ailleurs dans le monde, il existe sur les aéroports saturés un système de créneaux qui permettent d'allouer la capacité aéroportuaire à l'avance et d'éviter les retards ou du moins de les plafonner à un niveau acceptable. En Europe les États ont la possibilité de déclarer les aéroports qui présentent des problèmes de congestion, comme « coordonnés ». Cela signifie que les transporteurs, pour utiliser les infrastructures de ces aéroports, doivent obligatoirement obtenir un créneau horaire. Un créneau est une autorisation d'utiliser les infrastructures aéroportuaires d'un aéroport coordonné à une date et à une heure précises aux fins de l'atterrissage et du décollage, selon l'attribution faite par le coordonnateur <sup>2</sup>

## **1.5. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM :**

Les services de navigation aérienne (prestataires de services ATC / ATM) financent en général leurs activités en facturant les compagnies aériennes utilisant leur espace aérien. L'OACI publie des directives générales mises à jour périodiquement pour la tarification [14]. Les redevances de navigation aérienne représentent une part importante du coût d'un vol pour une compagnie aérienne [15], qui doit augmenter le prix des billets pour les couvrir. Ces redevances représentent souvent entre 10% et 20% du coût d'un vol [16].

### **1.5.1. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM aux USA :**

Aux États-Unis, le budget fédéral couvre l'ensemble des coûts d'exploitation et d'investissement liés aux ATC / ATM, car il n'existe aujourd'hui aucuns frais ni redevances effectifs pour les utilisateurs de l'espace aérien des États-Unis. L'espace aérien et ses ressources sont libres pour tous les avions de toutes tailles conformes aux règles de l'administration fédérale [8]. Cependant, les billets d'avion comprennent un ensemble de taxes liées à cette utilisation et qui sont collectées par les compagnies aériennes. L'exception concerne les vols qui transitent par l'espace aérien contrôlé par les États-Unis sans décoller ni atterrir aux États-Unis. Dans ce cas, les redevances de survol tiennent compte de taux différents pour les composants en route et océaniques d'un vol. Différents taux exprimés par 100 milles marins mesurés le long de la distance du grand cercle entre les points d'entrée et de

---

<sup>2</sup> On appelle créneau horaire « l'autorisation accordée par un coordonnateur conformément au présent règlement d'utiliser toutes les infrastructures aéroportuaires qui sont nécessaires pour la prestation d'un service aérien dans un aéroport coordonné, à une date et à une heure précise, aux fins de l'atterrissage et du décollage, selon l'attribution faite par un coordonnateur conformément au présent règlement. » (Règlement (CE) N°793/2004)

sortie dans l'espace aérien contrôlé par les États-Unis sont appliqués. Les redevances sont calculées avec la formule qui ne tient pas compte de la masse ou de la taille de l'aéronef :

$$R_{ij} = r_E \times DE_{ij}/100 + r_O \times DO_{ij}/100$$

où  $R_{ij}$  le total des redevances perçues sur les aéronefs effectuant un vol entre le point d'entrée  $i$  et le point de sortie  $j$ ,  $DE_{ij}$  est la distance totale parcourue dans chaque segment de l'espace aérien en route entre le point d'entrée  $i$  et le point de sortie  $j$ ,  $DO_{ij}$  est la distance totale parcourue segment de l'espace aérien océanique entre le point d'entrée  $i$  et le point de sortie  $j$ ,  $r_E$  et  $r_O$  correspond aux tarifs en route et océaniques, respectivement d'environ 60 et 25 US \$. La FAA examine ces tarifs au moins une fois tous les deux ans et les ajuste pour refléter le coût actuel et le volume des services fournis. Dans la perspective de la privatisation des services de navigation aérienne aux États-Unis, un système de redevances devrait être mis en place pour tous les utilisateurs de l'espace aérien des États-Unis. Compte tenu de la nature monopolistique des services de navigation aérienne, ses redevances devraient être réglementées afin d'éviter des prix injustes et de permettre aux utilisateurs du secteur de l'aviation d'assumer le coût de ces services pour le prestataire de services de navigation aérienne.

### **1.5.2. Tarification des fournisseurs de services ATC/ATM dans le reste du monde :**

Les redevances de route et les redevances pour services terminaux (rendus sur les plateformes aéroportuaires) constituent les principales recettes des prestataires de services de la navigation aérienne, avec cependant une différence entre les fournisseurs de services en route et les prestataires de services aéroportuaires [9]. La formule retenue par l'OACI pour calculer les charges en route est la suivante :

$$R_{ij} = Tu_j \times \frac{D_{ij}}{100} \times \sqrt{\frac{M_i}{50}}$$

$D_{ij}$  : distance de vol  $i$  dans l'espace aérien d'un pays  $j$  (en Kilomètre)

$M_i$  : Poids maximum du vol  $i$  (en tonne)

$Tu_j$  : Prix unitaire d'un pays  $j$  (en euros)

Par exemple, en France en 2003, le prix unitaire était de 62.19 Euros et en Allemagne il valait 92,51 Euros. Toutefois, cette formule pénalise beaucoup de lignes aériennes parce que la redevance du fournisseur de service n'est pas liée directement à la dimension de l'avion. Aussi il n'est pas pris en compte le niveau de congestion et donc la difficulté du contrôle. Cette formule est généralement peu adaptée aux situations réelles qui dépendent par exemple des différentes périodes de l'année et de la surface géographique du secteur, ce qui signifie en fait une tarification spécifique pour chaque secteur. En effet, alors que les redevances en route constituent quasiment la totalité des recettes des fournisseurs de services en route (plus de 97% en Europe), les aéroports ont généralement d'autres activités (location d'espace donnant lieu à des redevances domaniales, taxes sur la sûreté par exemple) qui représentent une part importante de leurs recettes. Par ailleurs, certains aéroports bénéficient de subventions et de contributions de la part des collectivités locales.

Suivant le statut public ou privé du prestataire de services, les revenus escomptés de l'activité ne sont pas soumis aux mêmes règles. En effet dans le cas d'un fournisseur de service public, l'objectif généralement recherché est l'équilibre budgétaire, c'est-à-dire égaliser les recettes générées par l'activité aux coûts supportés lors de la fourniture de services. Dans le cas d'un prestataire de services privé, les considérations de profit sont intégrées aux calculs des redevances. Mais dans les deux cas, les revenus des prestataires de services dépendent du nombre des usagers des services de la navigation aérienne à savoir les compagnies aériennes, leurs passagers [10].

## **Chapitre 2 : modélisation du problème**

Pour pouvoir modéliser notre problème nous devons connaître toutes les opérations qui sont effectuées pour le contrôle des aéronefs à l'arrivée et les différentes contraintes aux quelles un vol devrait faire face.

Au cours de ce chapitre nous présenterons la phase d'atterrissage ainsi que ses différents cas et procédures

## **2.1. Contraintes d'atterrissages normaux :**

### **2.1.1. Introduction :**

L'atterrissage est la trajectoire qui permettant d'amener l'avion en contact avec le sol à l'issue de l'approche et de l'arrêter sur une distance compatible avec la longueur de la piste. Et les trajectoires de l'atterrissage se décomposent en deux phases :

\*une phase aérienne

\*une phase de roulage au sol

### **2.1.2. Choix de la piste en service :**

\* L'expression « piste en service » doit être utilisée pour désigner la piste ou les pistes qui, à un moment donné, sont considérées par la tour de contrôle d'aérodrome comme étant celles qui conviennent le mieux aux types d'aéronefs qui doivent atterrir à l'aérodrome.

Des pistes séparées ou des pistes multiples peuvent être désignées « piste en service » pour les aéronefs à l'arrivée et les aéronefs au départ. [11]

\* Normalement, un aéronef doit atterrir face au vent, à moins que la sécurité, la configuration de la piste, les conditions météorologiques et les procédures d'approche aux instruments disponibles ou les conditions de la circulation aérienne ne rendent préférable une autre direction. Toutefois, pour choisir la piste en service, l'organisme assurant le contrôle d'aérodrome doit prendre en considération, outre la vitesse et la direction du vent à la surface, d'autres facteurs tels que : circuits d'aérodrome, longueur des pistes, aides à l'approche et à l'atterrissage utilisables.

\* Une piste pour l'atterrissage, appropriée à l'exploitation, peut être désignée aux fins de l'atténuation du bruit, l'objectif étant d'utiliser autant que possible les pistes qui permettent aux avions d'éviter les zones sensibles au bruit au cours de la phase d'approche finale du vol.

\*Une piste ne doit être choisie aux fins de l'atténuation du bruit à l'atterrissage que si elle est équipée d'un dispositif de guidage approprié sur la pente de descente, par exemple un ILS (Système d'atterrissage aux instruments) ou, pour l'exploitation en conditions météorologiques de vol à vue, un indicateur visuel de pente d'approche.

\* Un pilote commandant de bord peut, pour des raisons de sécurité, refuser une piste proposée aux fins de l'atténuation du bruit.

### 2.1.3. Contrôle des aéronefs à l'arrivée :

#### 2.1.3.1. Séparation entre un aéronef à l'atterrissage et les aéronefs qui le précèdent à l'atterrissage et au départ et qui utilisent la même piste :

Un aéronef à l'atterrissage ne doit pas être autorisé à franchir le seuil de piste au cours de l'approche finale tant que l'aéronef au départ qui le précède n'a pas franchi l'extrémité de la piste en service ou n'a pas amorcé un virage ou tant que tous les aéronefs à l'arrivée qui le précèdent ne sont pas à l'écart de la piste en service, (Voir la figure 8).

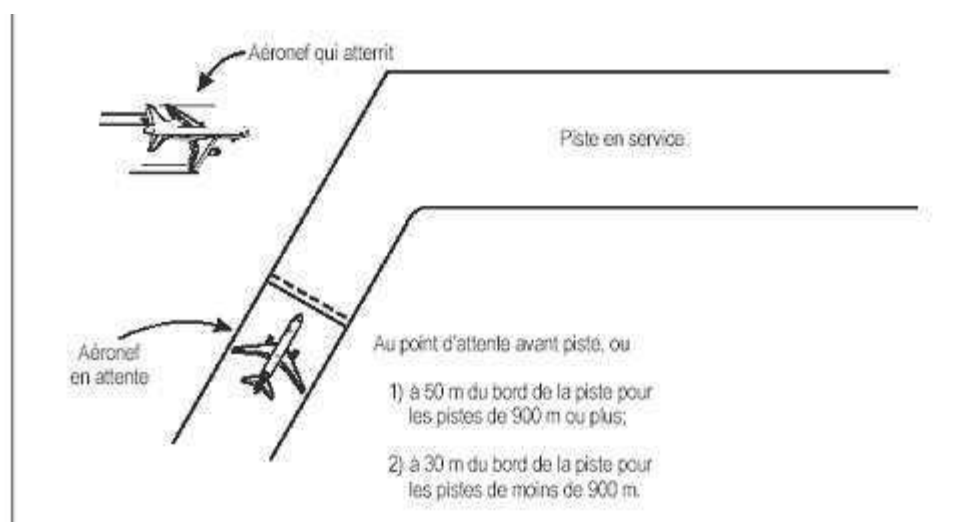


FIG 8

#### 2.1.3.2. Autorisation d'atterrissage :

Un aéronef peut être autorisé à atterrir lorsqu'on est raisonnablement sûr que la séparation prévue à la Section 2.1.3.1 sera respectée au moment où l'aéronef franchira le seuil de la piste. Toutefois, l'autorisation d'atterrir ne doit pas être donnée avant qu'un aéronef atterrissant avant lui n'ait franchi le seuil de la piste. Pour réduire les risques de malentendu, l'autorisation d'atterrissage doit comprendre l'indicatif de la piste d'atterrissage.

#### 2.1.3.3. Manœuvres d'atterrissage et d'évacuation de la piste :

\* Lorsque c'est nécessaire ou souhaitable pour accélérer la circulation, il peut être demandé à un aéronef qui atterrit :

- a) d'attendre en retrait d'une piste sécante après l'atterrissage ;
- b) d'atterrir au-delà de la zone de toucher des roues de la piste ;

- c) d'évacuer la piste à une voie de sortie de piste spécifiée ;
- d) d'accélérer l'évacuation de la piste.

\*Lorsqu'il est demandé à un aéronef qui atterrit d'exécuter une certaine manœuvre d'atterrissage et/ou de roulement à l'atterrissage, il doit être tenu compte du type d'aéronef, de la longueur de la piste, de l'emplacement des voies de sortie de piste, de l'efficacité de freinage signalée sur la piste et la voie de circulation, ainsi que des conditions météorologiques. Il ne doit pas être en aucun cas demandé à un aéronef GROS-PORTEUR d'atterrir au-delà de la zone de toucher des roues.

## **2.2. Contraintes d'atterrissages d'urgences :**

### **2.2.1. La perte de contrôle de l'avion et les problèmes techniques :**

La perte de contrôle sur avion de ligne est un problème qui n'a rien de théorique. De nombreuses causes peuvent faire en sorte qu'un avion se retrouve hors de son enveloppe de vol. Une action appropriée et correcte de la part des pilotes est nécessaire pour retrouver un domaine de vol normal. Par contre, les compagnies aériennes et les constructeurs ne sont jamais totalement d'accord sur la manière de sortir d'un avion de ligne d'une situation dangereuse.

Les compagnies aériennes fonctionnent avec les procédures qu'elles mettent à la disposition des pilotes. Ces derniers sont formés en simulateur pour agir selon des check-lists standards fabriquées par leur compagnie aérienne. Les instructeurs valident l'apprentissage de chaque pilote et chaque fois que celui-ci applique les procédures correctement, il sauve son avion de la situation dangereuse. De leur côté, les instructeurs utilisent les procédures pour obtenir avec leurs pilotes des résultats uniformes, vérifiables et reproductibles. Les compagnies veulent également que des procédures soient faciles à enseigner et qui fonctionnent sur tous les avions de leur flotte.

Les constructeurs d'avions voient les choses sous un autre angle : pour eux, il n'y a pas de perte de contrôle type et pour cette raison il ne saurait y avoir de procédure de récupération type ! Chaque perte de contrôle est différente et les pilotes devraient être formés dans un contexte très large leur permettant de gérer n'importe quelle perte de contrôle même s'ils ne l'ont jamais rencontrée précédemment en simulateur.

### **2.2.2. Comment faire si un avion bimoteur tombe en panne ?**

Si un avion bimoteur tombe en panne (soit le moteur droit) l'avion perd de l'altitude en effet, pour compenser l'absence du moteur droit, l'avion doit descendre à un peu près de 15200 ft l'équivalent de 4700 m cela évidemment entraînera une consommation d'avantage de kérosène et l'action à entreprendre par le pilote serait d'afficher la puissance maximale sur le

moteur gauche ce qui fera gagner de l'altitude à l'avion pour diminuer la consommation du carburant. L'avion a suffisamment de réserve jusqu'à atteindre sa destination avec un seul moteur, mais il y a de forte chance que l'avion soit dérouté (il doit atterrir sur l'aérodrome le plus proche).

### **2.2.3. L'urgence médicale en avion :**

D'après une étude du *New England journal of medicine*, il y a une urgence médicale tous les 600 vols, ou 16 cas par million de passager transporté (ce qui correspond plus ou moins à ce que l'on observe dans un environnement habituel, l'avion n'a donc pas de conséquence médicale particulière). Les problèmes les plus fréquents sont la perte de conscience ou évanouissement (37,4 %), les symptômes respiratoires qui sont en réalité souvent de simples crises de panique (12,1 %), les nausées (9,5 %), les problèmes cardiaques (7,7 %) et les crises d'épilepsie ou convulsions (5,8 %). Dans plus d'un tiers des cas, le problème se résout seul ou grâce aux éventuels professionnels de santé présents à bord, à la trousse médicale présente dans chaque avion ou au défibrillateur cardiaque, mais il est parfois nécessaire d'atterrir pour les plus graves problèmes (accouchement, crise cardiaque...). Cela ne pose évidemment pas de problème de sécurité, l'objectif est d'être au sol en une petite dizaine de minutes si l'on se trouve au dessus du sol.

La descente d'urgence pour raison médicale n'a évidemment lieu que si l'on se trouve proche d'un aéroport, car si l'on se trouve loin d'un terrain il vaut mieux rester en vol de croisière afin de voler plus rapidement.

Bref, si par malheur un jour vous ressentez une descente plus forte que d'habitude, s'il s'agit d'une turbulence cela n'est pas grave et vos sensations vous mentent (on ressent les descentes bien plus fortement que la réalité), et s'il s'agit d'une descente d'urgence c'est une action maîtrisée par l'équipage... Dans tous les cas, volez tranquilles, en espérant que l'équipage ait la gentillesse de vous rappeler que tout cela est maîtrisé.

### **La dépressurisation de l'avion :**

En cas de dépressurisation, qu'il ne s'agisse que d'une fausse alerte ou d'une dépressurisation avérée, la procédure impose de descendre à une altitude à laquelle l'air extérieur est respirable. Autrement dit, on va descendre de 30.000 pieds / 10.000 mètres vers 10.000 pieds / 3000 mètres. A cette altitude, les masques à oxygène ne sont pas nécessaires et l'appareil peut retourner à l'aéroport le plus proche en toute sécurité, même s'il est réellement dépressurisé.

### **2.2.4. La perte des systèmes hydrauliques :**

Le circuit hydraulique est un peu, pour un avion, ce que l'appareil circulatoire est pour l'être humain. C'est lui qui va transmettre, grâce à un liquide approprié, la puissance mécanique nécessaire pour mouvoir les commandes du vol ou du train d'atterrissage.

C'est donc, là encore, un système essentiel pour un avion, ce qui va justifier la redondance et la complexité du circuit, car il est difficilement pensable de pouvoir s'en passer, même s'il existe, malgré tout, des procédures pour gérer ce cas peu probable...



### **2.2.5. Manque de carburant et panne sèche :**

Se retrouver en panne sèche de carburant, en plein vol, est une situation certes bien inconfortable pour un équipage, mais c'est surtout une situation qui ne devrait en théorie jamais se produire.

Sur un avion de ligne, les garde-fous permettant de ne jamais arriver à une telle extrémité sont nombreux. Qu'il s'agisse des systèmes de l'avion, informant l'équipage d'éventuelles fuites, qu'il s'agisse de l'équipage lui-même, qui va faire un suivi de la consommation en temps réel pour la comparer avec celle qui était planifiée, ou enfin qu'il s'agisse de la préparation du vol, qui aura permis d'embarquer suffisamment de kérosène pour effectuer le trajet en toute sécurité. Mais comme dans tout système complexe, il peut subsister des failles.

#### **Une réglementation stricte :**

La réglementation opérationnelle, qu'elle émane de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale), ou des Autorités régionales comme la FAA (USA) ou l'EASA (European Aviation Safety Agency), a été définie de façon à garantir une marge de sécurité permettant aux vols commerciaux de ne jamais se retrouver en panne de carburant. Les textes définissent en effet précisément quelle doit avoir la quantité minimale de carburant embarquée avant chaque vol.

Cette quantité de carburant est sensée prendre en compte certains aléas, comme une mauvaise météo à l'arrivée, un vol en zone désertique, ou encore un vent défavorable sur la route. [12]

### **2.2.6. Difficultés météorologiques :**

La bonne réalisation d'un vol dépend de beaucoup de facteurs, dont l'un des plus capricieux reste les phénomènes météorologiques. Malgré l'évolution technologique, aussi bien pour les avions que pour les centres de prévision météorologiques, de nombreux accidents dus à la météorologie font encore parler d'eux. Dont certains de ces phénomènes sont : le givrage, la turbulence, le cisaillement de vent, l'orage, de la grêle, le brouillard, les cendres volcaniques, les jets.

### **2.2.7. Problèmes de sécurité (moins d'accidents).**

Au cours des dernières années, le volume du trafic aérien a progressivement augmenté. En 2012, environ 31,2 millions de départs commerciaux réguliers ont été enregistrés, soit une hausse de 3,5 % sur trois ans. Le réseau aérien a transporté environ 2,9 milliards de passagers en 2012, ce qui représente une hausse de 5,5 % des passagers-kilomètres payants (PKK) sur vols commerciaux réguliers par rapport à l'année précédente. Ajoutons qu'aujourd'hui, le réseau aérien en expansion se compose de plusieurs réseaux interconnectés qui sont différents en termes de géopolitique, complexes technologiquement et résolument pluridisciplinaires. Étant donné la complexité et l'expansion continue à prévoir dans ce secteur, il est essentiel que nous poursuivions nos efforts pour améliorer la sécurité. L'OACI s'engage à développer des solutions proactives et fondées sur les risques pour réduire les taux d'accidents mondiaux. Nous interpellons toute la communauté aéronautique pour qu'elle reconnaisse l'importance d'adopter une approche globale pour améliorer et surveiller la sécurité. Par rapport à l'année

2011, le nombre d'accidents a diminué en 2012 de 21 % et le nombre de victimes de 10 %, ce qui fait de l'année 2012 l'année la plus sûre depuis 2004. En tenant compte de la baisse du nombre d'accidents et de la hausse du nombre de départs, nous arrivons à une baisse significative du taux d'accidents mondial de 3,2 accidents par million de vols commerciaux réguliers pour 2012.

## **2.3. Différentes décisions à prendre pour l'atterrissage :**

### **2.3.1. Ordre de priorité pour l'atterrissage :**

- Un aéronef en vol a priorité sur un aéronef au sol.
- Un aéronef en finale est prioritaire lorsqu'il est plus bas. Attention, vous ne pouvez pas doubler un aéronef en finale par en dessous.
- En vol, on doit céder le passage à un avion que l'on voit sur sa droite.
- Le dépassement d'un aéronef se fait toujours par la droite.
- En rapprochement de face, chaque appareil évite par virage à droite.
- Un aéronef n'a pas le droit de passer le seuil de piste à l'atterrissage tant que :
  - L'aéronef qui le précède n'a pas dégagé la piste sauf dans le cas d'une obtention de clairance "Atterrissage derrière".
  - L'aéronef au décollage n'a pas franchi le seuil de piste opposé ou n'a pas effectué un premier virage
- Si un aéronef entre dans le circuit d'aérodrome sans y être dûment autorisé, il doit être autorisé à atterrir si ses manœuvres indiquent que telle est son intention. Si les circonstances le justifient, le contrôleur peut donner aux aéronefs avec lesquels il est en communication l'instruction de céder le passage de façon à écarter aussi rapidement que possible tout risque résultant de cette entrée non autorisée. La permission d'atterrir ne peut en aucun cas être refusée indéfiniment.
- En cas d'urgence, il peut être nécessaire pour la sécurité d'un aéronef que celui-ci entre dans le circuit d'aérodrome et effectue un atterrissage sans y être dûment autorisé. Les contrôleurs doivent admettre l'éventualité de manœuvres d'urgence et fournir à ce sujet toute l'aide possible.

#### **La priorité doit être donnée :**

- a) à un aéronef dont le pilote prévoit qu'il va être contraint d'atterrir pour des raisons liées à la sécurité du vol de l'aéronef (panne de moteur, manque de carburant, etc...).
- b) à un aéronef sanitaire ou à un aéronef transportant un malade ou un blessé grave dont l'état demande des soins médicaux urgents.
- c) à un aéronef participant à des opérations de recherches et de sauvetage.
- d) à tout autre aéronef indiqué par les services compétant du ministère du transport.

### **2.3.2. Comment se passe une descente d'urgence :**

D'un point de vue aéronautique, une descente d'urgence ne pose aucune difficulté, il suffit pour les pilotes de se mettre en descente avec un rythme pouvant atteindre 4500 pieds / minute, alors que l'on est d'habitude entre 1000 et 1500 fpm pour une descente normale avant l'atterrissage. La perception de chute souvent décrite par les passagers après l'atterrissage n'est donc en réalité qu'une descente contrôlée et souhaitée, on est très loin du film catastrophe imaginé par tous ceux qui ont peur de l'avion... La descente ne se fait pas dans l'axe afin de ne pas croiser un autre avion qui se trouverait sur notre voie aérienne, et on fait donc un virage pour que cette descente soit réalisée dans un environnement vide. La tour de contrôle de laquelle on dépend au moment de la descente va parallèlement s'occuper de dégager le ciel pour notre avion.

S'il y a un aéroport proche, pas de soucis pour se poser directement après la descente, les contrôleurs ont libéré la piste de l'aéroport et ont prévenu les secours s'il s'agissait d'un atterrissage médical. Mais il a également fallu se poser des questions supplémentaires si la descente a été imposée alors que l'on se trouve au milieu d'un océan. En effet, un avion volant à 10.000 ft va consommer plus de quatre fois plus de carburant qu'en vol de croisière ! Si un appareil a besoin de 50 tonnes de carburant pour finir son trajet normalement, il ne lui en faudra pas loin de 200 en basse altitude, et on doit donc calculer des réserves permettant à l'avion d'atteindre un aéroport de dégagement en basse altitude, même si la descente devait arriver à l'endroit le plus éloigné de toute terre. La réglementation numéro 14 CFR 121.646 (voir OIAC) impose donc à l'avion d'être capable de toujours voler de manière dépressurisée en basse altitude avec un seul moteur opérationnel depuis le point le plus loin de tout aéroport sur un trajet donné... Oui, comme toujours en aéronautique on a pensé à tout .

De la même manière, les compagnies demandent de pouvoir réaliser leurs vols en plus basse altitude lorsque des volcans crachent des cendres volcaniques, cela permet d'éviter les poussières mais implique une plus grande consommation et des vols plus lents...

## **Chapitre 3 : Résolution du problème**

Pour résoudre ce problème on réalisera un algorithme dont le quel on a classé les contraintes d'atterrissages par ordre de priorités, par la suite l'avion atterris selon son cas d'urgence. Dans le tableau ci-dessous on a indiqué le code de l'avion, l'heure d'arrivée et les problèmes que l'avion risque d'avoir.

### 3.1. Ordre de priorités d'atterrissage d'urgence :

1. La perte de contrôle de l'avion et les problèmes techniques
2. La panne de moteur de l'avion
3. L'urgence médicale en avion
4. La perte des systèmes hydrauliques
5. Manque de carburant et panne sèche
6. Difficultés météorologiques
7. Problèmes de sécurités
8. Cas normal

Si la piste est fermée on doit dévier tous les avions vers l'aéroport le plus proche.

### 3.2. Algorithme optimisation atterrissage :

**Tableau d'avions et leurs arrivées :**

Code d'avion CA	Heure d'arrivée HA	Les problèmes pbs
1005	6:05	8
6195	6:10	2/5
7991	6:15	8
1021	6:30	8
6175	6:50	8
6029	7:00	8
2001	7:05	1
1191	7:05	8
2005	7:15	8
1215	7:15	3/7
4800	7:40	8
60571	7:40	4
2009	7:55	8
4013	8:25	8
2015	8:25	6
4003	8:30	8

### Tableau de codage des problèmes :

Codage du problème	Problème :
1	La perte de contrôle de l'avion et les problèmes techniques
2	La panne de moteur de l'avion
3	L'urgence médicale en avion
4	La perte des systèmes hydrauliques
5	Manque de carburant et panne sèche
6	Difficultés météorologiques
7	Problèmes de sécurités
8	Cas normal

### Algorithme optimisation atterrissage :

**Fin du programme.**

Const n=16 ;

*/\* CA : code d'avion\*/*

*/\*HA : Heure d'arrivée\* /*

*/\*pbs : les problèmes\*/*

*/\*LA : L'heure Actuelle\*/*

*/\*X : la différence des horaire entre l'heure actuelle LA et l'heure d'arrivée HA d'un vol\*/*

*/\*EV : événement\*/*

Variable :

EV : entier ;

CA : entier ;

HA, LA, X : réel ;

pbs : entier ;

P : dim [1...n] entier ;

V :dim [1...n, 3] réel ;

Tab : dim [1...n, 1...3] d'atterrissage ;

/\*qui contient, le code de l'avion, l'heure, le problème lié à l'avion \*/.

/\*V : tableau des avions et leurs arrivées \*/

Var V : Tab ;

/\*On ajoute une procédure pour remplir le tableau de données des avions et leurs arrivées \*/

Procédure remplissage (var V : Tab ; m, j : entier) ;

Var i : entier ;

### **Début**

Pour i de 1 jusqu'à m faire

Ecrire ('donné tous les référence de l'avion ',i) ;

Pour j de 1 jusqu'à 3 faire

Lire (v [i, j]) ;

Fin pour

Fin pour

Pour i de 1 jusqu'à n faire

P[i]= entier V [i, 3] ;

Fin pour

Tant que EV <> 100 faire

Lire(EV) ;

/\*impression de l'arrivée des avions\*/

Pour i=1jusqu'à n faire

X=V [i, 2]-LA, /\*heure d'arrivée\*/

```

Lire (' l'arriver de l'avion i dans X heure' ) ;
Si X<0.10 alors
Impression (l'avion i doit atterrir)
Fin si
/*Séparation des avions qui arrive en même temps */
i=1 ;
Tant que i <=n-1
Pour j=i+1 jusqu'à n faire
X=V [i, 2]-V [j, 2] ;
Si X<=0.1 alors
Impression ('Il faut séparer l'avion ' i ' de l'avion ' j' ) ;
i=i+1 ; fin pour
fin tant que
Si EV =1 alors
/*inséré un nouvel avion dans le tableau de données V*/
i=i+1
Lire ('CA' ) ;
Lire ('HA' ) ;
Lire ('pbs' ) ;
V [i, 1]= CA ;
V [i, 2]= HA ;
V [i, 3]= pbs ;
Fin si.
Si EV=2 alors
/*pistes fermées*/

```



/\*déviation des avions sur d'autre aéroport \*/

Fin si

Si EV=3 alors

/\* classement des atterrissages\* /

Pour i de 1 jusqu'à m faire

Switch (P[i])

Case 1 : écrire (' la perte de contrôle ')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 2 : écrire (' la panne moteur')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 3 : écrire ('l'urgence médicale')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 4 : écrire (' la perte des systèmes hydraulique ')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 5 : écrire (' manque de carburant')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 6 : écrire (' difficultés météorologiques')

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]

Break ;

Case 7 : écrire ('problèmes de sécurités ')

```

Atterrissage d'urgence pour l'avion V [i, 1]
Break ;
Case 8 : écrire ('cas normal')
Break ;
Default : écrire (' erreur, vous n'avez pas tapé un chiffre \n') ;
Fin Switch
Fin si
Si EV=4 alors
/*plusieurs avion arrive en même temps*/
Séparation l'atterrissage des avions avec un intervalle de temps de 3 minute
    Fin si
Si EV=5 alors
/* l'avion i a atterrit , on le supprime du tableau d'arrivage des avions*/
Pour i de i jusqu'à m-1 faire
    Pour j de 1 jusqu'à 3 faire
        V [i, j] =V [i+1, j] ;
    Fin pour
Fin pour
Fin si
Fin tant que
Fin
Fin du programme.

```

## Programme en c++:

```
#include <iostream>
#include <stdlib.h>
#include<stdio.h>
#include<string.h>
#include<math.h>
#include<cmath>
using namespace std;

int main() {

const int n = 5;

int CA ;
double HA, LA, X;
int Pbs;
double V[n][3]; int P[n];

{
    int EV, i,j;
    for (i=1;i<=n;i++)
    {
        cout<<"donner toutes les references de l'avoin:"<<i<<endl<<endl;
        for (j=1;j<=3;j++)
        {
            cin>>V[i][j];
        }
    }
}
```

```

        {
            cin>>V[i][j];
        }
    }
    for(i=1; i<=5; i++){

P[i]=int(V[i][3]); }
        cout<<"donner l'heure actuelle"<<endl<<endl;
    cin>>LA;

// le tableau de données
cout<<endl<<" code de l'avion          l'heure d'arrivée          problèmes lié à l'avion"<<endl<<endl;
for(i=1; i<=5; i++){
    for(j=1; j<=3; j++){
        cout<<"          "<<V[i][j]<<"          ";>cout<<endl; }

while (EV!=100)

{

    cout<<"donne EV ";
    cin>>EV;

        for(i=1;i<=n;i++)

{

X=abs(V[i][2]-LA); /* X : heure virgule des mn*/
cout<<"XXX = "<<X; cout<<"l'arrivée de l'avion "<<i<<" DANS "<<X<<" HEURE"<< endl<<endl; system("PAUSE");

    if (X<=0.10) { cout<<"l'avion "<<i<<" doit atterrir"<<endl<<endl;}
}

        i=1;
        while(i<=n-1){ cout<<" iiii" <<i;
            for(j=i+1;j<=n; j++){ cout<<" jjjj= " <<j<<endl;

                X=abs(V[i][2]-V[j][2]); cout<<"XXX= " <<X<<"IIII= " <<i<<" JJ= " <<j<<endl;

                if ( X<=0.12){ cout<<" il faut séparer l'avion "<<i<<" de l'avion "<<j<<endl<<endl;

                    }i=i+1; }

                                system("pause");

        if(EV==1) //inséré un nouvel avion

        {
            i=i+1;
            cout<<"lecture de CA"<<endl;
            cin>>CA;
            cout << "lecture de HA"<<endl;
            cin >> HA;
            cout << "lecture de Dba"<<endl;

```

```

if(EV==1) //inséré un nouvel avion
{
    i=i+1;
    cout<<"lecture de CA"<<endl;
    cin>>CA;
    cout << "lecture de HA"<<endl;
    cin >> HA;
    cout << "lecture de Pbs"<<endl;
    cin>>Pbs;
    V[i][1]=CA;
    V[i][2]=HA;
    V[i][3]=Pbs;
}
if(EV==2)
{
    cout << "deviation des avions sur d'autre aeroport la piste est fermée"<<endl<<endl;
}
if(EV==3)

{
//classement des atterissages
for(i=1;i<=n;i++)
{ cout<<" avion "<<i<<" pbs="<< P[i]<<endl; system("pause");

```

```

switch (P[i])
{
    case 1:cout << "la perte de controle"<< endl<<endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l 'avion"<<V[i][1]<< endl<<endl;
        break;
    case 2:cout << "la panne moteur"<< endl<<endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<< endl<<endl;
        break;
    case 3:cout << "l'urgence médicale"<< endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<< endl<<endl;
        break;
    case 4:cout << "la perte des systèmes hydraulique "<< endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<< endl<<endl;
        break;
    case 5:cout << "manque de carburant"<< endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<<endl<<endl;
        break;
    case 6:cout << "difficultés météorologiques"<< endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<<endl<<endl;
        break;
    case 7:cout << "problemes de securites "<< endl<<endl;
        cout <<"atterissage d'urgence pour l'avion"<<V[i][1]<<endl<<endl;
        break;
    case 8:cout << "cas normal"<< endl<<endl;
        break;

    default :
        cout << "erreur, vous n'avez pas tapé un chiffre \n"<<endl<<endl;
        break;
}

```

```

    }
  }

  if (EV==4)
  {
    cout << "Separation l'atterrissage des avions avec un intervalle de temps de 3 minute " << endl;
  }

  if (EV==5)
  { cout<<"donner ieme avion qui a attérit"<<endl; cin>>i;
    while(i<=n-1)
    {
      for (j=1;j<=3;j++)
      {
        V[i][j]=V[i+1][j];
      } i=i+1;
    }
  }
}
}

/* Remplissage*/

```

L'exécution du programme :

```

donner toutes les references de l'avoin:1
1
2.3
3
donner toutes les references de l'avoin:2
2
2.5
1
donner toutes les references de l'avoin:3
3
3
6
donner toutes les references de l'avoin:4
4
3.5
8
donner toutes les references de l'avoin:5
5
4
7
donner l'heure actuelle
2

code de l'avion          l'heure d'arrivé     problmes lié ó l'avion
      1                  2.3                 3
      2                  2.5                 1
      3                  3                   6
      4                  3.5                 8
      5                  4                   7

```

```

donne EU 1
XXX = 0.31'arrivé de l'avion 1 DANS 0.3 HEURE
Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 0.51'arrivé de l'avion 2 DANS 0.5 HEURE
Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 11'arrivé de l'avion 3 DANS 1 HEURE
Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 1.51'arrivé de l'avion 4 DANS 1.5 HEURE
Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 21'arrivé de l'avion 5 DANS 2 HEURE
Appuyez sur une touche pour continuer...
iiiiiiiiiiii=1   jjjj= 2
XXX= 0.2IIII= 1 JJ= 2
   jjjj= 3
XXX= 0.5IIII= 2 JJ= 3
   jjjj= 4
XXX= 0.5IIII= 3 JJ= 4
   jjjj= 5
XXX= 0.5IIII= 4 JJ= 5
Appuyez sur une touche pour continuer...
lecture de CA
6
lecture de HA
4.5
lecture de Pbs
4

```



```

donne EU 2
XXX = 3.71'arrivé de l'avion 1 DANS 3.7 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 3.51'arrivé de l'avion 2 DANS 3.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 31'arrivé de l'avion 3 DANS 3 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 2.51'arrivé de l'avion 4 DANS 2.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 61'arrivé de l'avion 5 DANS 6 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
iiiiiiiiiiii=1 jjjj= 2
XXX= 0.2IIII= 1 JJ= 2
jjjj= 3
XXX= 0.5IIII= 2 JJ= 3
jjjj= 4
XXX= 0.5IIII= 3 JJ= 4
jjjj= 5
XXX= 3.5IIII= 4 JJ= 5
Appuyez sur une touche pour continuer...
deviation des avoins sur d'autre aeroport la piste est fermée

```

```

donne EU 3
XXX = 3.71'arrivé de l'avion 1 DANS 3.7 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 3.51'arrivé de l'avion 2 DANS 3.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 31'arrivé de l'avion 3 DANS 3 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 2.51'arrivé de l'avion 4 DANS 2.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 61'arrivé de l'avion 5 DANS 6 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
iiiiiiiiiiii=1 jjjj= 2
XXX= 0.2IIII= 1 JJ= 2
  jjjj= 3
XXX= 0.5IIII= 2 JJ= 3
  jjjj= 4
XXX= 0.5IIII= 3 JJ= 4
  jjjj= 5
XXX= 3.5IIII= 4 JJ= 5
Appuyez sur une touche pour continuer...
avion 1 pbs=3
Appuyez sur une touche pour continuer...
l'urgence médicale
atterrissage d'urgence pour l'avion1

  avion 2 pbs=1
Appuyez sur une touche pour continuer...
la perte de controle

atterrissage d'urgence pour l'avion2

  avion 3 pbs=6
Appuyez sur une touche pour continuer...
difficultés météorologiques
atterrissage d'urgence pour l'avion3

  avion 4 pbs=8
Appuyez sur une touche pour continuer...
cas normal

  avion 5 pbs=7
Appuyez sur une touche pour continuer...
problemes de securites

atterrissage d'urgence pour l'avion5

```

```

donne EU 4
XXX = 3.71'arrivé de l'avion 1 DANS 3.7 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 3.51'arrivé de l'avion 2 DANS 3.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 31'arrivé de l'avion 3 DANS 3 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 2.51'arrivé de l'avion 4 DANS 2.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 61'arrivé de l'avion 5 DANS 6 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
iiiiiiiiiiii=1 jjjj= 2
XXX= 0.2IIII= 1 JJ= 2
  jjjj= 3
XXX= 0.5IIII= 2 JJ= 3
  jjjj= 4
XXX= 0.5IIII= 3 JJ= 4
  jjjj= 5
XXX= 3.5IIII= 4 JJ= 5
Appuyez sur une touche pour continuer...
Separation l'atterrissage des avions avec un intervalle de temps de 3 minute
donne EU 5
XXX = 3.71'arrivé de l'avion 1 DANS 3.7 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 3.51'arrivé de l'avion 2 DANS 3.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 31'arrivé de l'avion 3 DANS 3 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 2.51'arrivé de l'avion 4 DANS 2.5 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
XXX = 61'arrivé de l'avion 5 DANS 6 HEURE

Appuyez sur une touche pour continuer...
iiiiiiiiiiii=1 jjjj= 2
XXX= 0.2IIII= 1 JJ= 2
  jjjj= 3
XXX= 0.5IIII= 2 JJ= 3
  jjjj= 4
XXX= 0.5IIII= 3 JJ= 4
  jjjj= 5
XXX= 3.5IIII= 4 JJ= 5
Appuyez sur une touche pour continuer...
donner ieme avion qui a attúrit

```

1

## **Conclusion :**

Dans ce projet nous nous sommes intéressé en premier lieu à donner un aperçu général des conditions de circulation des avions et les contraintes qui doivent être prises en charge par les contrôleurs de l'espace aérien lors d'un vol.

Ensuite nous avons mis en évidence les conditions liées à l'atterrissage d'un avion et sa gestion à la phase d'approche.

Enfin pour aider le contrôleur qui se trouve obligé de prendre une décision dans un laps de temps très court pour trancher sur un atterrissage selon des cas d'urgence ou non, nous avons élaboré un algorithme qui gère et définit un ordre d'atterrissages des avions .

On peut apporter des améliorations au programme d'aide à l'atterrissage des avions avec le temps surtout car l'aviation civile évolue très vite avec le temps.

## La Bibliographié

- [1] Jean-Baptiste GOTTELAND, *OPTIMISATION DU TRAFIC AU SOL SUR LES GRANDS AEROPORTS*, Thèse doctorat, 2004.
- [2] *Classification de l'espace aérien*, IVAO ELH Septembre 2010.
- [3] *LA POSITION APPROCHE [APP]*, IVAO ELH juillet 2012.
- [4] JAMAL ANAMMAS, *Autour de la résolution du conflit aérien*, mémoire de fin d'études licence, Université sidi Mohamed ben Abdallah faculte des sciences et techniques, 2016.
- [5] Brunilde Girardet, *Trafic aérien : détermination optimale et globale des trajectoires d'avion en présence de vent*, thèse doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2014.
- [6] Marianne RAFFARIN, *Le contrôle aérien en France : congestion et mécanismes de prix*, thèse doctorat, Université de PARIS 1, 2002.
- [7] Nathalie Lenoir. Congestion et créneaux aéroportuaires. CEDECE 2004, colloque de la Commission pour l'Étude des Communautés Européennes, Oct 2004, Bordeaux, France. Pp 377-388.
- [8] UNITED STATES GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE, *Assigning Air Traffic Control Costs to Users Elements of FAA's*, October 2010.
- [9] R. Guettaf, F. Mora-Camino, *Pricing Schemes for Air Traffic Services through Multi-Level Approaches*, Applied Computing and Informatics, 2018.
- [10] R. Guettaf, *contribution à la décision multicritère dans les réseaux de transport aérien*, thèse doctorat, UMMTO, 2019.
- [11] Direction Générale de l'Aviation Civile, *Décision du Ministre du Transport N° 030 du 13 février 2009*.
- [12] LUSTUBLOG, CAT.OP.MPA.150, 29 AVRIL 2018
- [13] International Civil Aviation Organisation. *Convention relative à l'aviation civile internationale*. Doc. OACI n° 7300/9, ninth edition, 2006.
- [14] ICAO, *Manual ou Air Navigation Services Economics*, Doc 9161, 2013 Edition.
- [15] P. Holder, *Airline operation costs*, Managing Air craft Maintenance costs conference Brussels (2003).
- [16] ICAO, *Tariffs for Airport and Air Navigation services*, 2010 Edition.