

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique
Spécialité : Opérations Aérienne

THEME

Les nouvelles technique appliquées à la gestion du trafic aérien

Présenté par :

Mlle.CHOUTRI Imane ;

*Encadre par :
Mr.BOUDANIA.*

ANNEE UNIVERSITAIRE 2009/2010.

Résumé

D'après les analyses et les prévisions du trafic aérien de ces dernières années en FIR Algérie, on a constaté que l'espace aérien Algérien devient de plus en plus saturé.

Afin de ne pas confronté aux problèmes posées par la densification du trafic, l'Algérie a mis en place tout les moyens nécessaires pour améliorer la capacité de l'espace aérien : systèmes de traitement, radars, ADS/C, moyen de télécommunication VHF, HF, CPDLC et a adopté des nouveaux concepts recommandé par l'OACI tel que le RNAV, RNP, et le RVSM. Sans oublier le projet PDGEA, et la création du CCR Tamanrasset.

Abstract

According to the analysis and forecasts of air traffic in recent years in Algeria FIR, it was found that the Algerian airspace becomes more saturated.

To avoid facing the problems raised by the dense traffic, Algeria has implemented all necessary means to improve the capacity of the airspace: treatment systems, radar, ADS/C, VHF telecommunication means, HF, CPDLC and introduced new concepts recommended by the ICAO as the RNAV, RNP and RVSM. Without forgetting the project PDGE, and the creation of the new CCR in Tamanrasset.

ملخص

وفقا لتحليل وتوقعات الحركة الجوية في السنوات الأخيرة في المجال الجوي بالجزائر، وجدنا أنه أصبح أكثر إشباعا من السابق.

لتجنب مواجهة المشاكل التي تثيرها حركة المرور الكثيفة، نفذت الجزائر جميع الوسائل اللازمة لتحسين قدرة المجال الجوي: الرادار، وتنمية وسائل الاتصالات السلكية واللاسلكية ذات التردد العالي جدا، بإتباع المفاهيم الجديدة. دون أن ننسى مشروع PDGEA.

Remerciements

Merci bon DIEU pour la force, le courage, la santé et la volonté que j'ai eue pour achever ce travail.

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur **BOUDANI.A**, qui, en tant que Directeur de mémoire, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, et qui a eu la gentillesse de lire et corriger ce travail.

J'exprime ma gratitude à tous les consultants et internautes rencontrés lors des recherches effectuées et qui ont accepté de répondre à mes questions avec gentillesse.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements aux membres de jury qui me font l'honneur de juger ce travail, et à tous les enseignants du département d'aéronautique de Blida, et de l'université de Médéa.

Merci à toutes et à tous.

Dédicaces

A mes très chers parents NACIRA et MED.SALAH
qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné
un magnifique modèle de labeur et de
persévérance.

A mes chers frères YUCEF et YACINE, a ma
sœur AMINA.

A toute ma famille et mes amis,
Et a moi-même.

Introduction Général.....1

CHAPITRE I : Description de l'espace aérien

I.1 Introduction.....3

I.2 Généralité sur les espaces aériens.....3

 I.2.1 Organisation de l'espace aérien.....3

 I.2.2 Services de la circulation aérienne.....4

 I.2.3 Devisions de l'espace aérien.....6

 I.2.4 Classification des espaces aériens.....8

 I.2.5 Optimisation de l'espace aérien.....9

I.3 Situation actuelle de l'espace aérien Algérien.....10

 I.3.1 Introduction.....10

 I.3.2 Limite de l'espace aérien Algérien.....11

 I.3.3 Devisions de l'espace aérien Algérien.....11

 I.3.4 Les zones déléguées à l'approche.....12

 I.3.5 Zones à statue particulière.....13

 I.3.6 Réseau de route.....15

 I.3.7 Mise en œuvre du RVSM, RNP, RNAV en Algérie.....16

 I.3.8 Moyen de communication, navigation, surveillance en Algérie.....17

 I.3.9 Organismes de contrôle.....23

CHAPITRE II : L'évolution du trafic aérien Algérien

II.1 Introduction.....26

II.2 Evolution du trafic aérodromes (2000-2009).....27

II.3 Evolution du trafic de route (1998-2009).....29

II.4 Evolution du trafic par secteur (2002-2007).....30

II.5 Prévion de trafic.....	31
II.5.1 Prévion de trafic route.....	31

CHAPITRE III : Les problèmes majeurs de trafic aérien

III.1 Généralités.....	34
III.2 La résolution des conflits en route.....	35
III.2.1 Introduction.....	35
III.2.2 Complexité du problème de résolution de conflits.....	36
III.2.3 Approche centralisée, approche autonome.....	38
III.3 Optimisation du trafic au sol (Roulage au sol).....	39
III.3.1 Introduction.....	39
III.3.2 Contrôle du trafic aérien.....	40
III.3.3 Le trafic aéroportuaire.....	41
III.3.4 Difficultés aéroportuaires identifiées.....	46

CHAPITRE IV : Les méthodes récentes appliquées à la gestion du trafic aérien

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Les méthodes d'optimisation.....	49
IV.2.1 Algorithmes génétique.....	49
IV.2.2 Programmation par contrainte.....	52
IV.2.3 Réseau de neurones.....	55
IV.2.4 Technique de branch and bound.....	57
IV.3 Projets de recherche ATM en cours.....	59
IV.4 Analyse préliminaire.....	69
IV.4.1 Introduction.....	69
IV.4.2 Les principaux concepts pour l'optimisation du trafic au sol.....	70

IV.5 Projet de Développement et Gestion de l'Espace Aérien *PDGEA*.....75

IV.6 Nouveau CCR.....84

Conclusion Général.....85

Annexe

Glossaire

Bibliographie

Listes des Tableaux

Tableau I.1 : Classification des Espaces Aériens.

Tableau I.2 : classification des secteurs en Algérie.

Tableau I.3 : Les centres de contrôle d'approche.

Tableau I.4: Moyens de communication.

Tableau I.5: Moyens de navigation.

Tableau I.6 : L'emplacement des Radar en Algérie.

Tableau II.7 : Prévision de Trafic en Route.

Tableau IV.8 : L'emplacement des nouvelles stations VHF.

Tableau IV.9 : L'emplacement des nouvelles stations VSAT.

Tableau IV.10 : Nouvelles stations radars.

Tableau IV.11 : Emplacement de l'ADS/B.

Listes des Graphes

Graphe II.2.1 : Evolution du trafic aéroport de 2000 à 2009.

Graphe II.2.2 : Détail du trafic aéroport (Année 2008).

Graphe II.3 : Evolution du trafic de route de 1998 à 2009.

Graphe II.4 : Evolution du trafic par secteur de 2002 à 2007.

Graphe II.5 : Prévision du trafic Route.

Figure I.1 : Position de contrôle du trafic.

Figure I.2 : Organisation de l'espace aérien.

Figure I.3 : Niveaux de croisières.

Figure I.4: Représentation des limites de l'espace aérien Algérien.

Figure I.5: Sectorisation actuelle.

Figure I.6 : CTA.

Figure I.7 : Les Espaces Restreints en Algérie.

Figure I.8 : Réseau de route.

Figure I.9 : Carte de l'espace aérien RVSM en Algérie.

Figure I.10 : Couverture VHF actuelle.

Figure I.11 : Couverture des stations VOR.

Figure I.12 : Couverture Radar actuelle.

Figure I.13: Système TRAFCA.

Figure I.14 :L'emplacement des Aérodomes.

Figure III.15 : Schéma de conflits.

Figure III.16: Exemple de cluster.

Figure III.17 : Capacité(s) de l'aéroport.

Figure III.18 : Infrastructures aéroportuaires.

Figure IV.19 : Principe général des algorithmes génétiques.

Figure IV.20 : Principe des réseaux MLP *multi-layer perceptron*

Figure IV.21 : Couverture VHF des FIRs Nord et Sud.

Figure IV.22 : Stations VHF de la FIR Nord.

Figure IV.23 : Stations VHF de la FIR Sud.

Figure IV.24 : Stations VSAT Nord et Sud.

Figure IV.25 : Stations Radar du Nord.

Figure IV.26 : Stations Radar du Sud.

La recherche dans le domaine de la gestion du trafic aérien est encore au stade du balbutiement. Pendant longtemps on a cru qu'en augmentant le nombre de contrôleurs aériens, de secteurs de contrôle, de pistes et de taxiways sur les aéroports, on allait pouvoir absorber l'augmentation du trafic. On s'est ensuite intéressé à réduire les espacements entre avions, augmenter les cadences sur les pistes, réorganiser localement le réseau de routes ou les grandes approches.

C'est seulement vers la fin des années 80 que les premiers projets de recherche ont débutés dans le domaine de la gestion du trafic aérien. Ils furent d'abord lancés par des équipes issues du monde opérationnel ayant une bonne connaissance de l'environnement des problèmes, mais peu de compétences dans les domaines mathématiques et informatiques.

Des approches plus théoriques sont ensuite apparues, menées par des chercheurs issus du monde universitaire, parfois tentés d'oublier certaines contraintes opérationnelles liées aux problèmes de gestion du trafic aérien, au profit des outils qu'ils maîtrisaient. La grande difficulté dans toute tentative d'optimisation d'un problème opérationnel consiste à le simplifier suffisamment pour permettre d'en extraire un modèle mathématique sur lequel on va pouvoir utiliser des méthodes d'optimisation évoluées, sans pour autant rendre impossible la prise en compte ultérieure des contraintes opérationnelles que l'on aura mises de côté pendant la phase de modélisation.

Ma thèse décrit la situation actuelle de l'espace aérien Algérien, l'évolution du trafic aérien en FIR Alger, les problèmes majeurs de l'ATM et enfin les différentes méthodes d'optimisation et les projets de recherches appliquées à la gestion du trafic aérien.

I.1 Introduction :

Le monde de l'aviation s'est fortement développé ces dernières années, pour conséquent, le trafic aérien est devenu de plus en plus évolutif.

Ces évolutions entraînent une diminution de la capacité des espaces, ce qui représente une menace pour la sécurité. Pour cela chaque Etat est responsable de l'espace aérien au-dessus de son territoire, et ceci sur la base de souveraineté. L'Etat doit fournir le service de la navigation aérienne, il est également responsable de la sécurité, la continuité, et l'intégrité des systèmes de navigation aérienne. Si un état ne peut remplir ces exigences de réglementation internationale, il peut déléguer les portions d'espace aérien situées au-dessus de son territoire à un autre état par Accord Mutuel la charge d'établir et d'assurer ses services de la circulation aérienne. Cette délégation ne porte pas atteinte à sa souveraineté nationale.

La responsabilité de l'Etat délégateur n'est engagée que pour les aspects techniques et opérationnels liés à l'acheminement sûr et rapide de la circulation aérienne dans l'espace délégué.

I.2 Généralité sur les espaces aériens :

I.2.1 Organisation de l'espace aérien

Les types de vols

- Vol VFR (Visuel Flight Rule) ou régime de vol à vue: C'est un régime de vol qui est soumis à des conditions de météorologie assez bonnes. En général le vol VFR demande une bonne visibilité et des plafonds nuageux assez élevés.
- Vol IFR (Instrument Flight Rule) ou régime de vol aux instruments: Le pilote navigue alors grâce au matériel de radionavigation et n'a donc pas besoin de références visuelles.

Pour assurer la gestion du trafic aérien l'organisation internationale de l'aviation civile (OACI) met en place des services de circulation aérienne qui dépendent des différentes phases de vol et selon ces derniers interviennent les services de la circulation aérienne.

I.2.2 Services de la circulation aérienne

Au fur et à mesure que les mouvements d'aéronefs se sont intensifiés, il s'est avéré nécessaire de mettre en place des structures pour assister les activités aéronautiques et pour régler le flux de la circulation aérienne.

Des organismes ont donc été constitués. Ce sont les organismes de la circulation aérienne qui rendent trois types de services :

- Le service de contrôle ;
- Le service d'information de vol ;
- Le service d'alerte.

A) Le service de contrôle

A pour objet :

- De prévenir les abordages entre les aéronefs ;
- De régler et d'accélérer la circulation aérienne ;
- De prévenir les collisions entre les aéronefs qui évoluent au sol et les obstacles.

Les organismes chargés du service du contrôle assurent également le service d'information de vol ainsi que le service d'alerte.

Le service de contrôle se subdivise en trois parties selon la phase du vol à laquelle il s'applique:

Le contrôle d'aérodrome : s'effectue à partir des tours de contrôle (TWR : TOWER), il assure la sécurité et le respect des procédures dans les phases de décollage, d'atterrissage et de roulage, afin de :

- Empêcher les collisions sur l'aire de manœuvre ;
- Assurer l'acheminement sûr, ordonné et rapide de la circulation aérienne.

Le contrôle d'approche (APP : APPROACH) : Service du contrôle de la circulation aérienne pour les aéronefs en vol contrôlé à l'arrivée et au départ, il s'effectue par un bureau d'approche un centre de contrôle régional (CCR). La fonction de ce service est de prévenir les abordages entre aéronefs, ordonner la circulation aérienne sur les phases d'arrivée et de départ.

Le contrôle régional (CCR : Centre de contrôle régional) : s'effectue par un centre de contrôle en route dont le but est de prévenir les abordages entre aéronefs, d'accélérer et régulariser la circulation aérienne.

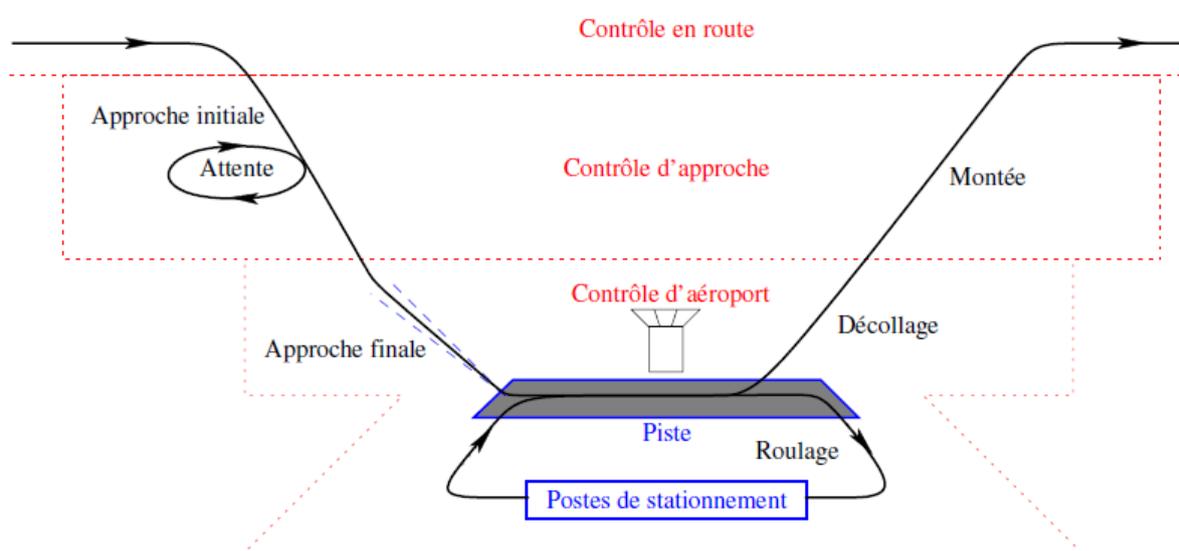


Figure I.1 : Position de contrôle du trafic.

B) Le service d'information de vol (FIS : Flight Information Service)

Est assuré dans le but de fournir les avis et renseignements utiles à l'exécution sûre et efficace du vol : informations météorologiques, information sur l'état des moyens au sol de navigation, information sur le trafic (quand le service de contrôle n'est pas assuré dans cette zone).

C) Le service d'alerte

Est assuré dans le but d'alerter les organismes appropriés lorsque les aéronefs ont besoin de l'aide des organismes de secours et de sauvetage, et de prêter à ces organismes le concours nécessaire.

I.2.3 Divisions de l'espace aérien

L'espace aérien est divisé en deux parties :

- Espace aérien contrôlé ;
- Espace aérien non contrôlé.

Espace aérien contrôlé

L'espace aérien contrôlé est un espace dans lequel les services rendus sont les services de contrôle, d'information de vol et d'alerte.

❖ **CTA : (Control Area ou les régions de contrôle)**

Sont délimitées de telle sorte qu'elles englobent un espace aérien suffisant pour contenir les trajectoires ou parties de trajectoires des aéronefs en vol IFR auxquels on désire fournir les services de contrôle de la circulation aérienne, compte tenu possibilités des aides à la navigation normalement utilisées dans ces régions.

Dans la CTA on distingue :

- Les régions de contrôle terminales (TMA : Terminal Management Area) : Région de contrôle établie, en principe, au carrefour de routes ATS aux environs d'un ou de plusieurs aérodromes importants. Sa limite inférieure est en générale de 3000ft MSL, sa limite supérieure ne dépasse pas le FL195.
- Les voies aériennes (AWY : Air Way) : Région de contrôle ou portion de région de contrôle présentant la forme d'un couloir, l'axe des AWY est défini par des balises de radionavigation (radiobalisées), et dont la largeur est de 10NM (18.5km).

❖ **CTR : (Control Zone ou les zones de contrôle)**

Elles englobent les trajectoires initiales et finales avec la piste, en principe un cercle de 5,6NM centré sur le terrain avec un plafond de 3000ft MSL ou 1000ft sol.

❖ **UTA : (Les régions supérieures de contrôle)**

Il s'agit des espaces supérieurs contrôlés, la limite inférieure est représentée par la CTA, la supérieure est située au FL660.

Espace aérien non contrôlé

L'espace aérien non contrôlé est un espace dans lequel les services rendus se limitent aux services d'information de vol et d'alerte. Ils sont de deux types :

❖ **FIR : (Flight Information region ou Région d'information de vol)**

Une région d'information de vol est délimitée de façon à couvrir tout le réseau de route aérienne qu'elle doit desservir et à l'intérieure duquel le service d'information de vol et le service d'alerte sont assurés. Leurs limites vont de la surface jusqu'au FL195.

❖ **UIR : (Upper flight Information Region ou Région supérieure d'information de vol)**

Ils ont été créés afin de limiter le nombre de région d'information de vol (FIR) que les aéronefs volant à très haute altitude auraient à traverser.

Ces régions englobent l'espace aérien situé à l'intérieure des limites latérales d'un certain nombre de FIR.

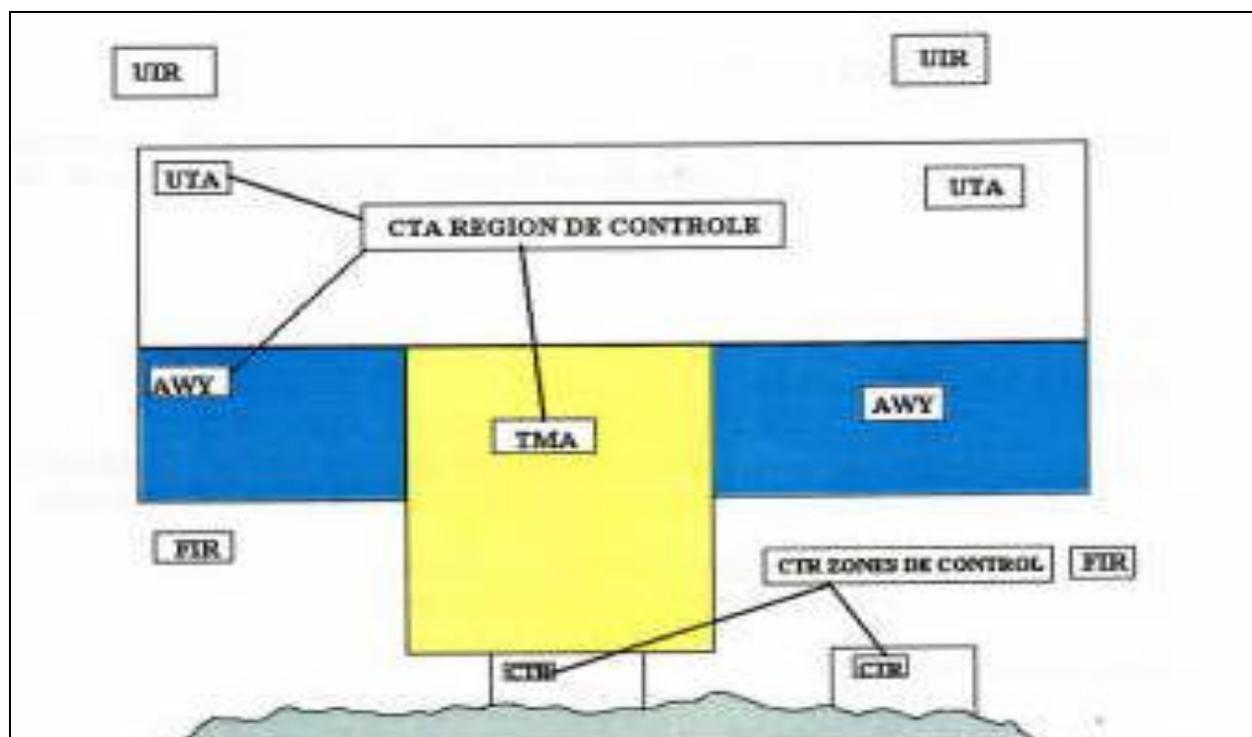


Figure I.2 : Organisation de l'espace aérien.

I.2.4 Classification des espaces aériens

Il existe différentes classes d'espace aérien, notamment destinées à établir les règles de compatibilité IFR/VFR (voir tableau 1).

Ce tableau résume les différentes classes des espaces aériens :

Classe	Type de vol	Séparation assurée	Service	Autorisation ATC
A	IFR seulement	A tous les aéronefs	ATC	Oui
B	IFR	A tous les aéronefs	ATC	Oui
	VFR	A tous les aéronefs	ATC	Oui
C	IFR	IFR avec IFR IFR avec VFR	ATC	Oui
	VFR	VFR avec IFR	-ATC pour séparation avec IFR ; -Information de trafic VFR/VFR et sur demande avis d'évitement de trafic.	Oui
D	IFR	IFR avec IFR	-ATC ; -Information de circulation avec vols VFR (suggestion de manœuvre d'évitement sur demande).	Oui
	VFR	Néant	Information de circulation avec tous les autres vols (suggestion de manœuvre d'évitement sur demande).	Oui
E	IFR	IFR avec IFR	-ATC ; -Information de circulation avec VFR dans la mesure du possible.	Oui
	VFR	Néant	Information de circulation avec tous les vols dans la mesure du possible.	Non
F	IFR	IFR avec IFR autant que possible	-Service consultatif de la circulation aérienne ; -Service d'information de vol.	Non
	VFR	Néant	Service d'information de vol.	Non
G	IFR	Néant	Service d'information de vol.	Non
	VFR	Néant	Service d'information de vol.	Non

Tableau I.1 : Classification des Espaces Aériens.

I.2.5 Optimisation de l'espace aérien

Pour une bonne exploitation de l'espace aérien on fait recours à différentes techniques (système RVSM, RNP...). Afin d'obtenir un espace aérien plus optimisé.

RVSM (Minimum Réduit de Séparation Verticale)

Le but de mise en œuvre de la RVSM est de réduire la séparation verticale de 2000ft à 1000ft au-dessus de FL290, cela permet aux usagers d'avoir six niveaux de vol supplémentaires. Ces niveaux de croisières supplémentaires augmenteront la capacité de l'espace aérien, réduire les rendements de consommation carburant, améliore la flexibilité opérationnelle de l'organisme de contrôle de circulation aérienne, et assure la gestion du trafic aérien.

Niveaux de croisière RVSM

Les niveaux de croisière RVSM définis par l'OACI (avec une séparation de 1000ft) sont :

Tableau des niveaux de croisière RVSM

FL430*	
	FL410
FL400	FL390
FL380	FL370
FL360	FL350
FL340	FL330
FL320	FL310
FL300	FL290
FL280*	

Figure I.3 : Niveaux de croisières.

La transition RVSM

La transition est établie sur la base d'un accord bilatéral entre les états ou les organismes de contrôle qui se situent aux limites des espaces RVSM. Dans cette phase de transition entre les espaces RVSM et non-RVSM, l'aéronef va changer de niveaux de croisière RVSM en passant d'une séparation de 2000pieds.

Une série de simulation ATC en temps réel, a montré que le RVSM permettra de réduire la charge de travail des contrôleurs.

RNAV (Area Navigation System) Système de navigation de surface

La RNAV est une méthode de navigation permettant le vol sur n'importe quelle trajectoire voulue dans la limite de la couverture des aides de navigation de référence au sol ou dans les limites de possibilités d'une aide autonome, ou grâce à une combinaison de ces deux moyens.

RNP (Système de qualité de navigation requise)

Le concept de RNP concerne la précision de navigation qui doit être maintenue par un aéronef volant à l'intérieur d'un espace aérien ou sur une route particulière. Etant donnée que les niveaux de qualité de navigation qui sont requis varient d'un espace à l'autre selon la densité de la circulation et la complexité des routes suivies.

La RNP définit la qualité de navigation requise à l'intérieur d'un espace aérien, elle permet d'espacer plus étroitement les routes, de réduire l'espacement entre les aéronefs, et de réduire la hauteur de franchissement des obstacles sans nécessairement faire intervenir l'ATC.

I.3 Situation actuelle de l'espace aérien en Algérie :

I.3.1 Introduction

Selon sa situation géographique (19°N jusqu'au 39°N de latitude et de 9°W jusqu'au 12°E de longitude), l'ALGÉRIE se trouve au carrefour du trafic EST/OUEST et NORD/SUD. Cet emplacement stratégique la rend un partenaire incontournable dans les grandes rencontres qu'organise l'OACI dont elle est membre.

I.3.2 Limite de l'espace aérien Algérien

L'espace aérien Algérien est entouré des FIR de plusieurs pays Africains et Européens, tel que FIR Marseille, Barcelone et Séville au Nord et adjacent à l'Ouest à la FIR Casablanca, à l'Est à la FIR Tunisie et Tripoli, au Sud à la FIR Dakar et Niamey.

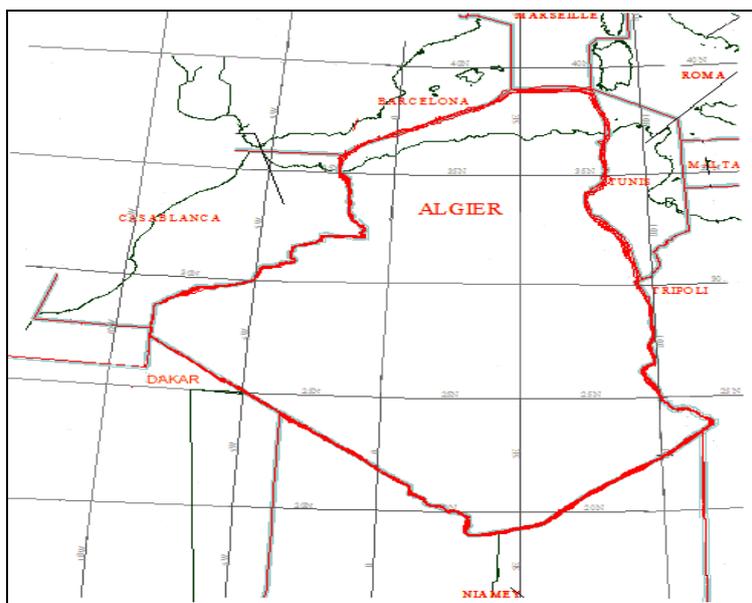


Figure I.4: Représentation des limites de l'espace aérien Algérien.

I.3.3 Division de l'espace aérien Algérien

L'espace aérien Algérien est composé d'une seule région d'information de vol (FIR), à l'intérieur de cette FIR, quatre classes d'espaces sont utilisées actuellement. Cette FIR a été divisée en sept secteurs, ces derniers sont classés comme suit :

- Les (03) secteurs du NORD (Nord/Est, Centre et Nord/Ouest) et les (03) secteurs du SUD (Sud/Est, Sud/Centre et Sud/Ouest) ;
- Le secteur Sud/Sud.

Le tableau ci-dessus spécifie les sept secteurs :

N° secteur	Secteur	Limite Supérieure	Limite Inférieure
01	Centre Alger supérieur	FL450	FL245
	Centre Alger inférieur	FL245	450m GND/MSL
02	Nord/Est	FL450	
03	Nord/Ouest (Oran)		
04	Sud/Centre	UNL	GND/MSL
05	Sud/Est		
06	Sud/Ouest		
07	Sud/Sud		

Tableau I.2 : classification des secteurs en Algérie.

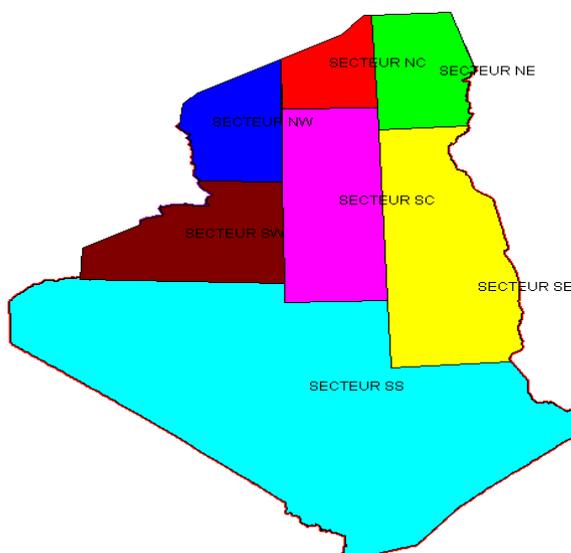


Figure I.5: Sectorisation actuelle.

I.3.4 Les zones déléguées à l'approche

Pour mieux gérer les manœuvres des avions autour des aéroports ayant la plus grande densité de trafic, l'Algérie a développé dans ce cadre cinq zones d'approche gérées par cinq centres de contrôle d'approche qui sont :

1. Approche Alger/Houari Boumediene ;
2. Approche Annaba/EI Mellah ;
3. Approche Constantine/Mohamed Boudiaf ;
4. Approche Hassi Messaoud/Oued Irara Krim ;
5. Approche Oran/Essania.

Désignation	Classe	Limite Inférieure	Limite Supérieure
CTA Alger/Houari Boumediene	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Annaba/El Mellah	D	450m GND/MSL	FL85
CTA Constantine/Mohamed Boudiaf	D	450m GND/MSL	FL105
CTA Hassi Messaoud/Oued Irara Krim	E	900m GND/MSL	FL105
CTA Oran/Essania	D	450m GND/MSL	FL40

Tableau I.3 : Les centres de contrôle d'approche.

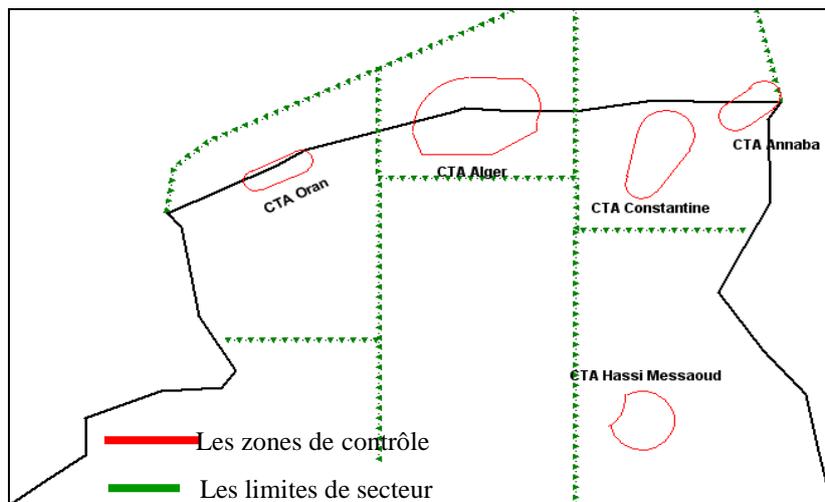


Figure I.6 : CTA.

I.3.5 Zones à statue particulière

Ces zones ont souvent été créées pour des besoins spécifiques propres à la zone considérées. Elles sont classées en 3 catégories :

Zones interdites (P : Prohibited) : Espace aérien de dimensions définies, au-dessus du territoire ou des eaux territoriales d'un Etat, dans les limites duquel le vol des aéronefs est interdit. La zone est affectée d'une appellation composée de lettres de Nationalité- (DA) suivi de la lettre (P) indiquant le type et le numéro de la zone. Un nom géographique peut être utilisé avec l'identification.

Exemple : DA-P51 AIN OUSSARA.

I.3.6 Réseau de route

Le réseau de route en Algérie est composé de routes ATS, routes ATS domestique et routes RNAV.

Routes ATS domestiques :

Une route domestique est une voie aérienne utilisée entre deux aéroports Algériens. Elle est caractérisée par la lettre (J) suivi d'un chiffre pour les routes inférieures et les lettres (UJ) suivi d'un chiffre pour les routes supérieures.

Routes ATS :

Les autres routes sont des cheminements utilisés par les aéronefs pour la desserte de l'Algérie et le transit dans l'espace Algérien. Elle sont caractérisées par les lettres A, B, G, R suivie d'un chiffre pour les routes inférieures et les lettres UA, UB, UR suivie d'un chiffre pour les routes supérieures.

Routes RNAV :

Une route RNAV est une voie aérienne utilisée par les aéronefs civils et utilisant la méthode de navigation de surface qui permet le vol sur n'importe quelle trajectoire voulue dans les limites de la couverture des aides radionavigation.

Une route RNAV en Algérie est caractérisée par les lettres UN, UM suivie d'un chiffre.

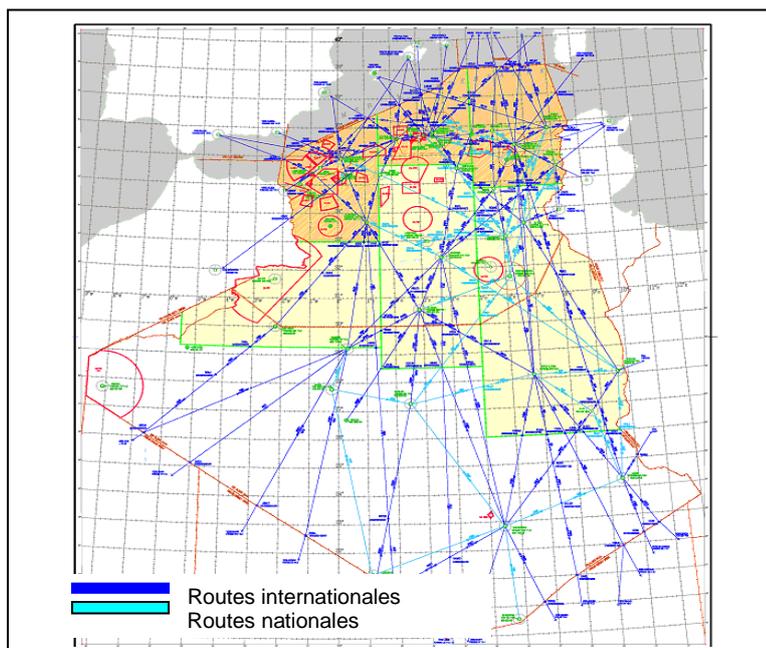


Figure I.8 : Réseau de route.

I.3.7 Mise en œuvre du RVSM, RNP, RNAV en Algérie

Mise en œuvre du RVSM en Algérie

Le Nord de l'espace Algérien est devenu RVSM le 25 Octobre 2007. Les procédures RVSM en Algérie consistent à garantir un minimum de séparation verticale de 300m (1000pieds) entre les niveaux de vol FL290 et FL410 inclus, désigné Minimum Réduit de Séparation Verticale (RVSM) dans la partie Nord de la FIR Alger.

L'espace aérien RVSM ne couvrant pas la totalité de la FIR Alger, il y a création d'une zone de transition RVSM au Sud de l'espace aérien RVSM de la FIR Alger.

Mise en œuvre du RNP en Algérie

- Mise en œuvre de la RNP 5 sur la partie Nord de la FIR (jusqu'au 29N) pour les routes aériennes d'orientation Est-ouest/Ouest Est est appliquée en 2005 ;
- Mise en œuvre de la RNP 12.6 sur la partie Sud de la FIR est appliquée en 2005.

Mise en œuvre du RNAV en Algérie

Le réseau de route actuel en Algérie comporte plusieurs routes RNAV, surtout sur la partie Sud qui due au manque de disponibilité des moyens radios navigation dont l'implantation est rendue difficile par la nature semi-desertique des régions traversées. La navigation RNAV se présente donc comme la meilleure solution pour améliorer et optimiser le réseau de routes.

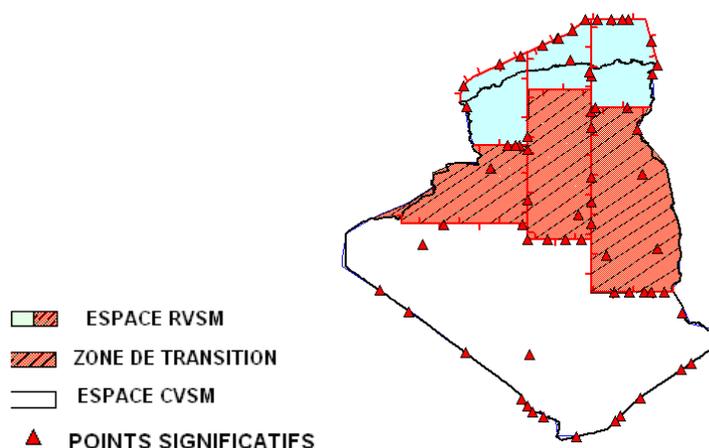


Figure I.9 : Carte de l'espace aérien RVSM en Algérie.

I.3.8 Moyens de Communication, Navigation, Surveillance en Algérie

Communication

i. Couverture VHF/HF :

La communication en Algérie est assurée par les liaisons VHF permettant la couverture d'une partie importante de l'espace aérien Algérien au-dessus du FL240. Actuellement, il existe (16) sites radio VHF réparties sur FIR Alger, avec une couverture double au Nord. Signalons que sur la zone extrême Sud, aucune couverture radio VHF n'est assurée d'où la nécessité d'utiliser la couverture HF.

La couverture VHF est actuellement inférieure à 90% de la totalité de la FIR. De nouvelles antennes VHF sont en phase d'installation pour compléter la couverture actuelle.

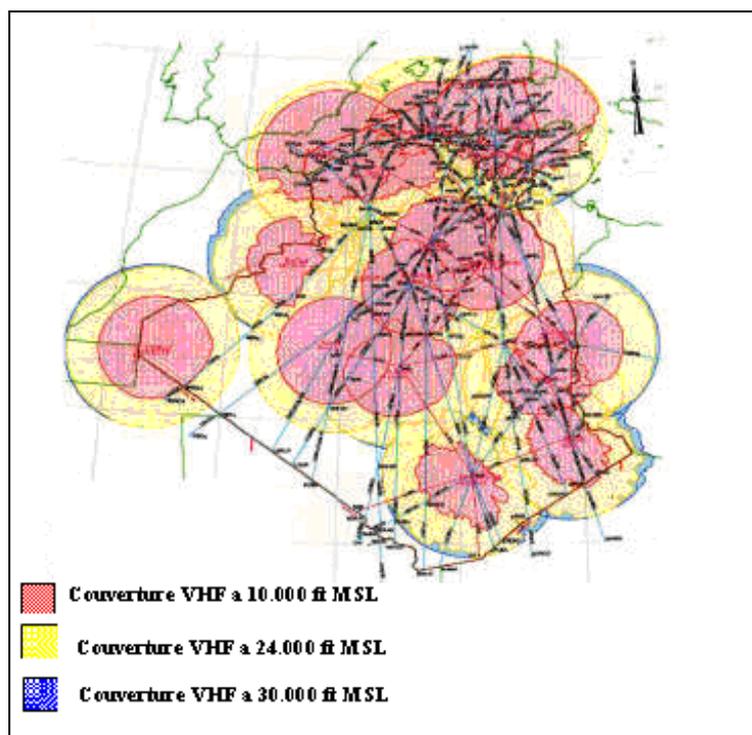


Figure I.10 : Couverture VHF actuelle.

ii. CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications) :

Le CPDLC est une application de liaison de données qui permet l'échange direct fondé sur messages entre le contrôleur et le pilote, au lieu d'une communication vocale. Le CPDLC améliore les capacités de communication dans les zones désertiques où l'utilisation des communications vocales n'est pas considérée comme efficace, en particulier dans les cas où les contrôleurs et les pilotes doivent s'en remettre à un tiers HF.

iii. Réseau Service Fixe de Télécommunication Aéronautique (RSFTA) :

L'échange des messages tel que les NOTAM, Plan de vols,...etc. est assuré par le réseau du service fixe de télécommunication aéronautique (RSFTA). L'Algérie dispose d'un système de commutation des messages RSFTA. Les supports de télécommunication en Algérie sont assurés par le réseau national géré par Algérie Télécom, et le réseau VSAT est à la charge de l'ENNA.

<i>Type d'Equipement</i>	<i>Nombre</i>
- Antenne Avancée	20
- Station VSAT	15
- Station Emetteur-Récepteur Haute Fréquence	08
- Emetteur-Récepteur VHF Tour	34
- Emetteur-Récepteur VHF CCR	03
- Enregistreur	27
- Station Inmarsat	06
- Thuraya	18

Tableau I.4: Moyens de communication.

Navigation

En générale, la navigation en Algérie s'appuie sur le système VOR/DME, la plupart de ces stations sont installées dans les aéroports aux prolongements des pistes principales à l'exception de quelques unes qui sont implantées dans des sites plus éloignés. Il existe actuellement :

<i>Type d'Equipement</i>	<i>Nombre</i>
- ILS (Instrument Landing System)	13
- VOR (VHF Omni Range)	39
- DME (Distance Measuring Equipment)	45
- NDB (Non Directional Beacon)	33
- VOR Mobile	06
- Radiogoniomètre	09

Tableau I.5: Moyens de navigation.

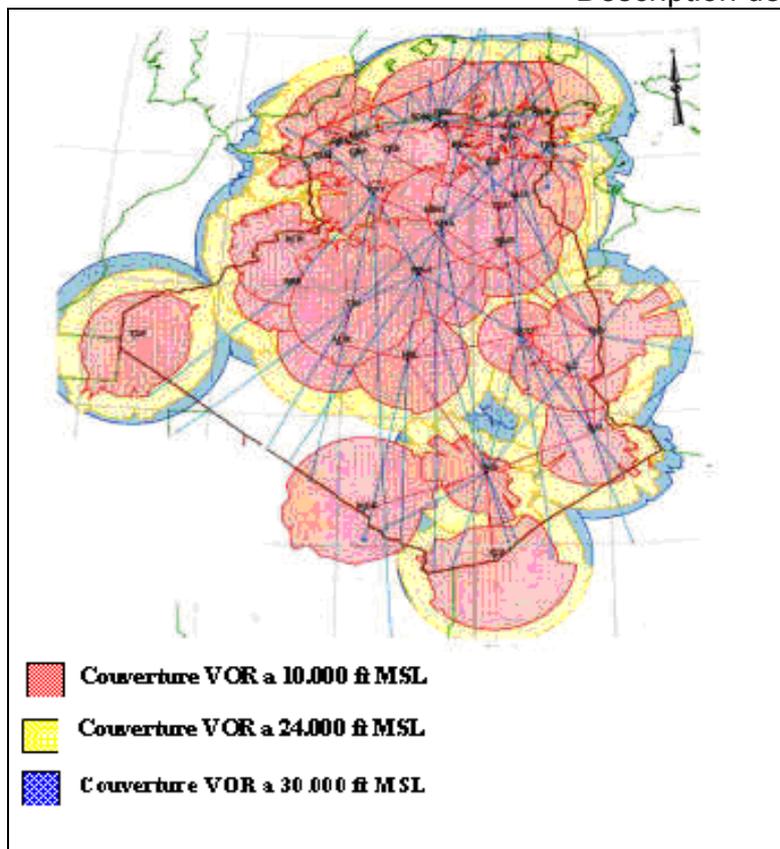


Figure I.11 : Couverture des stations VOR.

Surveillance

i. Couverture Radar :

Cinq radars secondaires (SSR) d'une portée de 450 km et un radar primaire ont été installés en tant qu'élément du projet TRAFCA.

Le système de contrôle du trafic aérien (ATC) peut utiliser le radar primaire de surveillance et le radar secondaire de surveillance seuls ou en combinaison pour assurer les services de contrôle de la circulation aérienne.

Type	Station Radar	Site	Date d'installation
PSR/SSR	Oued Smar	Alger	Février 2001
SSR	Seraidi	Annaba	Décembre 2001
SSR	Murdjadjo	Oran	Janvier 2001
SSR	Guemmar	El Oued	Avril 2002
SSR	Bouderga	El Bayadh	Mai 2003

Tableau I.6 : L'emplacement des Radar en Algérie.

Le système radar décrit ci-dessus est destiné à fournir les services de contrôle, de surveillance et d'information radar de route dans les trois secteurs du Nord de la FIR Alger et le service radar d'approche en zone terminale de l'aérodrome d'Alger.

ii. ADS/C (Automatic Dependent Surveillance) :

La surveillance dépendante automatique ADS est une technique qui permet de transmettre des paramètres comme la position et l'identification. Elle a été mise en œuvre dans l'espace aérien Algérien le 6 Février 2008. Les comptes rendus ADS/C donnent des informations qui peuvent être utiles pour une meilleure gestion du trafic aérien.

Elle a pour but :

- D'accroître le niveau de sécurité ;
- D'assurer une efficacité et une capacité élevées.

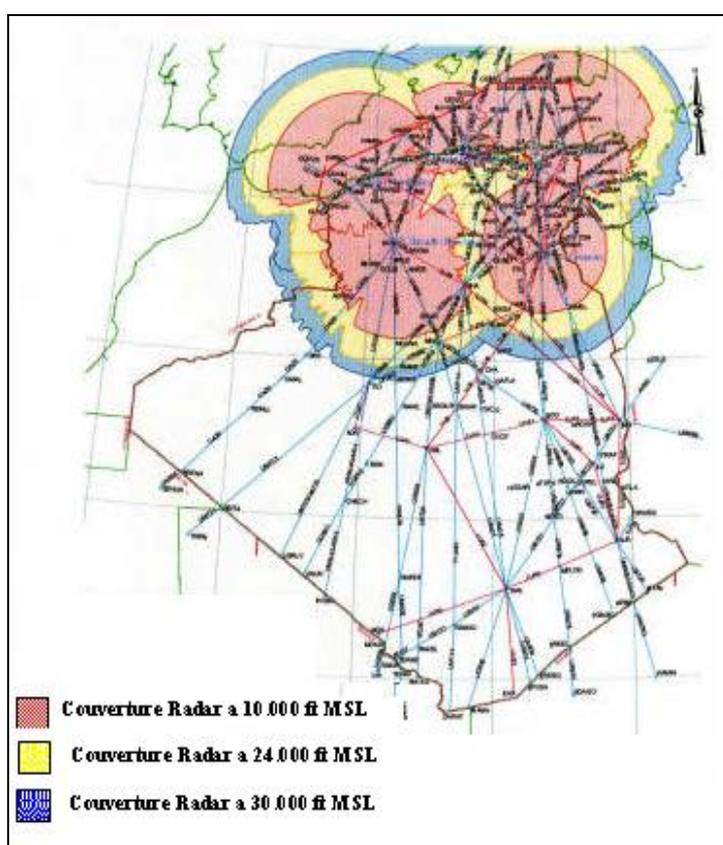


Figure I.12 : Couverture Radar actuelle.

iii. Système TRAFCA (Traitement Automatique des Fonctions de la Circulation Aérienne) :

Dans le monde d'aviation, le trafic aérien a beaucoup augmenté et pour gérer ce trafic en toute sécurité, de nouveaux systèmes de traitement automatisé du trafic aérien en étaient mis en œuvre. Ils sont pour but d'aider le contrôleur aérien à remplir sa mission de contrôle. En Algérie, le système utilisé est appelé TRAFCA.

TRAFCA est un système conçu pour l'automatisation de la gestion du trafic aérien, qui :

- + Recueille,
- + Assemble,
- + Collationne,
- + Traite et
- + Affiche les données planes de vol et position.

Ce système est constitué de deux parties :

1. Partie SAACTA (Système Algérien Automatisé de Contrôle du Trafic Aérien) :

Cette partie comprend la mise en œuvre d'un centre de qualification pour les besoins de perfectionnement du personnel technique de la navigation aérienne.

2. Partie SYRAL (Système Radar Algérien) :

Cette partie comprend principalement la couverture radar de la partie Nord et des Hauts Plateaux de la région d'information de vol d'Alger par l'acquisition et la mise en service de cinq stations radar secondaires, qui sont installées à Alger, Oran, Annaba, El Bayadh et El Oued.

Objectifs du projet TRAFCA :

- Améliorer la sécurité de la circulation aérienne ;
- Augmenter la capacité de gestion du trafic aérien ;
- Fournir des outils afin d'assister le contrôleur et d'augmenter la capacité de ce secteur ;
- Alléger le volume de travail du contrôleur en prenant en charge les tâches fastidieuses ;
- Assurer l'intégrité des données, prévoir et réguler le trafic aérien ;
- Visualisation intelligente des données de trafic aérien ;
- Réduire la charge des canaux vocaux.

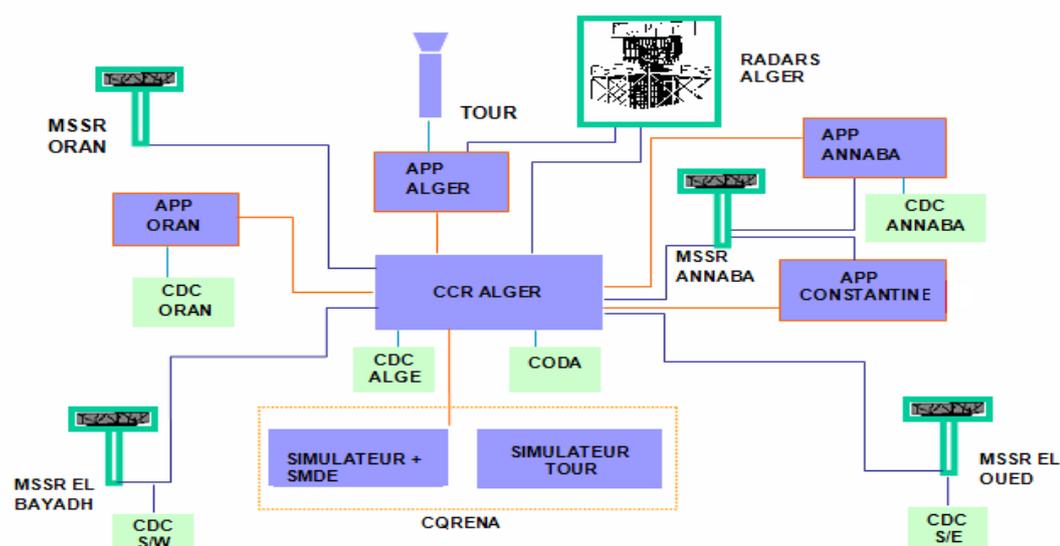


Figure I.13: Système TRAFCA.

I.3.9 Organismes de contrôle

CCR

Actuellement l'Algérie possède un seul centre de contrôle en route (CCR) situé à Alger qui a la charge d'assurer le contrôle en route le service d'information de vols dans toute la FIR.

Des investissements importants ont permis la construction d'un bâtiment équipé de nouvelles positions de contrôle et d'un nouveau système automatisé, d'affichage et gestion de communication. Ce centre fait partie du projet TRAFCA.

Contrôle d'approche

La FIR Algérie dispose de cinq centres de contrôle d'approche a Alger, Annaba, Constantine, Oran et Hassi Messaoud.

Les approches d'Alger, Annaba et Oran sont équipées de nouveaux systèmes automatisés de contrôle, de communication et de nouvelles position de visualisation qui rentre aussi dans le cadre du projet TRAFCA et qui seront prochainement exploitable.

Contrôle d'aérodrome

36 aérodromes, sont implantés en Algérie, 30 aérodromes sont des aérodromes civils, dont (10) de moindre importance. (06) aérodromes sont exclusivement militaires et (05) autres qui sont mixtes (civils-militaires).

L'ENNA a la gestion complète des (30) aéroports civiles et des (03) aéroports mixtes.

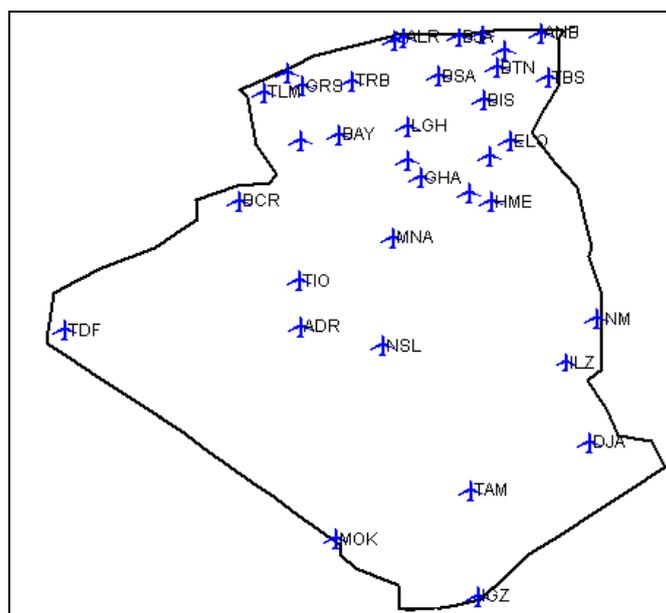


Figure I.14 :L'emplacement des Aérodroemes.

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons aborder les statistiques et prévision du trafic concernant les aéroports Algériens et le trafic géré par l'CCR d'Alger.

Pour l'analyse de trafic d'aéroport, les statistiques seront basées sur deux types de trafic :

- Trafic commercial : - Trafic national ;
- Trafic international ;
- Trafic non commercial : liée à l'industrie pétrolière au Sud.

Pour l'analyse du trafic géré par l'CCR, les statistiques seront basées sur 03 types de trafic :

- Survol avec escale : - Nationaux ;
- Internationaux ;
- Survol sans escale ;
- Vols spéciaux.

Mouvement commerciaux : mouvements d'aéronefs appartenant à des compagnies aériennes effectuant le transport des passagers et de fret (régulier, non régulier).

Mouvement non commerciaux : comprenant les mouvements d'aéronefs effectuant des vols d'aéro-clubs, vols privés, de travail et taxi aérien, de compagnies aériennes sans chargement (entraînement du personnel navigant mise en place, essai...etc.), évacuation (évacuation sanitaire) nationaux étrangers.

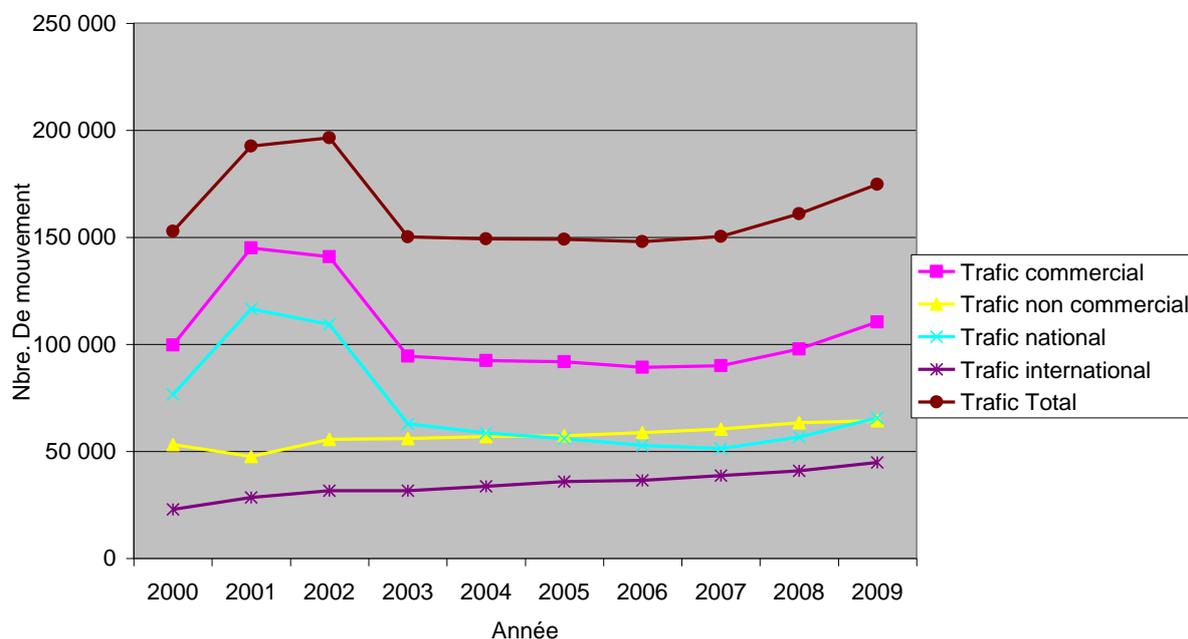
Survol avec escale : il s'agit de vol comportant au moins une escale sur le territoire national.

Survol sans escale : vol sans atterrissage (transit).

Vol spéciaux : privés...etc.

Aéroport international : aéroport d'entrée et de sortie destinée au trafic aérien international où s'accomplissent les formalités de douanes, de contrôle des personnes, de santé publique et de contrôle vétérinaire.

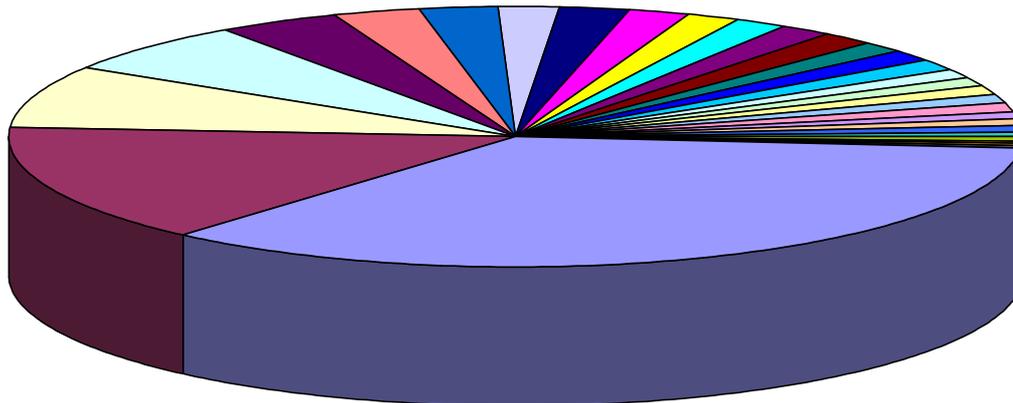
II.2 Evolution du trafic aéroports (2000-2009) :



Graphique II.2.1: Evolution du trafic aéroport de 2000 à 2009.

Le Graphique ci-dessus représente l'évolution du trafic aérien d'aéroport avec toutes ses phases, nous constatons entre 2000 et 2009 :

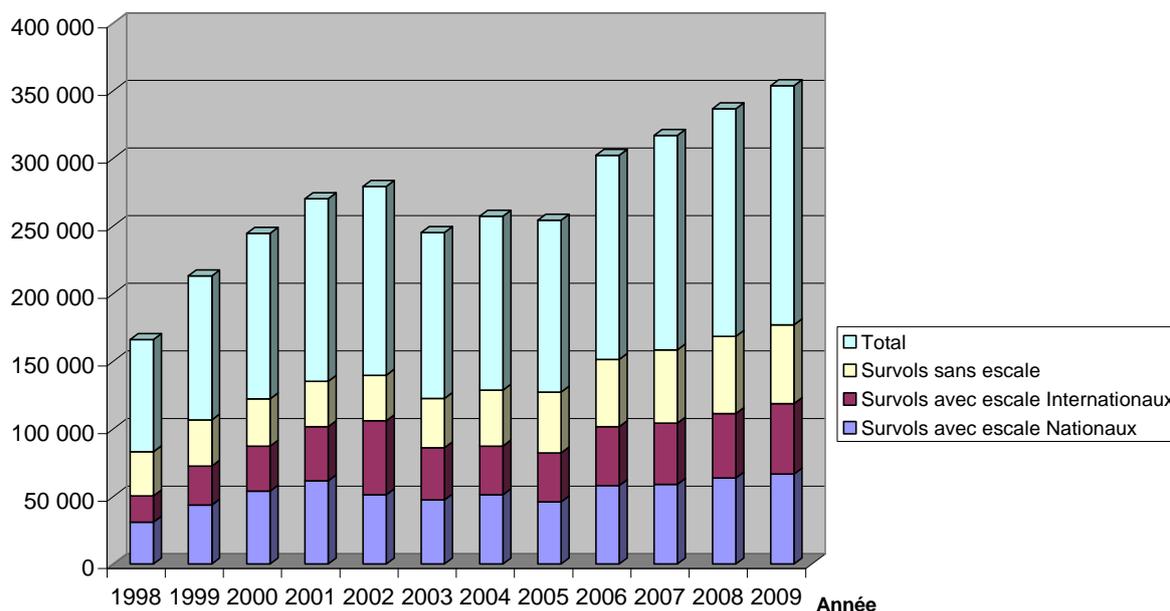
- Une croissance moyenne estimée à 3.53% pour les mouvements commerciaux, avec une valeur maximum de 144 960 en 2001 ;
- Un fléchissement de -42.51% et -4.62% pour le trafic National dans les années (2002-2003) et (2004-2005) ;
- Une croissance moyenne estimée à 3.68% pour les mouvements non commerciaux ;
- Une croissance stable pour le trafic international avec une valeur moyenne estimée à 8.65%.



Graphe II.2.2: Détail du trafic aéroport (Année 2008).

ALGER	H-MESSAOUD	ORAN	CONSTANTINE	ANNABA	BATNA
H-R'MEL	IN-AMENAS	SETIF	BEJAIA	GHARDAIA	OUARGLA
TIMIMOUN	TAMANRASSET	EL-GOLEA	BISKRA	TLEMEN	TINDOUF
BECHAR	ADRAR	EL-OUED	JIJEL	DJANET	IN SALAH
ILLIZI	TOUGGOURT	TEBESSA	TIARET	CHELEF	B-BMOUKHTAR
MECHERIA	MASCARA	LAGHOUAT	EL-BAYADH	BOU-SAADA	IN-GUEZZAM

II.3 Evolution du trafic de route (1998-2009) :



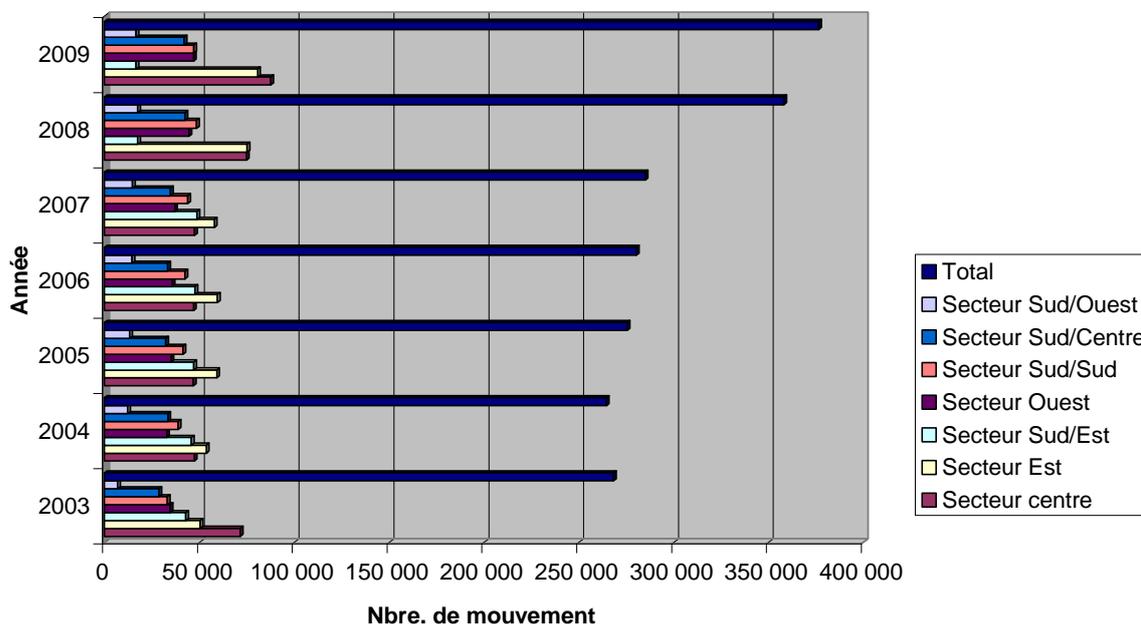
Graphe II.3: Evolution du trafic de route de 1998 à 2009.

D'après l'histogramme au-dessus, le trafic national a connu une phase de croissance très rapide de 1999 jusqu'à 2001 où il a dépassé la barre de 61 657 mouvements, pour arriver à une décroissance jusqu'à 46 032 mouvements en 2005.

Le trafic international a connu une phase de croissance allant de 1998 jusqu'à 2002 où il a dépassé la barre de 54 562 mouvements. Malgré la chute de trafic en 2004 (36 144 Mvts.), avec une croissance allant moyenne de 7.9%.

Le survol sans escale de ces dernières années a connu une croissance relativement lente, mais constante avec une moyenne annuelle de 5.5%.

II.4 Evolution de trafic par secteur (2003-2009) :



Graphe II.4: Evolution du trafic par secteur de 2003 à 2009.

L'analyse des données du trafic par secteur a fait ressortir un déséquilibre entre les secteurs, le secteur TMA Est qui est le plus chargé contrairement à l'Ouest, le secteur Sud/Sud étant le plus vaste mais le plus chargé car il y a des pointes d'environ 45 avions (de 00h00 à 04H00), le secteur Sud/Est est plus chargé par rapport au secteur Sud/Ouest, due au nombre important des plateformes pétrolière à HASSI MESSAOUD. Cette différence entraîne un déséquilibre de la charge du travail des contrôleurs.

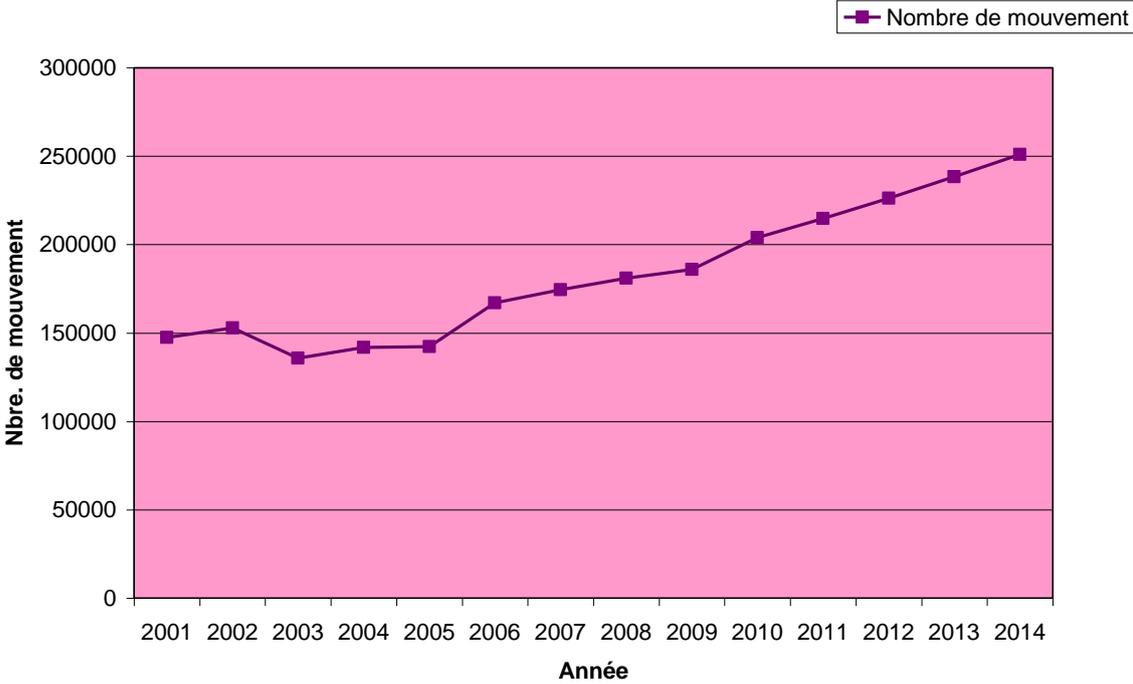
Sur les dernières années et malgré une chute importante du trafic 2004 et 2005, c'est le secteur Est qui a connu une hausse importante, due au trafic géré par les aéroports d'Est.

II.5 Prévision de trafic :**II.5.1 Prévision de trafic route**

D'après le tableau, le résultat moyen de croissance de trafic est de 5,33%, cette valeur est obtenue avec les méthodes de contrôle classique, l'utilisation des nouveaux systèmes CNS/ATM en Algérie dans l'avenir proche permet d'augmenter cette variante selon la position géographique de la FIR algérienne, le développement de l'économie du pays ainsi l'ouverture du marché africain aux investisseurs européens, le taux de croissance : 5,33%

Année	Condition	Nombre de mouvement
2001	Actuel	147506
2002	Actuel	152780
2003	Actuel	135768
2004	Actuel	141765
2005	Actuel	142180
2006	Actuel	166980
2007	Actuel	174508
2008	Actuel	180 880
2009	Actuel	185 998
2010	Prévision taux 5,33%	203925,5
2011	Prévision taux 5,33%	214794,7
2012	Prévision taux 5,33%	226243,3
2013	Prévision taux 5,33%	238302,1
2014	Prévision taux 5,33%	251003,6

Tableau II.7 : Prévision de Trafic en Route.



Graphe II.5: Prévission de trafic Route.

III.1 Généralités :

Le nombre d'avions circulant dans le ciel étant devenu considérable, et compte tenu de la progression du trafic aérien mondialisé, il est primordial d'avoir une bonne gestion du trafic aérien, aux différentes échelles géographiques que sont les territoires nationaux, les zones aériennes supra-nationales et les continents de façon plus générale.

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

La gestion du trafic aérien consiste en une composante prédictive (planification du trafic) et en une composante adaptative (contrôle du trafic). Le but de la composante prédictive est de trouver un équilibre entre la demande de l'espace et la capacité disponible. Une fois que les avions ont décollé, la composante adaptative doit les guider en toute sécurité vers leurs destinations. Des incertitudes, telles que retards ou défaillances techniques, créent des phénomènes d'écarts entre la composante prédictive et adaptative. Cela entraîne des problèmes de sécurité ainsi qu'une utilisation sous-optimale de capacité. Même si les causes majeures des incertitudes sont connues (incertitude de demande, incertitude de capacité, incertitude de gestion de flux), les mécanismes perturbateurs restent inconnus.

III.2 La résolution des conflits en route :

III.2.1 Introduction

Historiquement, les avions volaient "à vue" et utilisaient les règles de l'air pour assurer leur séparation, et ce en respectant le principe "voir et être vu". L'amélioration des performances des avions et la densification du trafic ont conduit les Etats à organiser un système de gestion du trafic fondé sur une série de filtres, chaque filtre ayant des objectifs différents et gérant des espaces et des horizons temporels distincts.

Le filtre tactique : il s'agit du contrôle à l'intérieur d'un secteur. Le temps moyen passé par un avion dans un secteur est de l'ordre d'une quinzaine de minutes. 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. Le contrôleur assure les tâches de surveillance, de résolution de conflit et de coordination avec les secteurs voisins. Il convient de préciser la définition d'un conflit aérien : deux avions sont dits en conflit lorsque la distance horizontale qui les sépare est inférieure à 5 milles nautiques et leur différence d'altitude est inférieure à 1000pieds.

Le problème de résolution de conflits aérien se situe au niveau du filtre tactique : connaissant les positions des avions à un instant donné et leurs positions futures (avec une précision donnée), quelles sont les manœuvres à donner à ces avions afin que les trajectoires ne génèrent aucun conflit et que le retard engendré soit minimal.

Un certain nombre de contraintes doivent être précisées.

– Un avion ne peut pas modifier sa vitesse (ou très faiblement), sauf dans sa phase de descente ;

– On ne peut pas considérer qu'un avion vole à vitesse constante, sauf éventuellement lorsqu'il est en croisière et qu'il n'y a pas de vent. De plus en montée et en descente, sa trajectoire n'est pas rectiligne;

- Les avions sont contraints en taux de virage, les pilotes préfèrent généralement manœuvrer latéralement que verticalement, sauf dans les phases de montée ou de descente ;
- Bien que les pilotes automatiques soient aujourd’hui largement plus performants que les pilotes humains (dans les situations normales de vol);
- L’incertitude sur les taux de montée et de descente est très forte (entre 10% et 50% de la vitesse verticale).

III.2.2 Complexité du problème de résolution de conflit

Si les avions sont aujourd’hui largement optimisés et automatisés, on peut s’étonner que les tâches de contrôle soient restées pour la plupart artisanales, faisant appel à l’expérience humaine plus qu’à la puissance de calcul d’un ordinateur.

Ceci résulte en partie de la complexité du problème de résolution de conflits.

Définition 1. *Pour une fenêtre temporelle de prévision de trajectoire donnée, on appelle conflit potentiel entre deux avions tout conflit détecté pendant la durée de la prévision, et c’en tenant compte des incertitudes sur les trajectoires.*

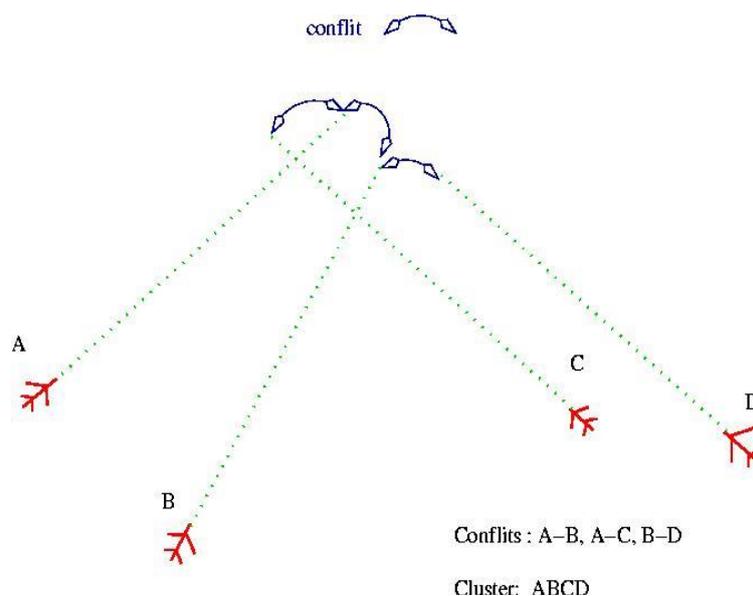


Figure III.15 : Schéma de conflits.

La relation «est en conflit avec», ou «est en conflit potentiel avec», définit une relation d'équivalence. Les classes d'équivalence associées à cette relation seront appelées «clusters» d'avions en conflit ou tout simplement «clusters».

Cluster :

Un *cluster* d'avions est une fermeture transitive d'avions en conflits potentiels. Si un avion *A* est en conflit avec *B* à l'instant $t < T$ (où T est l'horizon temporel exploré) et *B* est en conflit avec *C* à l'instant $t + \Delta t < T$ alors *A*, *B* et *C* appartiennent au même cluster.

Ainsi dans la figure 16, les avions *A* et *B* ne sont jamais en conflit mais ils appartiennent au même cluster. Une déviation de *C* pour éviter *B* peut lui permettre d'éviter *A*.

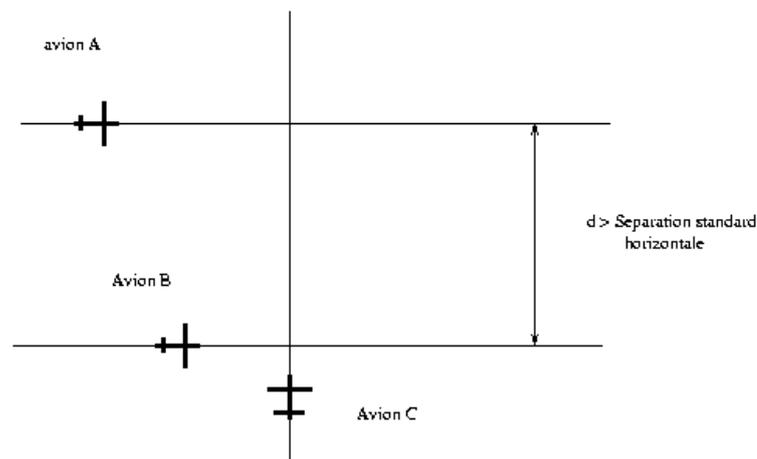


Figure III.16: Exemple de cluster.

Si l'on se restreint au plan horizontal, dans le cas où l'on s'intéresse à un cluster comprenant n avions, on peut se retrouver en présence de $n(n-1)/2$ conflits potentiels.

L'ajout de la dimension verticale ne permet pas de réduire le caractère combinatoire du problème dans la mesure où l'on ne propose pas à un avion une manœuvre simultanément dans les deux plans.

III.2.3 Approche centralisée, approche autonome

La résolution des conflits aériens est réalisée actuellement de façon centralisée. C'est le contrôleur, qui a une vision globale des problèmes à résoudre, qui donne aux avions les ordres de manœuvre.

Il est impossible de parler d'automatisation de la résolution de conflits sans parler du concept *Free-Flight*. Il est apparu outre-Atlantique il y a une dizaine d'années, sous la pression des compagnies aériennes. Elles étaient alors désireuses de s'affranchir des contraintes imposées par les routes aériennes et des coûts associés au contrôle. La vision américaine du *Free-Flight* est sensiblement différente de la vision européenne. Les américains ont moins de problèmes de capacité en route et le souci majeur des compagnies aériennes était de pouvoir réduire le temps de vol de leurs avions en utilisant des routes directes, de l'aéroport d'origine à l'aéroport de destination. Ils n'écartaient pas dans leur notion du *Free-Flight* la possibilité de conserver un contrôle de type centralisé : ce type de gestion est plutôt appelé en Europe *Free-Route*. En effet, les européens ont une approche un peu différente, car le trafic est limité par la capacité en route. Le *Free-Flight* a alors été envisagé dans le but de s'affranchir d'un contrôle centralisé, au profit d'un contrôle embarqué, tout en utilisant des routes directes, et ce afin d'alléger la charge de travail du contrôleur.

Le problème est que le *Free-Flight* a pris aujourd'hui un sens politique, et que l'on ne sait jamais bien exactement ce qu'il recouvre. Nous utiliserons par la suite deux notions orthogonales qui permettent de mieux définir les choses :

- **Contrôle centralisé ou contrôle autonome** : le contrôle centralisé est un mécanisme où un système au sol assure la sécurité de l'écoulement du trafic. Dans un système autonome, les avions doivent eux-mêmes assurer leur sécurité.
- **Routes directes ou routes standards** : dans un système utilisant des routes directes, les avions volent directement de leur origine à leur destination. Avec les routes standard, ils doivent suivre les routes aériennes existantes.

III.3 Optimisation du trafic au sol (Roulage au sol) :

III.3.1 Introduction

Après une période de fléchissement conjoncturel, le trafic aérien a repris sa croissance et le dispositif de contrôle européen s'avère de nouveau proche de la saturation : l'augmentation des retards, qui pénalise tous les usagers, en est la principale caractéristique. Face à ce phénomène, les aéroports se trouvent souvent en première ligne :

- La grande diversité des intervenants (organismes de contrôle du trafic, compagnies aériennes, gestionnaires d'aéroports, sociétés d'assistance technique, mais aussi chambres de commerce, services de police, douanes, etc.) rend les opérations aéroportuaires extrêmement complexes et très sensibles à de nombreuses formes de dysfonctionnements.
- Le développement relativement récent de nombreux *hubs* commerciaux donne à l'aéroport un rôle essentiel, dans lequel les moindres retards ont des conséquences considérables, alors que cette forme d'exploitation de l'aéroport induit justement des pics de trafic difficiles à écouler.
- La multiplication des compagnies *low cost*, dont la survie est conditionnée par la minimisation des temps et des coûts d'escale, nécessite une organisation opérationnelle particulière et une réadaptation fréquente des lignes commerciales, sur des aéroports dont la taille n'est pas toujours adéquate.
- Enfin, la dégradation des conditions météorologiques, parfois non prévue, peut très rapidement paralyser l'aéroport, qui reste étrangement le seul endroit où les avions ne peuvent pas circuler sans visibilité.

Ces différents points mettent en évidence les limites d'un système dont le fonctionnement reste encore entièrement basé sur l'expertise et l'expérience humaine.

L'aéroport est indéniablement au centre du transport aérien : il est l'unique point de rencontre d'une multitude d'intervenants et constitue la seule position d'arrêt et de ravitaillement des avions.

Les arrivées s'y transforment en nouveaux départs, ce qui lui confère un rôle particulier de dispositif d'alimentation des flux de trafic.

III.3.2 Contrôle du trafic aérien

Capacité d'un système :

La notion de capacité permet de quantifier les limites de tout système offrant à des usagers un service partagé : elle se définit par la demande (ou charge) ne devant pas être dépassée pour que le service effectif rendu par le système corresponde à l'attente des usagers.

Pour le système de contrôle aérien, la capacité s'exprime en débit maximal d'avions pouvant être traité (nombre maximal de nouveaux vols par unité de temps). Elle peut s'exprimer de façon globale (à l'échelle d'un pays par exemple), mais chaque position de contrôle possède également sa propre capacité, fonction de la structure de l'espace, des moyens dont elle dispose et de la nature du trafic s'y écoulant.

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 :

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 en 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.

L'organisation à court terme (*pré-tactique*) consiste à réguler le trafic à partir des informations plus précises disponibles entre 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 autour 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).

L'organisation en temps réel (*tactique*) permet également d'ajuster les flux de trafic, 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.

III.3.3 Le trafic aéroportuaire

A) 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 :

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

- Les autorisations (*clairances*) de décollage et d'atterrissage ;
- Les éventuelles modifications de vitesse pour les avions en approche finale ;
- 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.

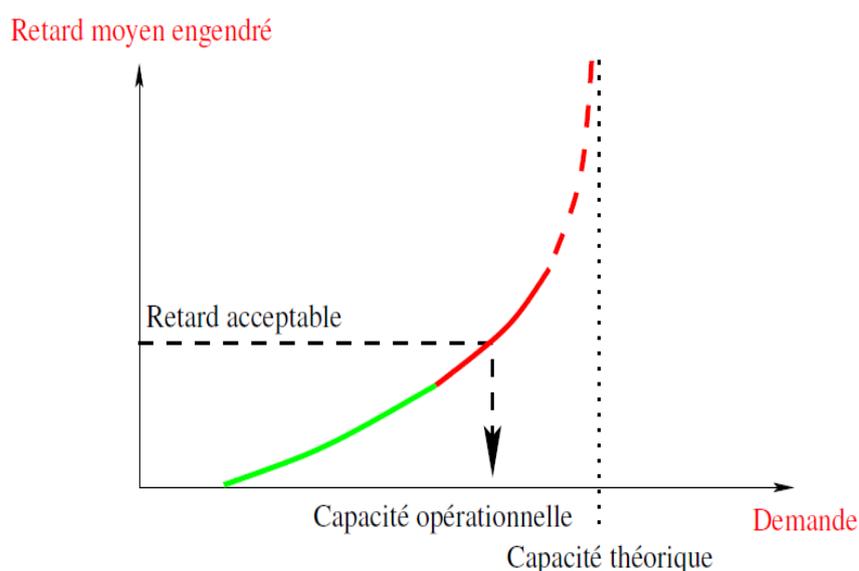


Figure III.17 : Capacité(s) de l'aéroport.

➤ **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 de la séquence ment des avions dans les zones de stationnement (ordre des entrées et des sorties de parkings).

B) 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. Différentes définitions de la capacité d'un aéroport sont cependant 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. Cette capacité correspond donc à un seuil ultime ou de saturation qu'il est en pratique impossible d'atteindre : elle ne peut se calculer que par extrapolation de mesures sur le trafic réel ou par l'intermédiaire de modèles de calcul représentatifs du fonctionnement de l'aéroport.

➤ **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 16). Ce seuil correspond en pratique à un niveau de sécurité requis (respect des règles de la circulation aérienne) et à un retard moyen ne devant pas être dépassé (3 à 4 minutes par avion par exemple).

➤ **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.

C) Facteurs influençant la capacité aéroportuaire :

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

➤ **Les infrastructures de l'aéroport** sont un premier facteur influençant la capacité. Le *dispositif de piste* (taille, nombre, disposition et équipement des pistes) est généralement considéré comme le point le plus sensible, mais l'impact des autres installations ne doit pas être négligé: la diversité et la disposition des parkings ou des voies de circulation (taille, accessibilité, équipements) influencent fortement les temps de roulage et peuvent être limitatifs pour certains types d'avion.

➤ **La nature et la répartition du trafic** sont également des facteurs de première importance :

– La classification de l'aéroport détermine la nature des vols autorisés, en fonction de leur vitesse d'approche et de leurs objectifs (commercial, court ou long courrier), ce qui fixe indirectement l'ordre de grandeur de la capacité de l'aéroport.

– La configuration de l'aéroport détermine le taux de fréquentation de chaque catégorie d'avion et le ratio entre les flux d'arrivée et de départ sur chaque piste. Les normes de séparation entre chaque mouvement dépendent de leurs types et la capacité de la piste est donc différente dans chaque configuration.

– Enfin, les procédures d'exploitation des parkings et des voies de circulation (qui doivent être conformes aux règles de circulation), peuvent s'avérer plus ou moins efficaces en termes de retards générés. Sur ce point, la compétence technique des contrôleurs et des équipages (connaissance de la plateforme et de l'avion, séquence ment des actions et aptitudes à collaborer) peuvent jouer un rôle considérable.

➤ **D'autres facteurs extérieurs** au système aéroportuaire sont fortement limitatifs :

– Les problèmes environnementaux (écologie et gestion des nuisances sonores) ;

– Les politiques douanières et policières (anti-terrorisme notamment).

– Les phénomènes météorologiques dangereux (brouillard, grêle, orages, neige).

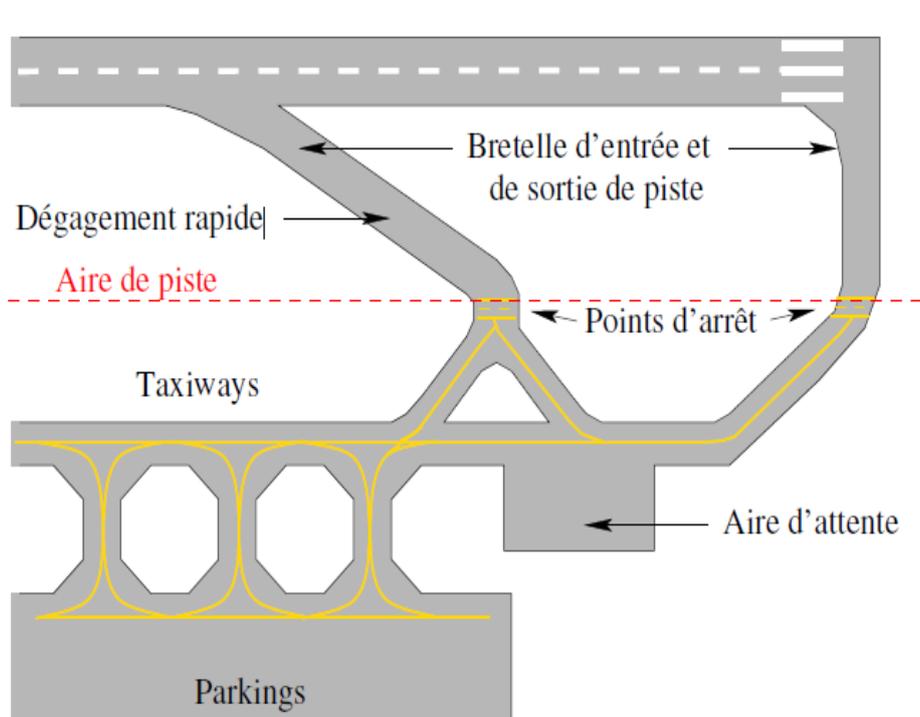


Figure III.18 : Infrastructures aéroportuaires.

III.3.4 Difficultés aéroportuaires identifiées

L'environnement :

Les problèmes environnementaux ont pris une ampleur conséquente pour tous les aéroports, quelle que soit leur taille : le développement des agglomérations et la prise en compte des nuisances sonores ou de la pollution induisent souvent des décisions limitatives pour la croissance du trafic aéroportuaire.

Différents domaines d'étude sont considérés sur ce vaste sujet :

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

En France, l'aéroport d'Orly, rattrapé par l'agglomération parisienne, fait figure d'exemple sur le sujet: de nombreuses restrictions y limitent désormais le trafic.

La sécurité :

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

- L'amélioration de la couverture visuelle et radar à disposition des contrôleurs, pour augmenter la qualité de la surveillance du trafic ;

- La réduction des risques d'*incursion piste* (pénétration accidentelle de tout mobile non autorisée sur la piste) ;

- L'aide au guidage des avions sur la plateforme, pour diminuer les risques d'erreur de cheminement et donc de collisions, surtout par conditions de visibilité dégradées.

IV.1 Introduction :

La recherche dans le domaine de la gestion du trafic aérien est encore au stade du balbutiement. Pendant longtemps on a cru qu'en augmentant le nombre de contrôleurs aériens, de secteurs de contrôle, de pistes et de taxiways sur les aéroports, on allait pouvoir absorber l'augmentation du trafic. On s'est ensuite intéressé à réduire les espacements entre avions, augmenter les cadences sur les pistes, réorganiser localement le réseau de routes ou les grandes approches. C'est seulement vers la fin des années 80 que les premiers projets de recherche ont débuté dans le domaine de la gestion du trafic aérien. Ils furent d'abord lancés par des équipes issues du monde opérationnel ayant une bonne connaissance de l'environnement des problèmes, mais peu de compétences dans les domaines mathématiques et informatiques.

Des approches plus théoriques sont ensuite apparues, menées par des chercheurs issus du monde universitaire, parfois tentés d'oublier certaines contraintes opérationnelles liées aux problèmes de gestion du trafic aérien, au profit des outils qu'ils maîtrisaient. La grande difficulté dans toute tentative d'optimisation d'un problème opérationnel consiste à le simplifier suffisamment pour permettre d'en extraire un modèle mathématique sur lequel on va pouvoir utiliser des méthodes d'optimisation évoluées, sans pour autant rendre impossible la prise en compte ultérieure des contraintes opérationnelles que l'on aura mises de côté pendant la phase de modélisation.

IV.2 Les méthodes d'optimisation :

IV.2.1 Algorithmes génétiques

AG : Généralités et améliorations

➤ Principes généraux :

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.

Un algorithme génétique recherche le ou les extrêmes d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

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.

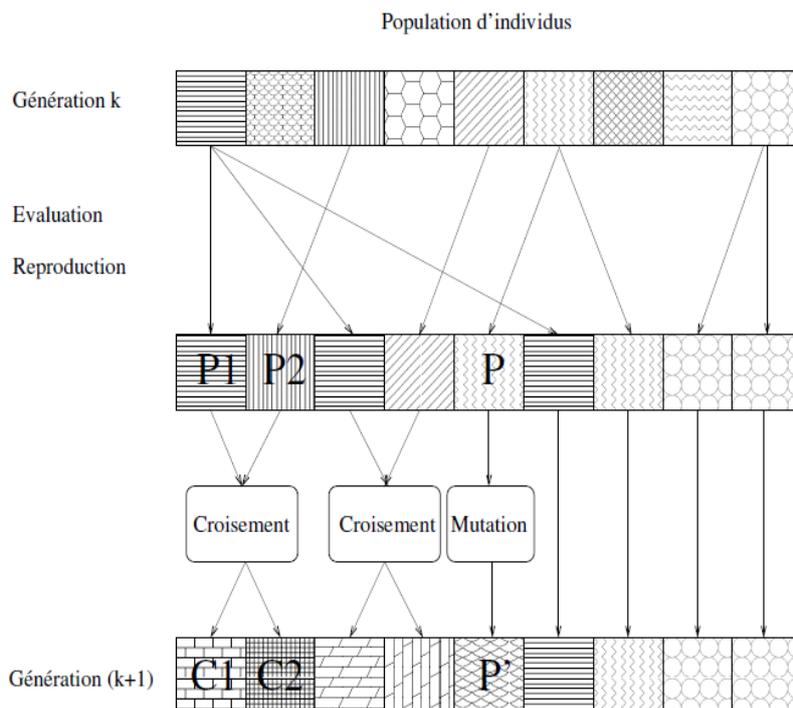


Figure IV.19 : Principe général des algorithmes génétiques.

3. Une fonction à optimiser : Celle-ci prend ses valeurs dans IR^+ 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 IV.19.

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 P_1 et P_2 sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c (généralement autour de 0.6) et engendre des couples d'enfants C_1 et C_2 . D'autres éléments P sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m (P_m est généralement très inférieur à P_c) et engendre des individus mutés P' . Les enfants (C_1, C_2) et les individus mutés P' sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population (la figure IV.19 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.

IV.2.2 Programmation par contrainte

La programmation par contraintes (PPC, ou CP pour Constraint Programming en anglais) consiste à poser un problème sous forme de relations logiques (appelées contraintes) entre plusieurs variables. Un problème formulé de la sorte comporte donc un certain nombre de ces variables, chacune ayant un domaine (i.e. un ensemble de valeurs possibles), et un certain nombre de contraintes. Le domaine d'une variable peut être fini (intervalle de nombres entiers, intervalle d'ensembles par exemple) ou continu.

Une contrainte implique une ou plusieurs variables, et restreint les valeurs que peuvent prendre simultanément ces variables. Lorsqu'une contrainte implique deux (respectivement n) variables, on parle de contrainte *binnaire* (respectivement *n-naire*). Lorsqu'elle implique un nombre non fixé de variables, on parle de contrainte *globale*.

Trouver une solution à un problème de PPC consiste à décider s'il existe ou non une affectation de toutes les variables telle que l'ensemble des contraintes du problème soient satisfaites.

➤ **Recherche de solutions :**

Dans le cas de la résolution sur domaines finis, il est en théorie possible d'énumérer toutes les possibilités et de vérifier si elles violent ou non les contraintes, cette méthode est appelée *générer et tester*. Cependant, cela s'avère impraticable pour des problèmes de taille moyenne en raison du grand nombre de combinaisons possibles. Une des majeures parties de la résolution, appelée « *filtrage* », a pour but d'éviter cette énumération exhaustive. Elle consiste à déduire à partir des contraintes les valeurs impossibles. Lorsqu'une variable ne possède plus qu'un candidat, celle-ci est instanciée (i.e. cette valeur lui est affectée). Cependant, le filtrage seul ne permet pas d'instancier toutes les variables, et il est donc nécessaire de scinder le problème en plusieurs parties (par exemple en instanciant une variable à chacune de ses valeurs possibles) et relancer le filtrage sur l'une de ces parties et ce, de manière récursive jusqu'à obtenir l'instanciation de toutes les variables. Lorsque le filtrage détecte que l'instanciation partielle viole une contrainte, on utilise généralement alors un mécanisme de *retour sur trace* afin de remettre en cause le dernier choix effectué.

Cette série de découpages du problème peut être représentée sous forme d'un *arbre*. Le but de la recherche est de parcourir cet arbre (en le construisant au fur et à mesure) jusqu'à trouver une solution au problème tandis que le filtrage consiste à « *élaguer* » cet arbre en supprimant toutes les parties n'aboutissant qu'à des contradictions.

➤ **Filtrage :**

Le filtrage consiste à supprimer d'un problème de PPC des valeurs de variables ne pouvant pas prendre part à une solution. Pour accélérer la recherche d'une solution d'un problème, il est nécessaire d'obtenir un bon compromis entre le temps nécessaire au filtrage et l'efficacité de celui-ci. C'est pourquoi il existe plusieurs niveaux d'efficacité de filtrage, capables de retirer plus ou moins de valeurs, pour un coût en temps plus ou moins élevé.

On appelle consistance locale le fait de vérifier que certaines variables ne violent pas les contraintes qui lui sont liées. On ignore alors les autres variables et contraintes. Cela permet de filtrer alors certaines valeurs impossibles pour un coût réduit. Il existe plusieurs consistances locales, offrant chacune un équilibre différent entre efficacité du filtrage et rapidité de calcul.

Consistance de nœud : Elle consiste à ne considérer qu'une seule variable. On retire alors toutes les valeurs pour lesquelles au moins une contrainte est impossible à satisfaire. Ce filtrage est très rapide, mais peu efficace.

Consistance d'arc : La consistance d'arc, consiste, pour chaque contrainte binaire (i.e. impliquant deux variables) à supprimer du domaine d'une variable toute valeur qui ne peut pas satisfaire la contrainte étudiée au vu des valeurs encore possibles pour l'autre variable. Par exemple, soient $V_1 \in [1,2,3]$ et $V_2 \in [1,3]$ avec la contrainte $V_1 = V_2$. On a alors les solutions 1-1 et 3-3. La valeur 2 de V_1 n'appartenant pas à une solution, on la supprime du domaine.

Consistance d'hyperarc : Aussi appelée Hyperarc Consistency (HAC), c'est une généralisation de la consistance d'arc pour les contraintes non binaires. Le principe est le même que pour les contraintes binaires : une contrainte est HAC si et seulement si chaque valeur de chaque variable appartient à une solution de la contrainte. On établit la consistance d'hyperarc en supprimant toutes les valeurs qui ne satisfont pas cette propriété.

k-Consistance : Elle consiste à considérer k variables, et de tester tous les k de valeurs possibles afin de tester s'ils ne violent pas les contraintes. Plus k est grand, plus le filtrage sera efficace. La 3-consistance donne de bons résultats. La 2-consistance est en fait une autre vue de la consistance d'arc. Si un problème contient n variables, alors la n-consistance consisterait à tester l'ensemble des possibilités.

Consistance de bornes : Lorsque les domaines des variables sont trop grands (plusieurs milliers d'éléments), le fait de stocker l'appartenance ou non de chaque valeur au domaine de la variable peut se révéler trop lourd à traiter. On utilise dans ce cas la consistance de bornes, qui consiste à simplement raisonner sur les valeurs minimum et maximum que les variables peuvent prendre.

Algorithme de filtrage : AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, AC6, AC7, AC8, AC2001.

➤ **Autres domaines de contraintes :**

- Termes ;
- Booléens ;
- Réels ;
- Intervalles ;
- Ensembles ;
- Chaînes.

IV.2.3 Réseau de Neurones

Cette partie introductive a pour but de revoir les outils de base nécessaires à la manipulation des réseaux de neurones. Il sera demandé d'implémenter et de comparer quelques outils, principalement par la mise en oeuvre de méthodes d'optimisation. Cela permettra de voir en pratique quels sont les intérêts et les lacunes de ces méthodes.

➤ **Apprentissage d'un Neurone :**

Un neurone analogique à une entrée x et une sortie y , tous deux scalaires, associe ces états via une fonction d'activation ϕ . Outre le type d'activation, on considère généralement quatre paramètres fondamentaux :

- le biais d'entrée α
- le poids d'entrée p
- le poids de sortie w
- le biais de sortie β

et le neurone est alors une fonction de la forme

$$y = g(x) = \beta + w \phi(\alpha + px) \quad (i)$$

Les types d'activation les plus communs, c'est à dire les choix les plus habituels pour la fonction ϕ , sont les fonctions Heaviside (neurone binaire), logistique (binaire régularisé et/ou progressif), ou encore gaussien (très répandu dans la littérature).

On s'intéresse ici à l'activateur logistique $\phi(z) = 1/(1 + e^{-z})$, et on génère une quarantaine d'états $(x_n, y_n = g(x_n))$ avec $-5 \leq x_n \leq 5$ d'un neurone avec $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $p = 2$ et $w = 3$.

Reste à savoir comment fonctionne l'apprentissage d'un réseau de neurones !

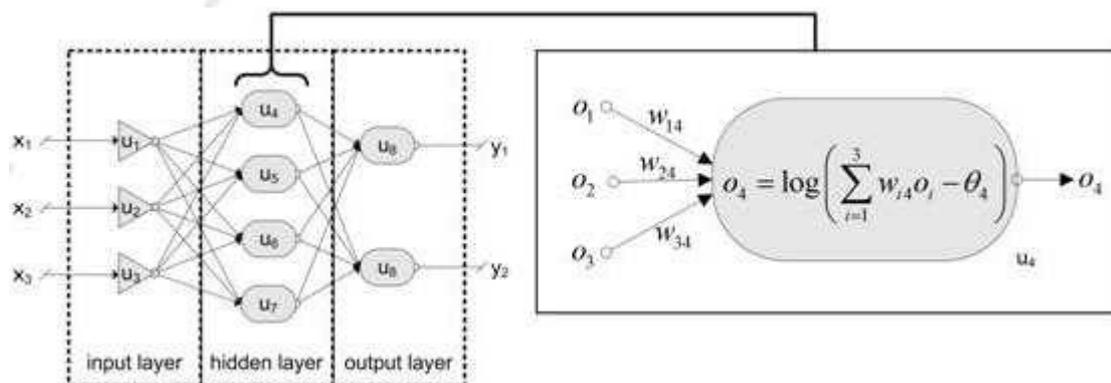


Figure IV.20 : Principe des réseaux MLP *multi-layer perceptron*.

(MLP) est un type des réseaux de neurones.

L'apprentissage du réseau de neurones se fait sur un jeu de données spécifique. Les poids du réseau sont ajustés en minimisant l'erreur entre la prévision faite par le réseau et les états de regroupements obtenus à partir des archives de configurations de secteurs. Une fois les poids ajustés, les prévisions du réseau de neurones sont ensuite validés sur un nouveau jeu de données qui n'a pas été utilisé pour l'apprentissage.

Le meilleur modèle est trouvé en testant différents ensembles d'indicateurs en entrée du réseau, et en minimisant le critère d'information de Schwartz (SIC ou BIC : *Schwartz's Bayesian Information Criterion*). Ce modèle comporte 6 indicateurs :

- V , le volume du secteur,
- N_b , le nombre d'avions présents dans le secteur à l'instant t ,
- $chgt_niv$, la moyenne des vitesses verticales (en valeur absolue) des avions présents à l'instant t ,
- $flux_15$, le flux d'avions entrant dans le secteur entre t et $t + 15$ minutes,
- $flux_60$, le flux d'avions entrant dans le secteur entre t et $t + 60$ minutes,
- $inter_hori$, le nombre de paires d'avions dont les trajectoires se croisent avec un angle supérieur à 20 degrés..

IV.2.4 La méthode de branch and bound

➤ **Introduction :**

Pour plusieurs problèmes, en particulier les problèmes d'optimisation, l'ensemble de leurs solutions est fini (en tous les cas, il est dénombrable). Il est donc possible, en principe, d'énumérer toutes ces solutions, et ensuite de prendre celle qui nous arrange. L'inconvénient majeur de cette approche est le nombre prohibitif du nombre de solutions : il n'est guère évident d'effectuer cette énumération.

La méthode de branch and bound (procédure par évaluation et séparation progressive) consiste à énumérer ces solutions d'un manière intelligente en ce sens que, en utilisant certaines propriétés du problème en question, cette technique arrive à éliminer des solutions partielles qui ne mènent pas à la solution que l'on recherche.

De ce fait, on arrive souvent à obtenir la solution recherchée en des temps raisonnables. Bien entendu, dans le pire cas, on retombe toujours sur l'élimination explicite de toutes les solutions du problème.

Pour ce faire, cette méthode se dote d'une fonction qui permet de mettre une borne sur certaines solutions pour soit les exclure soit les maintenir comme des solutions potentielles. Bien entendu, la performance d'une méthode de branch and bound depend, entre autres, de la qualité de cette fonction (de sa capacité d'exclure des solutions partielles tôt).

➤ **L'algorithme général :**

Par convenance, on représente l'exécution de la méthode de branch-and-bound à travers une arborescence. La racine de cette arborescence représente l'ensemble de toutes les solutions du problème considéré. Dans ce qui suit, nous résumons la méthode de branch-and-bound sur des problèmes de minimisation.

Pour appliquer la méthode de branch-and-bound, nous devons être en possession :

1. d'un moyen de calcul d'une borne inférieure d'une solution partielle ;
2. d'une stratégie de subdiviser l'espace de recherche pour créer des espaces de recherche de plus en plus petits ;
3. d'un moyen de calcul d'une borne supérieure pour au moins une solution.

La méthode commence par considérer le problème de départ avec son ensemble de solutions, appelé la racine. Des procédures de bornes inférieures et supérieures sont appliquées à la racine. Si ces deux bornes sont égales, alors une solution optimale est trouvée, et on arrête là. Sinon, l'ensemble des solutions est divisée en deux ou plusieurs sous-problèmes, devenant ainsi des enfants de la racine.

La méthode est ensuite appliquée récursivement à ces sous-problèmes, engendrant ainsi une arborescence. Si une solution optimale est trouvée pour un sous-problème, elle est réalisable, mais pas nécessairement optimale, pour le problème départ. Comme elle est réalisable, elle peut être utilisée pour éliminer toute sa descendance : si la borne inférieure d'un noeud dépasse la valeur d'une solution déjà connue, alors on peut affirmer que la solution optimale globale ne peut être contenue dans le sous-ensemble de solution représenté par ce noeud.

La recherche continue jusqu'à ce que tous les noeuds soient soit explorés ou éliminés.

IV.3. Projets de recherches ATM en cours :

Dans cette partie on va citer quelques projets de recherches qui sont en cours, concernant la gestion du trafic aérien.

ATOS (Simulateur d'aérodrome)

POM : Planification, Optimisation, et Modélisation du trafic aérien

Résumé

Acronyme: **ATOS**

Nom du projet: **Airport Traffic Optimization Simulator**

Date de début: **2000**

Date de fin: -

Description

ATOS est un simulateur de trafic au sol en temps accéléré, développé en collaboration avec la division ATT (Aéroport, Tour et zones Terminales) de l'ex CENA. Dans chaque situation de trafic, les mouvements des avions au roulage sont anticipés et les problèmes posés (ou conflits) sont résolus par des méthodes d'optimisation.

En entrée, le simulateur utilise une description détaillée des voies de circulation de l'aéroport (disponibles pour Roissy et Orly), ainsi que les intentions réelles des compagnies sur l'aéroport concerné (plans de vol aéroport). Trois méthodes d'optimisation peuvent être appliquées pour minimiser les temps de roulage et résoudre les conflits (c'est-à-dire assurer les séparations entre avions et les contraintes de séquençement de pistes) :

- Une méthode déterministe, qui consiste à classer les avions selon un ordre préétabli ;
- Une méthode par algorithmes génétiques, qui recherche une solution de manière plus globale ;
- Une méthode hybride, qui recherche le meilleur classement des avions.

L'outil est muni d'une interface graphique permettant de suivre l'évolution du trafic pendant la simulation ou de rejouer des journées de trafic réel ou simulé.

CASSOS (Optimisation des regroupements de secteurs de contrôle)

Résumé

Acronyme: **CASSOS**

Nom du projet: **Computer-assisted sectors opening schedules**

Date de début: **1999**

En suspens **entre 2002 et 2007, réactivé suite aux résultats de S2D2**

Date de fin: -

Description

L'objectif général du projet est de construire une prévision réaliste de la configuration des secteurs aériens, la plus équilibrée possible en fonction de la charge de trafic, ou de travail, des contrôleurs aériens qui gèrent ces secteurs.

Dans le problème que nous étudions, le trafic n'est pas considéré comme une variable d'ajustement, mais comme une donnée d'entrée. On ne régule donc pas la demande de trafic, mais on joue simplement sur la manière de regrouper les secteurs élémentaires pour construire une partition équilibrée (le mieux possible) de l'espace aérien, en tenant compte de contraintes opérationnelles diverses.

CASSOS I

Dans une première phase, nous avons cherché à construire des configurations optimales à partir des éléments aujourd'hui utilisés par les opérateurs FMP (Flow Management Positions) pour construire les schémas prévisionnels d'ouverture de secteurs. Ces éléments sont les suivants :

1. les *flux entrants* : le nombre de vols qui vont entrer dans le secteur dans une période temporelle fixée (généralement une heure, ou une demi-heure),
2. les *capacités* des secteurs, qui sont des seuils au-delà desquels les secteurs sont considérés comme surchargés,
3. le nombre maximum de positions de travail que l'on peut ouvrir à chaque instant de la journée.
4. les plans de vol déposés par les compagnies aériennes, qui servent à calculer les flux entrants,

Actuellement, les opérateurs FMP choisissent parmi un nombre restreint de scénarios pré-définis de configuration de l'espace pour construire leur schéma d'ouvertures. L'objectif de CASSOS, dans sa première phase, était d'explorer toutes les configurations possibles et de proposer des configurations optimales en fonction des critères de capacité et des contraintes de toure de service.

CASSOS II

Dans sa deuxième phase, CASSOS s'est appuyé sur les résultats du projet S2D2, dont l'objectif était de sélectionner les indicateurs de complexité du trafic aérien les plus significatifs par rapport à l'état de regroupement des secteurs (regroupé avec d'autres secteurs, ouvert, ou séparé en secteurs plus petits).

L'objectif de cette deuxième phase, toujours en cours, est de construire une prévision réaliste des ouvertures de secteurs, toujours en explorant toutes les combinaisons de secteurs élémentaires, mais en utilisant des indicateurs de complexité pertinents pour estimer la charge de travail du contrôleur. Dans un souci de plus grand réalisme, la configuration des secteurs est cette fois-ci réexaminée toutes les minutes.

Un réseau de neurones est utilisé pour prévoir l'état des secteurs de contrôle. Ce réseau prend en entrée les valeurs des indicateurs pertinents, et fournit en sortie des probabilités sur l'état de regroupement d'un secteur. Lorsqu'une décision de reconfiguration est prise, un Branch & Bound est utilisé pour reconfigurer les secteurs et pour trouver une configuration optimale en minimisant le coût associé à chaque configuration possible.

L'apprentissage du réseau de neurones se fait sur des archives d'ouvertures de secteurs, et minimisant l'erreur entre, d'une part, la prévision faite par le réseau à partir d'un vecteur d'indicateurs, et d'autre part l'état réel de regroupement du secteur.

CATS (Simulation temps accéléré et mesure de performances)

POM : Planification, Optimisation, et Modélisation du trafic aérien

Résumé

Acronyme: **CATS**

Nom du projet: **CAML All purpose Traffic Simulator**

Date de début: **1992**

Date de fin: -

Description

Le projet CATS a démarré en 1992 comme une alternative légère au simulateur MASS développé par l'ex-CENA. MASS est un simulateur basé sur un modèle masse-énergie. Ce modèle, de bonne qualité, est cependant relativement lent à mettre en oeuvre (MASS est toujours utilisé à la DSNA/DTI et au Centre Expérimental Eurocontrol pour les expérimentations temps réel).

CATS utilise un modèle de performances tabulé moins précis que le modèle masse-énergie, mais plus rapide. Les données de ce modèle sont les tables de performance BADA disponibles sur le site du Centre Expérimental Eurocontrol.

CATS est devenu le standard de fait de la simulation temps accéléré de la DSNA/DTI, sous le nom d'**OPAS**. CATS et OPAS ont depuis légèrement divergé. CATS est toujours maintenu et développé par le pôle POM, et inclus de nombreux modules de détection et résolution de conflits.

CATS a été utilisé pour réaliser tout un ensemble d'études: performances, complexités, etc...

ERCOS (Détection et résolution automatique de conflits par des méthodes centralisées)

Résumé

Acronyme: **ERCOS**

Nom du projet: **En Route Control Optimized Simulator**

Date de début: **1992**

Date de fin: -

Description

Le projet ERCOS a débuté en 1992, en même temps que le projet CATS. L'idée à la base d'ERCOS repose sur des travaux effectués au CENA et à l'ENAC dans le cadre du projet ERATO. ERATO a effectué au début des années 90 une analyse du travail du contrôleur et a permis de montrer qu'une part importante de ce travail consiste à gérer l'incertitude sur les trajectoires des avions. Un des buts du projet était donc de fournir au contrôleur des outils l'aidant à gérer l'incertain, tout en restant compatible avec son mode opératoire, pour ne pas perturber son travail.

Nous avons tout d'abord développé une modélisation mathématique de l'incertitude, qui est supposée rester dans un intervalle déterminé suivant l'axe de déplacement de l'avion, et être constante dans l'axe orthogonal à son déplacement. Cette hypothèse est compatible avec la navigation des aéronefs, dont la navigation suit de façon précise le cap, mais dont la précision sur le tenu de vitesse sur des périodes de 10 à 20 minutes est plus difficile à prévoir, en raison du grand nombre de facteurs extérieurs qui peuvent intervenir.

Au début de la fenêtre de calcul, l'incertitude croissant linéairement avec le temps, le programme prévoit de donner une déviation à l'un des deux avions. Cependant, il ne communique encore aucune manoeuvre car il a encore le temps de prendre une décision et de la transmettre au pilote. Au fur et à mesure que les avions se rapprochent, l'incertitude absolue décroît et finalement, il est inutile de donner quelque manoeuvre que ce soit, les deux avions finissant par passer à plus d'une norme de séparation l'un de l'autre.

L'algorithme a été optimisé de façon à réduire le nombre de manoeuvres et à limiter le temps de déviation total des avions. Dans le cas de résolution d'un conflit de 4 avions. L'algorithme permet de résoudre tous les conflits en ne déviant que deux avions sur les quatre.

L'algorithme n'autorise que des manoeuvres simples:

1. Manoeuvres en cap à gauche ou à droite de 10, 20 ou 30 degrés et mise en offset
2. Manoeuvres en vitesse: réduction de vitesse, limitée en croisière (autour de +/- 5%) et plus importante dans les phases de descente
3. Manoeuvre en niveaux: stabilisation de montée, anticipation de descente, descente d'un niveau de vol en croisière.

ERCOS a été avec CATS le sujet central de travail du LOG pendant de nombreuses années. Il reste le sujet principal de travail du pôle POM. Il a eu une réelle influence dans le monde de la recherche ATM, et est certainement à la base du projet ERASMUS. L'étude SAGES a évalué de façon plus précise comment il était possible de réaliser de la résolution en vitesse avec de petites modifications en limitant les algorithmes d'ERCOS (ils permettent par défaut de faire de la résolution en cap, niveau et vitesse) afin de tester l'idée du contrôle subliminal proposé dans ERASMUS.

PREDICT (Prévision de trajectoires)

Résumé

Acronyme: **PREDICT**

Nom du projet: **Outils de prévision de Trajectoires**

Date de début: **2008**

Date de fin: -

Description

Ce projet cherche à développer et valider une méthodologie de comparaison de prédicteurs de trajectoires en vue d'évaluer la précision ou de valider lesdits prédicteurs.

SAGES (Détection et résolution des conflits en utilisant de la régulation en vitesse)

Résumé

Acronyme: **SAGES**

Nom du projet: **Smooth Air-Ground Enhanced Solver**

Date de début: **2004**

Date de fin: **2008**

Description

SAGES est une étude portant sur la résolution de conflits par des régulations en vitesse. Son principe est de réaliser un filtre pré-tactique de résolution en appliquant exclusivement des régulations en vitesse de faible amplitude. L'amplitude maximale autorisée est fonction de l'incertitude sur la vitesse des avions.

SAGES, à proprement parler, consiste en une évaluation prospective de l'efficacité de ce concept en fonction de divers paramètres :

- 1. durée d'anticipation pour la résolution,**
- 2. incertitude sur les vitesses et marges de vitesse pour la régulation,**
- 3. densité du trafic.**

Cette évaluation est réalisée à l'aide de la plate-forme CATS et surtout des algorithmes de résolution de conflits centralisé du projet ERCOS.

Il faut noter que SAGES a été intégré à l'intérieur du projet européen ERASMUS. SAGES, comme ERASMUS, sont aujourd'hui terminés.

S2D2 (Validation d'indicateurs de complexité du trafic)

Résumé

Acronyme: **S2D2**

Nom du projet: **Sector status and dynamic density**

Date de début: **2005**

Date de fin: -

Description

Le projet S2D2 s'intéresse à la complexité du trafic aérien. Il a débuté en collaboration entre le LEEA et le LOG, et s'est poursuivi au pôle POM.

L'idée du projet S2D2 est d'évaluer la pertinence des indicateurs en s'appuyant sur l'état de regroupement des secteurs d'espace aérien. Nous faisons ici l'hypothèse que les décisions de regrouper plusieurs secteurs sur une même position de contrôle, ou au contraire de "dégrouper" un secteur, sont statistiquement significatives de la charge de travail du contrôleur, tout en gardant à l'esprit les biais possibles (ouvertures de secteurs à des fins de formation, relève des équipes, incidents techniques, etc...). La complexité du trafic est donc ici envisagée à une échelle intermédiaire entre les indicateurs généraux de la PRU et la charge de travail instantané. Nous cherchons une relation entre les indicateurs de complexité et le domaine d'utilisation des secteurs de contrôle, avec une granularité temporelle de l'ordre de la minute.

Notre objectif est donc de dégager d'éventuelles corrélations entre l'état de regroupement des secteurs aériens sur les positions de contrôle et un certain nombre d'indicateurs, basiques (nombre d'avions, flux entrants) ou plus évolués, qui se veulent représentatifs de la complexité du trafic dans un secteur choisi. Plusieurs types de méthodes nous semblent possibles pour s'attaquer à ce problème :

- 1. réseaux de neurones,**
- 2. régression logistique,**
- 3. modèles dynamiques de choix discret.**

L'originalité et l'avantage de la méthode de sélection d'indicateurs que nous proposons tient au fait que nous nous appuyons sur des données déjà archivées (traces radar, configurations de secteurs), relativement faciles à collecter, et issues d'une réalité opérationnelle objective. Ces données présentent toutefois l'inconvénient d'être bruitées, car tous les changements de configuration de secteurs ne sont pas dus à des impératifs de charge de travail. On peut cependant espérer qu'en choisissant des journées de trafic dans une période chargée de l'année, nous disposerons de données assez peu bruitées.

Etat d'avancement

Le projet a nécessité une longue phase préparatoire, assez ingrate, comprenant les étapes suivantes:

1. étude bibliographique des indicateurs existants,
2. codage d'un certain nombre de ces indicateurs,
3. dénombrement des données existantes (archives des ouvertures de secteurs, données CA, données multi-radars multi-centres IMAGE, données multi-radar mono-centre, données mono-radar), plus ou moins faciles à collecter,
4. écriture du code permettant d'exploiter les données dans S2D2 (signalons au passage la grande diversité de référentiels géographiques...),
5. analyse descriptive des indicateurs calculés à partir des données d'une journée de trafic.

L'analyse descriptive comprenait une analyse en composante principale, qui a permis de dégager 6 composantes principales, de valeur propre supérieure à 1, à partir des 27 indicateurs que nous avons codés.

Suite à cette phase préparatoire, nous avons utilisé des réseaux de neurones pour établir une relation entre ces composantes principales, auxquelles nous avons ajouté le volume du secteur, et les états de regroupement des secteurs.

L'étape suivante de notre travail a consisté à évaluer les indicateurs de chaque composante pertinente, en utilisant à nouveau les réseaux de neurones. Les indicateurs les plus pertinents que nous ayons trouvés sont les suivants:

- 1. volume du secteur,**
- 2. nombre d'avions,**
- 3. vitesse verticale moyenne,**
- 4. flux entrants avec horizons temporels de 15 minutes et 60 minutes,**
- 5. nombre de paires d'avions se croisant avec un angle supérieur à 20 degrés.**

Au final, nous obtenons une relation simple et directe entre les valeurs des indicateurs pertinents et l'état de regroupement du secteur.

Les perspectives de travaux futurs comprennent notamment:

- 1. l'essai d'autres méthodes que les réseaux de neurones,**
- 2. le codage d'autres indicateurs, prenant notamment mieux en compte la géométrie des secteurs,**
- 3. l'application au problème des configurations optimales de secteurs.**

IV.4 Analyse préliminaire :

IV.4.1 Introduction

Dans le cadre général présenté au chapitre précédent, l'amélioration des conditions de circulation du trafic au sol se révèle un point crucial pour le développement futur des plus grands aéroports : les innovations attendues dans ce domaine peuvent en effet prétendre à la fois participer à réduire les problèmes environnementaux en limitant la congestion au sol, augmenter les conditions de sécurité en assistant le guidage des avions et réduire les retards par optimisation des trajectoires au sol.

IV.4.2 Les principaux concepts pour l'optimisation du trafic au sol

A) Optimisation de la séquence de piste :

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

1. Optimisation des procédures d'approche :

La définition de procédures d'approche adaptées facilite le travail de séquençage initial des arrivées pour le contrôle d'approche, en rendant possible des changements de vitesses et de trajectoires des avions. La mise à disposition de différents hippodromes d'attente permet notamment de réguler le flux d'arrivée lorsqu'il dépasse la capacité de la piste. Dans certains cas, les procédures d'approche peuvent également être utilisées pour modifier légèrement l'ordonnancement des arrivées, en fonction des contraintes de turbulence de sillage.

Plus généralement, l'amélioration des procédures d'approche peut être vue comme un problème d'optimisation complexe, contraint par les performances des avions (qui déterminent le type de trajectoire qu'ils sont susceptibles de suivre) et dont le critère est la capacité de ces secteurs. Ce domaine d'étude nécessite une modélisation difficile des procédures aériennes utilisées pendant la phase d'approche.

2. Développement d'outils d'aide au contrôle :

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

3. Diminution des normes de séparation :

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

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

B) Amélioration de la prévisibilité du trafic aéroportuaire :

L'aéroport apparaît comme l'endroit où le trafic aérien est le moins prévisible : l'enchaînement des actions pendant l'escale d'un avion relève d'une course contre la montre et dépend la plupart du temps de la gestion d'une multitude d'imprévus.

Les temps de roulage sont de plus extrêmement sensibles au débit d'avions demandant la piste : dans ce contexte, l'amélioration de la prévisibilité du trafic nécessite une large diffusion des informations en temps réel, non seulement entre les positions de contrôle d'aéroport et d'approche, mais également entre chaque intervenant sur un même aéroport.

1. Coordination des aéroports :

L'échange d'informations de trafic entre différents aéroports est depuis longtemps un sujet d'étude, bien que le nombre d'aéroports « coordonnés » soit encore relativement faible. La connaissance des retards prévus sur un aéroport permet pourtant d'optimiser la gestion des vols de tous les aéroports qui lui sont connectés. Dans ce cadre, des systèmes (AMAN : *Arrival Manager* et DMAN : *Departure Manager*), mis à jour en temps réel, permettent d'informer les aéroports coordonnés des évolutions du trafic, mais utiliser l'ensemble de ces informations à bon escient reste encore un problème à part entière, surtout en ce qui concerne le DMAN.

2. Partage d'informations entre les intervenants (CDM) :

Le cadre général du CDM (*Collaborative Decision Making*) lancé par le département AOP (*Airport Operations Unit*) d'EUROCONTROL vise à perfectionner la gestion en temps réel des opérations par le partage des informations entre les différents acteurs du trafic aérien (principalement le contrôle et les compagnies) : ces intervenants doivent prendre des décisions qui peuvent influencer l'ensemble du trafic alors qu'ils n'en ont qu'une vision partielle (les compagnies ne connaissent que leurs propres vols). Ce mode de fonctionnement (qui ne peut pas être optimal) doit être amélioré par le partage d'informations.

Ce concept apparaît à première vue délicat, dans un environnement fortement concurrentiel: l'idée est pourtant que chaque compagnie a plus à gagner avec les informations des autres qu'à perdre avec la divulgation des siennes. La régulation du trafic peut par exemple en être fortement améliorée : lorsqu'une compagnie sait qu'elle ne pourra pas utiliser certains de ses créneaux de décollage (à cause de retards en cours ou de problèmes techniques), elle pourrait le signaler à d'autres compagnies et les échanger. Sans cette coopération dynamique, les créneaux initiaux sont de toutes façons manqués et la régulation du trafic, au lieu d'optimiser sa répartition, pénalise finalement tous ses intervenants.

C) Systèmes évolués de surveillance et de guidage au sol (ASMGCS) :

Les premiers concepts SMGCS (*Surface Movement Guidance and Control System*) introduits par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) ont abouti au système actuel de suivi radar du trafic au sol. Depuis les années 90, ils font donc place aux nouveaux concepts ASMGCS (*Advanced SMGCS*), toujours sous l'égide de l'OACI en collaboration avec la Commission Européenne, EUROCONTROL, EUROCAE (*European Organisation for Civil Aviation Equipment*), la FAA (*Federal Aviation Administration*), la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) et les aéroports.

Ces concepts fixent un ensemble d'objectifs pour les futurs systèmes de surveillance et de guidage des avions au sol:

La sécurité doit être augmentée, par une redéfinition des rôles et des responsabilités de chacun : particulièrement par mauvaise visibilité, l'emploi de la visualisation radar comme instrument de contrôle (et non comme simple source d'information auxiliaire) doit être officialisée. Pour cela, le développement de visualisations radar plus perfectionnées, offrant une vision complète et sûre de l'ensemble des mobiles sur la plateforme, (véhicules et aéronefs) doit pouvoir assurer le guidage des avions. Dans ce cadre, de nouvelles technologies sont proposées :

- Le D-GPS (*Differential Global Positioning System*), capable de fournir à tout mobile un positionnement dans l'espace, avec une précision inférieure au mètre, à partir de relèvements satellites et des corrections émises par un satellite géostationnaire ;

- L'ADS-B (*Automatic Dependant Surveillance*) permettant la diffusion de la position d'un mobile à tous les autres. Des systèmes de détection de pertes de séparation et d'incursion piste doivent également être en mesure de donner l'alerte au contrôle (fonction de *filet de sauvegarde*).

La gestion du trafic au sol doit être facilitée et améliorée par des outils de supervision technique et opérationnelle :

- L'amélioration du système de guidage vise en particulier un fonctionnement de l'aéroport « tout-temps », au sein duquel les avions peuvent continuer à circuler dans des conditions de visibilité les plus réduites (brouillard dense).
- Des outils reliés au système de visualisation radar, capables d'effectuer le suivi des avions, peuvent participer à leur séquence ment dans les zones de parking et sur les bretelles d'accès à la piste.
- Le *Data Link* (transmission automatique de certaines données entre le contrôle et l'avion) peut également jouer un rôle en simplifiant la tâche des contrôleurs et en rendant plus disponible la fréquence de communication radio.

Ce cadre très général montre tout l'intérêt porté sur la phase de roulage et l'importance des équipements mis en jeu : il semble évident, dans ce contexte, que cette phase du vol (longtemps délaissée) se destine à une véritable révolution technologique.

IV.5 Projet de Développement et Gestion de l'Espace Aérien PDGEA :

IV.5.1 Introduction :

L'Etablissement National de la Navigation Aérienne (ENNA) compte se doter de nouveaux radars pour renforcer la couverture de surveillance aérienne, notamment dans le sud du pays, suite aux insuffisances constatées, un nouveau système automatisé d'aide au contrôle et de nouveaux moyens de télécommunications.

Ce projet qui est intitulé Plan de Développement de Gestion de l'Espace Aérien (PDGEA) permettra de réaliser un nouveau centre de contrôle au Sud pour prendre en charge le trafic du grand Sud.

Les deux centres auront à œuvrer en étroite collaboration pour pouvoir palier aux éventuels problèmes que l'un d'eux peut rencontrer et permettre par conséquent à l'autre d'assurer la continuité des missions dont ils ont la charge.

Objectifs opérationnels de projet :

- ✓ Création d'un deuxième centre de contrôle aérien à Tamanrasset ;
- ✓ Mise en place d'un réseau étendu de communication pour couvrir la partie Sud de l'espace aérien ;
- ✓ Extension de la couverture radar à l'espace aérien Sud ;
- ✓ Renforcement de la couverture radar de l'espace aérien Nord.

IV.5.2 Communication, Navigation et Surveillance

Communication :

➤ **Couverture VHF/HF :**

La couverture VHF en FIR Alger va être améliorée avec l'implantation de nouvelles stations VHF aux différentes régions du pays et notamment aux zones d'extrême Sud.

Quelques stations VHF déjà existantes vont être remplacés dans le profil du nouveau projet (PDGEA).

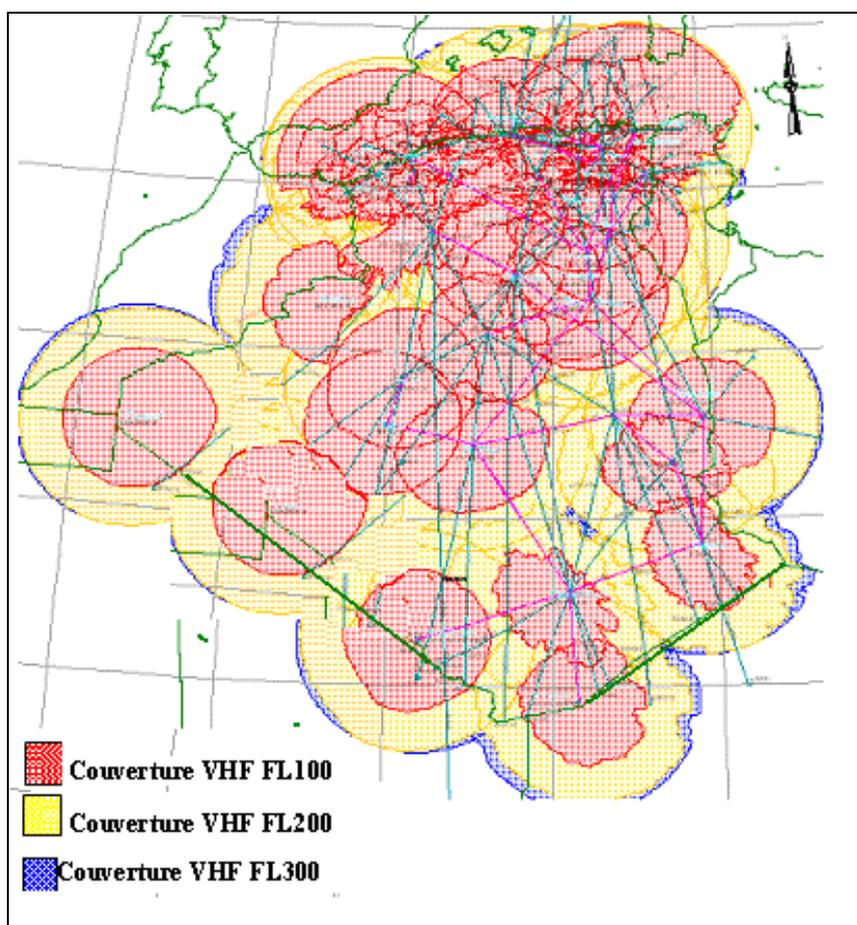


Figure IV.21 : Couverture VHF des FIRs Nord et Sud.

	Site	Nombre
FIR Nord	Alger	4
	Annaba	1
	Constantine	2
	Oran Senia	1
	Oran Bel Horizon	2
	Tiaret	1
	El Bayadh	1
	Biskra	1
	El Golea	1
	Ghardaïa	2
	Hassi Messaoud	2
FIR Sud	In Salah	1
	In Aminas	2
	Djanet	1
	Adrar	2
	Illizi	1
	In Guezam	1
	Tindouf	1
	Chenachene	1
	B.B.Mokhtar	1
	Tamanrasset	2
	Bechar	2

Tableau IV.8 : L'emplacement des nouvelles stations VHF.

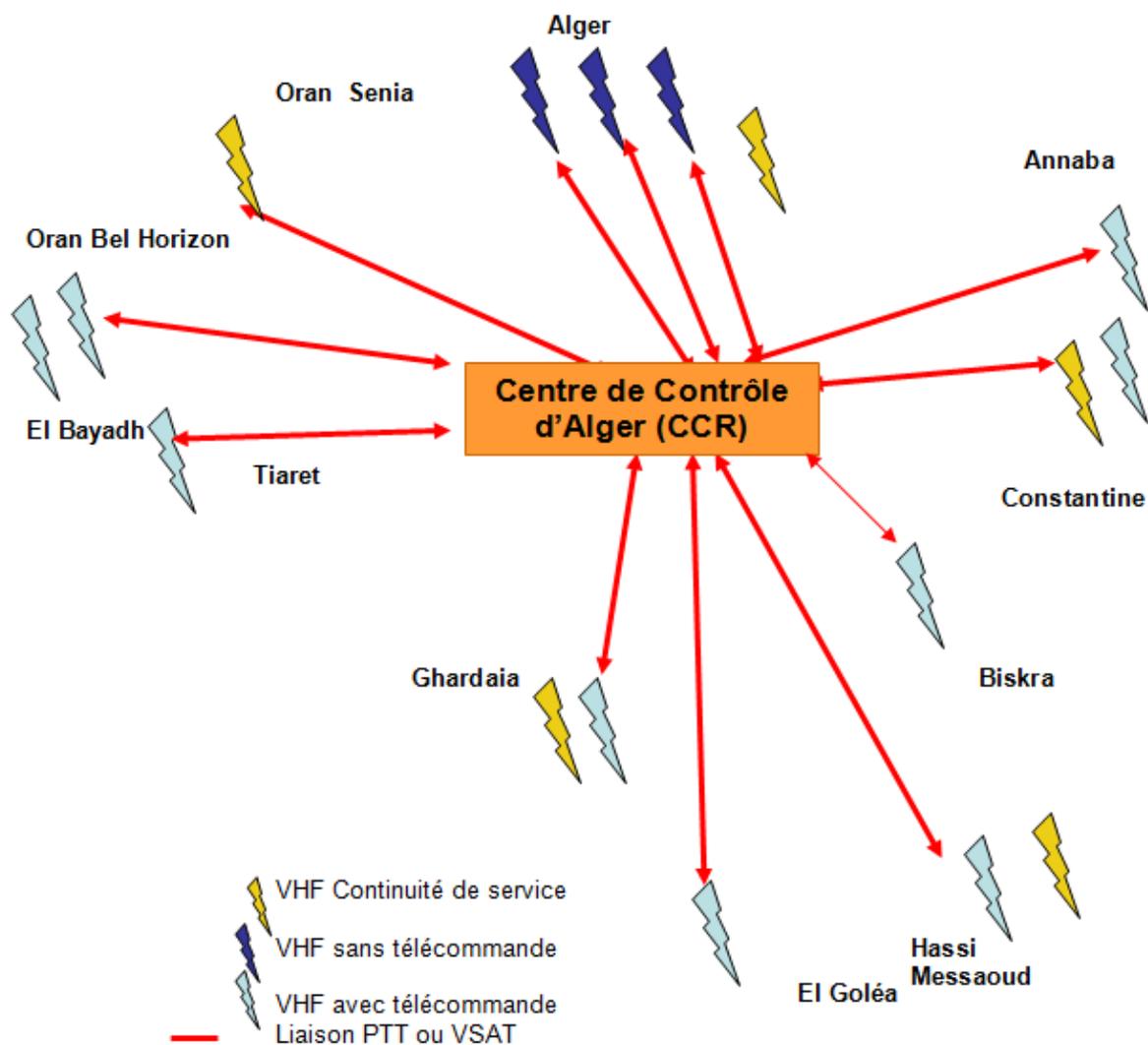


Figure IV.22 : Stations VHF de la FIR Nord.

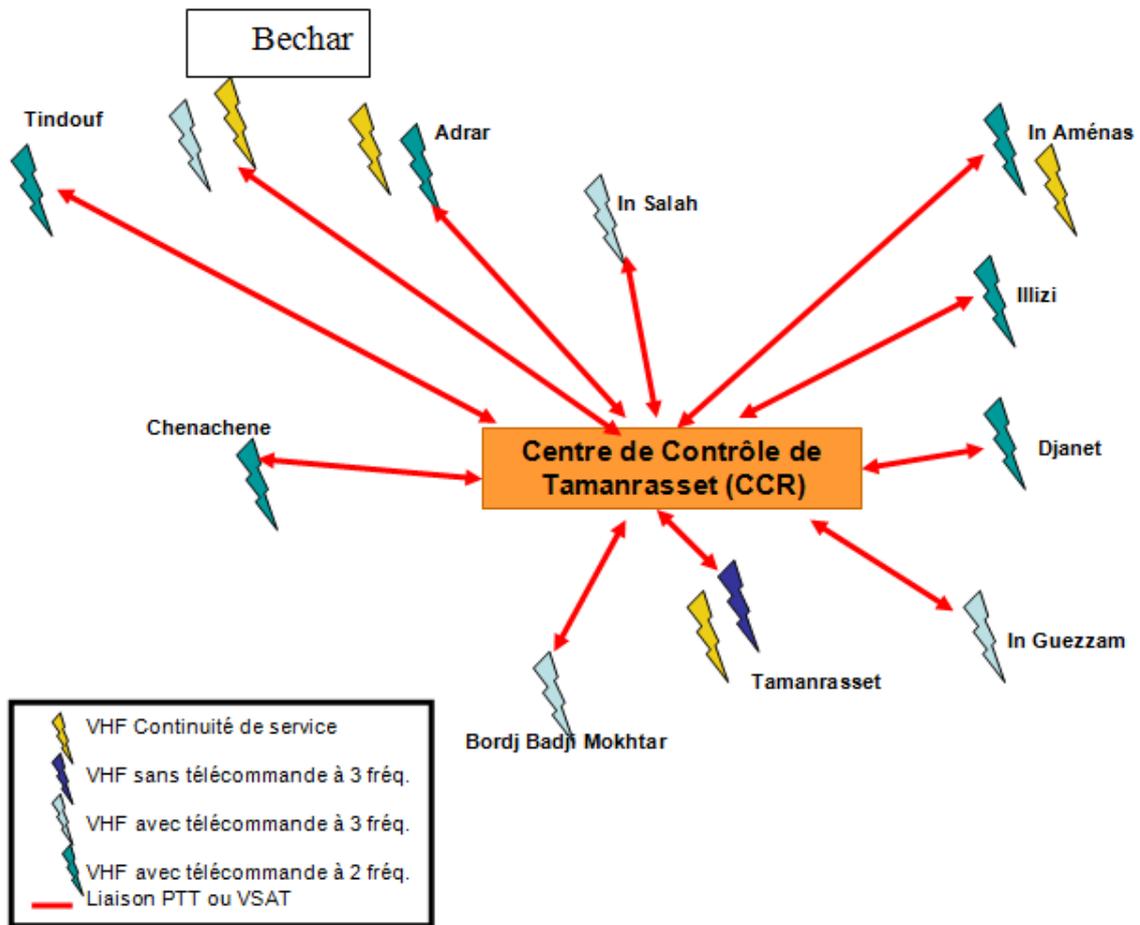


Figure IV.23 : Stations VHF de la FIR Sud.

Un support VSAT sera installer dans divers région du pays pour assurer la continuité de service.

	Site
FIR Nord	Alger
	Annaba
	Constantine
	Oran Senia
	Oran Bel Horizon
	Tiaret
	El Bayadh
	Biskra
	El Golea
	Ghardaïa
	Hassi Messaoud
FIR Sud	Djanet
	Adrar
	Illizi
	In Guezam
	Tindouf
	Chenachene
	B.B.Mokhtar
	Tamanrasset
	B.B.Mokhtar
	In Salah
	Bechar

Tableau IV.9 : L'emplacement des nouvelles stations VSAT.

Signalons qu'il va avoir une station VSAT AFISNET à Tamanrasset pour la coordination avec les FIR adjacentes de Dakar, Niamey, N'Djamena et Tripoli.

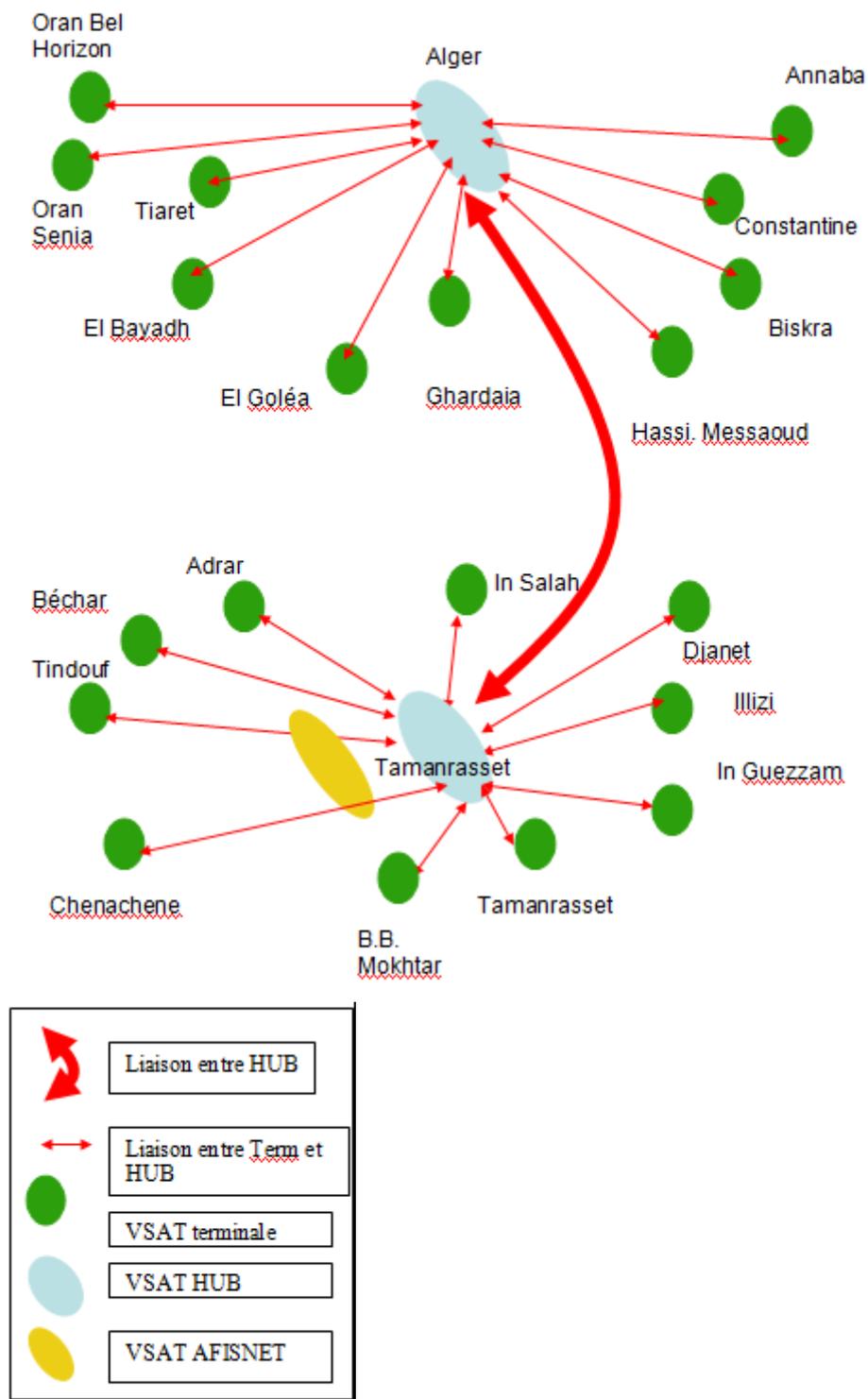


Figure IV.24 : Stations VSAT Nord et Sud.

Navigation :

Aucun moyen de radionavigation n'est ajouté dans le profil du nouveau projet. Des opérations de renouvellement sont prévues.

Surveillance :➤ **Radar :**

La couverture radar en Algérie va se doter de 13 nouveaux radars pour renforcer la couverture de surveillance aérienne, notamment dans le Sud de pays, suite aux insuffisances constatées.

Ces radars viendront renforcer les cinq autres radars déjà existants, implantés dans cinq wilayas du pays à savoir Alger, Annaba, Oran, El Oued et El Bayadh comme déjà cité.

	Type de radar	Site
FIR Nord	SSR-S	Alger
	SSR-S	Akfadou
	PSR	Oran
	SSR-S	Ghardaïa
	SSR-S/PSR	Constantine
	SSR-S/PSR	Hassi Massaoud
FIR Sud	SSR-S	Illizi
	SSR-S	Djanet
	SSR-S	In Salah
	PSR/SSR-S	Tamanrasset

Tableau IV.10 : Nouvelles stations radars.

A travers ce projet, la couverture du territoire national peut atteindre 90% du trafic, alors qu'actuellement elle ne dépasse pas les 60%.

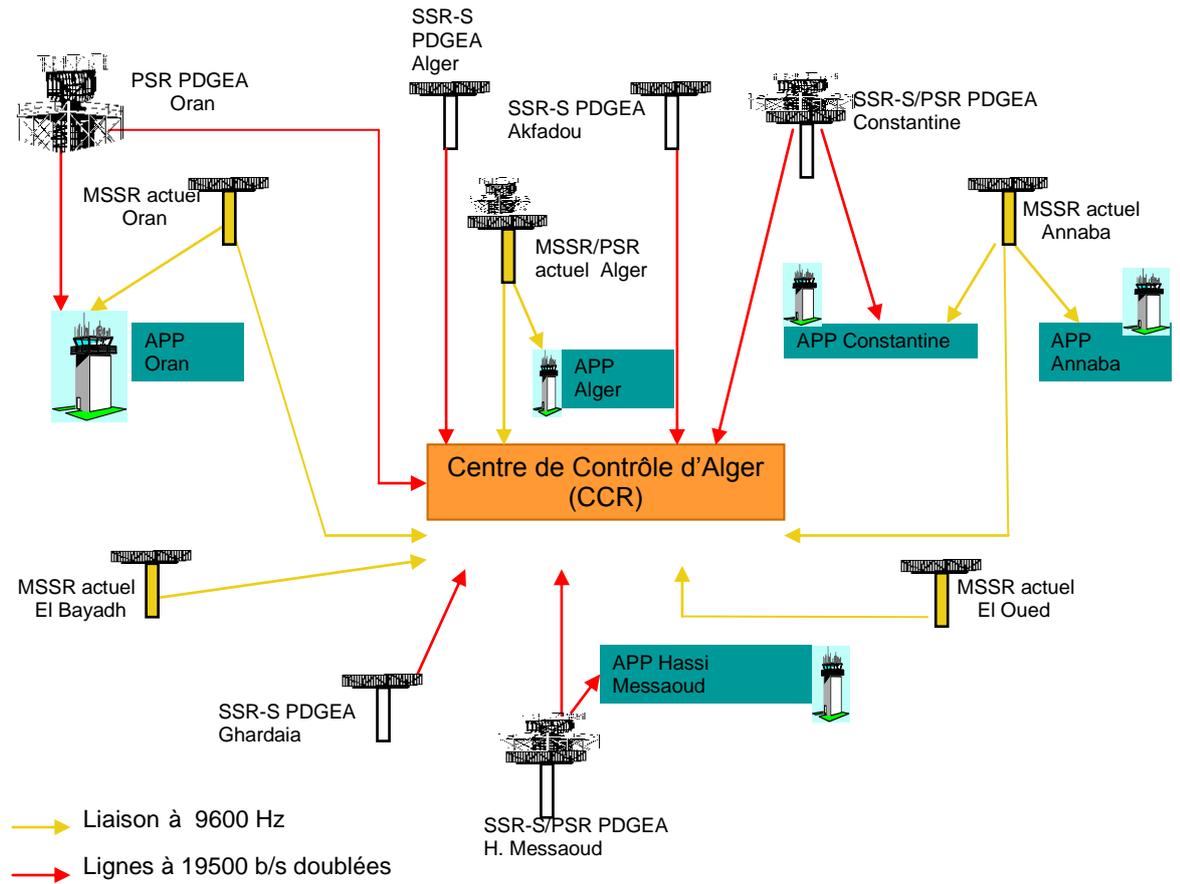


Figure IV.25 : Stations Radar du Nord.

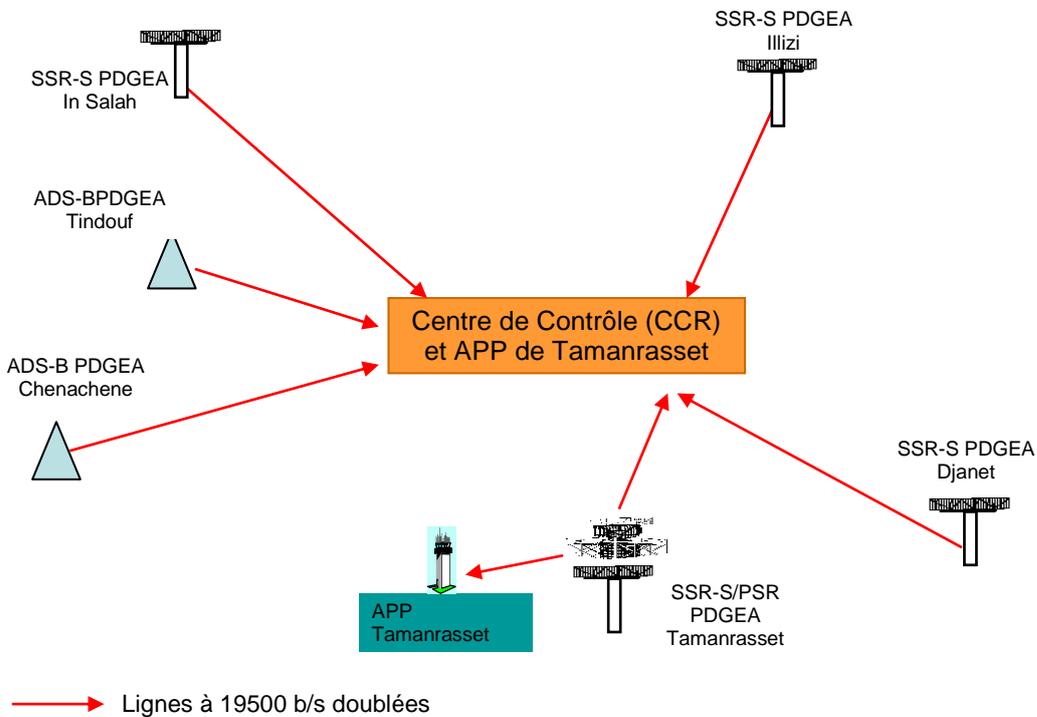


Figure IV.26 : Stations Radar du Sud.

D'autre part, deux systèmes de surveillance automatique dépendant (ADS/B) qui permettent la surveillance automatique de la position réelle de l'avion et qui sont utilisées actuellement dans le grand Sud, seront installés dans une petite région d'ombre à l'extrême Sud-ouest du pays, afin d'obtenir des images calculées et pouvoir y faire face.

Type d'ADS	Site
ADS/B	Tindouf
ADS/B	Chenachene

Tableau IV.11 : Emplacement de l'ADS/B.

IV.6 Nouveau CCR :

Suite au projet PDGEA, la FIR Alger sera divisée en deux FIR, FIR Nord qui a pour centre de contrôle le CCR d'Alger qui bénéficiera de deux radars supplémentaires parmi les 13 cités, et FIR Sud qui aura pour centre le CCR de Tamanrasset. La limite entre les deux FIR sera le parallèle 30°N.

Equipements pour le CCR de Tamanrasset :

- ✓ 06 positions de contrôle route ;
- ✓ 01 position de contrôle d'approche TAM ;
- ✓ 01 position superviseur, 01 position coordination militaire, 01 position de rejeu, 01 position gestion de trafic FMP ;
- ✓ 01 simulateur ATC ;
- ✓ 01 plateforme d'intégration.

La gestion du trafic aérien est source de problèmes de grande taille, à variables mixtes, généralement très combinatoires et difficiles à modéliser tant les contraintes liées au contexte sont difficiles à appréhender. De plus, les problèmes rencontrés sont très liés entre eux. Il est par exemple difficile de séparer les problèmes de circulation sur une plate-forme aéroportuaire des problèmes de trafic en approche, tous deux dépendant de la gestion des créneaux de décollage. De même les problèmes d'organisation du réseau de routes aériennes a une forte incidence sur la sectorisation et la résolution de conflits,....

Pour toutes ces raisons, la phase d'identification des problèmes et de modélisation est sans doute la tâche la plus difficile pour le chercheur.

Une fois un problème identifié, on peut résumer l'approche de la façon suivante :

- modélisation mathématique du problème ;
- calcul de sa complexité ;
- recherche d'algorithmes adaptés ;
- validation des résultats obtenus, sur un plan expérimental par la simulation, sur un plan scientifique par la publication.

Il est essentiel de poursuivre des activités de recherche au sein de la Direction Générale de l'Aviation Civile, car c'est la seule façon d'appréhender l'environnement lié à la gestion du trafic aérien et d'accéder aux données opérationnelles. L'accès à ces données est indispensable pour vérifier par la simulation l'efficacité des méthodes développées. La survie d'une équipe de recherche ainsi intégrée est toutefois difficile, tant les attentes du monde de la recherche et du monde opérationnel sont différentes. Si la gestion du trafic aérien séduit généralement les chercheurs en tant que domaine d'application, initier le monde opérationnel à certaines démarches scientifiques est parfois plus long. En ce sens, il semble essentiel de poursuivre les efforts entrepris pour développer des équipes de recherche scientifique au sein des organismes de la navigation aérienne.

GLOSSAIRE

APP	Contrôle d'approche.
ATS	Service de la circulation aérienne.
AWY	Voies aériennes.
ATC	Contrôle du trafic aérien.
ADS/C	Système automatique dépendant de surveillance par contrat.
ADS/B	Système automatique dépendant de surveillance mode diffusion.
ATM	Gestion du trafic aérien.
ATFM	Gestion des flux de trafic aérien.
ASM	Gestion de l'espace aérien.
APRON	Programme d'analyse numérique, appartient à l'ACI "Sécurité & Informatique"
AG	Algorithme génétique.
ATOS	Simulateur d'aérodrome.
ATT	<i>Aéroports, Tours et zones Terminales.</i> Division du CENA étudiant le contrôle d'aéroport et d'approche.
AMAN	<i>Arrival Manager.</i> Système diffusant les informations sur les vols à l'arrivée d'un aéroport pour préparer leur séquençement.
AOP	Opérations aéroportuaires.
ASMGCS	<i>Advanced Surface Movement Guidance and Control System.</i> Concepts définis par l'OACI pour le futur système de contrôle des avions au sol.
BADA	Base of Aircraft DATA. Base de données avion utilisé pour la simulation de vol.
CCR	Centre de Contrôle Régional.
CTA	Région de contrôle.
CTR	Zone de contrôle.
CVSM	Minimums de séparation verticale conventionnelle.
CPDLC	Communication Contrôleur Pilote par Liaison de Donnée.
CNS	Communication Navigation Surveillance.
CFMU	Central Flow Management Unit. Cellule européenne de gestion des flux de trafic.
CENA	Centre d'Etudes de la navigation Aérienne.
CASSOS	Optimisation des regroupements de secteurs de contrôle.
CATS	Simulation temps accéléré et mesure de performances.

GLOSSAIRE

CAUTRA	Coordonnateur AUtomatique TRafic Aérien.
CDM	<i>Collaborative Decision Making</i> . Projet visant à améliorer le partage et la diffusion des informations entre tous les intervenants du transport aérien.
DME	Equipement de mesure de distance.
DSNA	Direction des Services de la Navigation Aérienne.
DTI	Direction de la technique et de l'Innovation.
DST	<i>Decision Support Tools</i> . Outils d'aide aux contrôleurs.
DMAN	<i>Departure Manager</i> . Système diffusant les informations sur les vols au départ d'un aéroport vers les espaces qu'il va traverser.
D-GPS	<i>Differential Global Positioning System</i> .
Data-Link	Liaison de données. Terme généralement employé dans le domaine aéronautique pour désigner les liaisons de données sol-air ou air-air, afin de renseigner soit les systèmes sols, soit les autres avions sur l'état et/ou les intentions d'un avion donné.
ENNA	Etablissement national de la navigation aérienne.
EUROCAT 2000	est un système de traitement des données radar et des informations données plan de vol et de vol, d'utilisation de l'ATS fournis sur les routes des services de trafic aérien, et dans la région de Prague de contrôle terminal, y compris les CTR Prague.
EUROCON TROL	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i> . Organisme Européen chargé de la gestion du trafic aérien en Europe.
ERCOS	Détection et résolution automatique de conflits par des méthodes centralisées.
ENAC	Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
ERATO	En-Route Air Traffic Organizer.
ERASMUS	En-Route Air Traffic Soft Management Ultimate System.
EUROCAE	<i>European Organisation for Civil Aviation Equipment</i> . Organisme européen étudiant et développant les équipements relatifs à l'ATM
FIS	Service d'information de vol.
FIR	Région d'information de vol.
FMS	Système de gestion de vol.
FL	Niveau de vol.

GLOSSAIRE

FMP	Flow Management Position. Cellule de gestion des flux du trafic aérien d'un centre de contrôle travaillant en collaboration avec la CFMU.
FAA	Federal Aviation Administration. Organisme américain de l'administration de l'aviation.
GND	Niveau de sol.
HF	Haute fréquence.
Hub	Centralisation des lignes d'une compagnie sur un aéroport, pour faciliter les correspondances des passagers.
IFR	Vol aux instruments.
ILS	Système d'atterrissage aux instruments.
IATA	Association du transport aérien international.
Low cost	Principes de fonctionnement de nouvelles compagnies, visant à diminuer les coûts d'exploitation et de transport.
LOG	<i>Laboratoire d'Optimisation Globale</i> . Structure de recherche commune à l'ENAC et au CENA.
LEEA	<i>Laboratoire d'Economie et d'Econométrie de l'Aérien</i> . Structure de recherche commune à l'ENAC et au CENA.
MSL	Niveau moyen de la mer.
NDB	Balise non directionnelle.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> . Agence nationale américaine de l'aéronautique et de l'espace.
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale.
PPC	Programmation Par Contrainte.
POM	Planification, Optimisation, et Modélisation du trafic aérien.
PREDICT	Prévision de trajectoire.
PDGEA	Projet de Développement et Gestion de l'Espace Aérien.
PSR	Radar Primaire de Surveillance.
PRU	Bureau d'examen des performances.
RVSM	Réduction des minimums de séparation verticale.
RNP	Qualité de navigation requise.
RNAV	Navigation de surface.
RSFTA	Réseau de service fixe de télécommunication aéronautique.
RRU	Règlement régional d'urbanisme.

GLOSSAIRE

SSR	Radar secondaire de surveillance.
SAACTA	Système Algérien automatisé de contrôle du trafic aérien.
SAGES	Détection et résolution de conflits en utilisant de la régulation en vitesse.
S2D2	Validation d'indicateurs de complexité du trafic.
SMGCS	<i>Surface Movement Guidance and Control System</i> . Concepts définis par l'OACI, ayant aboutis à l'actuel système de surveillance du trafic au sol.
TWR	Tour de contrôle.
TMA	Région terminale de contrôle.
TRAFCA	Traitement automatique des fonctions de la circulation aérienne.
Taxiways	Voie de circulation au sol, matérialisée par une ligne continue que doit suivre le pilote.
UTA	Région supérieure de contrôle.
UIR	Région supérieure d'information de vol.
VFR	Vol a vue.
VHF	Très haute fréquence.
VSAT	Terminale à très petite ouverture.
VOR	Radiophare omnidirectionnel.



[1]. OACI Doc. 4444 : Gestion du trafic aérien ;

[2]. OACI Doc 9426 : Manuel de planification des services de la CA, 1^{ère} édition ;

[3]. Jean-Baptiste GOTTELAND, OPTIMISATION DU TRAFIC AU SOL SUR LES GRANDS AEROPORTS. Thèse de doctorat, Ecole National de l'Aviation Civile Toulouse, 2004 ;

[4]. Nicolas Durand, Algorithmes génétiques et autres outils d'optimisation appliqués à la gestion de trafic aérien. Document, 2004 ;

[5]. HE Yi, Méthodes appliquées à l'analyse des indicateurs de la complexité du trafic aérien. Thèse de Master, Ecole Nationale des Sciences Géographiques en France, 2007;

[6]. BOUDANI.A, COUVERTURE DE L'ESPACE AERIEN ALGERIEN PAR LES MOYENS CNS-ATM. Thèse de Magister, USDB, 2009 ;

[7]. Cours 3^{ème} année ingénieur circulation aérienne par DRARNI, 2008;



- [http : //pom.tls.cena.fr](http://pom.tls.cena.fr) ;
- <http://www.enna.dz/statistiques.htm>;
- <http://www.memoireonline.com/Regulation-des-Flux-de-Trafic-Aerien.html>;

L'année	Trafic commercial	Trafic non commercial	Trafic national	Trafic international	Trafic Total
2000	99 584	53 240	76 669	22 915	152 824
2001	144 960	47 635	116 609	28 351	192 595
Var 01/00	45.565%	-10.527%	52.09%	23.721%	26.02%
2002	140 833	55 624	109 315	31 518	196 457
Var 02/01	-2.846%	16.771%	-6.255%	11.17%	2.005%
2003	94 344	55 894	62 837	31 507	150 238
Var 03/02	-33.010%	0.485%	-42.51%	0.034%	-23.52%
2004	92 299	56 884	58 600	33 699	149 183
Var 04/03	-2.167%	1.771%	-6.742%	6.957%	-0.702%
2005	91 788	57 333	55 888	35 900	149 121
Var 05/04	-0.553%	0.789%	-4.627%	6.531%	-0.04%
2006	89 196	58 720	52 816	36 380	147 916
Var 06/05	-2.823%	2.419%	-5.496%	1.337%	-0.808%
2007	89 920	60 365	51 293	38 627	150 285
Var 07/06	0.811%	2.80%	-2.883%	6.17%	0.016%
2008	97 679	63 297	56 772	40 907	160 976
Var 08/07	8,6%	4,9%	10,7%	5,9%	7,1%
2009	110 411	64 394	65 648	44 763	174 805
Var 09/08	13,03%	1,73%	15,63%	9,42%	8,59%

Tableau II.2.1 : Evolution du trafic Aérodrômes de 2000 à 2009.

Aérodromes	Mouvements commerciaux			Mouvements non commerciaux			Total général		Total général
	National	International	Total	National	International	Total	National	International	
ALGER	20856	26374	47230	6771	2241	9012	27627	28615	56242
H-MESSAOUD	4818	402	5220	17659	1123	18782	22477	1525	24002
ORAN	5502	4745	10247	1419	472	1891	6921	5217	12138
CONSTANTINE	5558	2722	8280	2233	98	2331	7791	2820	10611
ANNABA	3397	1333	4730	1238	212	1450	4635	1545	6180
BATNA	529	507	1036	3380	7	3387	3909	514	4423
H-R'MEL	398	0	398	3390	0	3390	3788	0	3788
IN-AMENAS	1347	0	1347	1804	268	2072	3151	268	3419
SETIF	1441	1514	2955	396	8	404	1837	1522	3359
BEJAIA	918	1555	2473	823	26	849	1741	1581	3322
GHARDAIA	1199	46	1245	1093	515	1608	2292	561	2853
OUARGLA	888	23	911	1690	0	1690	2578	23	2601
TIMIMOUN	2443	6	2449	132	2	134	2575	8	2583
TAMANRASSET	897	73	970	867	623	1490	1764	696	2460
EL-GOLEA	188	0	188	2164	6	2170	2352	6	2358
BISKRA	589	342	931	1346	21	1367	1935	363	2298
TLEMCEN	758	912	1670	394	6	400	1152	918	2070
TINDOUF	688	4	692	789	519	1308	1477	523	2000
BECHAR	632	9	641	1234	0	1234	1866	9	1875
ADRAR	343	3	346	1460	14	1474	1803	17	1820
EL-OUED	743	13	756	1042	16	1058	1785	29	1814
JIJEL	572	0	572	969	12	981	1541	12	1553
DJANET	526	82	608	850	48	898	1376	130	1506
IN SALAH	276	0	276	1144	2	1146	1420	2	1422
ILLIZI	216	0	216	866	0	866	1082	0	1082
TOUGGOURT	182	0	182	771	0	771	953	0	953
TEBESSA	732	0	732	92	26	118	824	26	850
TIARET	18	10	28	387	0	387	405	10	415
CHELEF	10	212	222	85	2	87	95	214	309
B-BMOUKHTAR	56	0	56	186	0	186	242	0	242
MECHERIA	20	0	20	210	0	210	230	0	230
MASCARA	6	0	6	86	0	86	92	0	92
LAGHOUAT	26	20	46	6	2	8	32	22	54
EL-BAYADH	0	0	0	14	38	52	14	38	52
BOU-SAADA	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IN-GUEZZAM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	56772	40907	97679	56990	6307	63297	113762	47214	160 976

Tableau II.2.2 : DETAIL DU TRAFIC AERODROME (Année 2008).

	Survols avec escale		Survols sans escale	Vols spéciaux	Total
	Nationaux	Internationaux			
1998	30 887	19 393	32 722	13 277	96 279
1999	43 691	28 629	34 173	14 984	121 477
Var 99/98	41.5%	47.6%	4.4%	12.8%	26.2%
2000	54 027	33 242	35 010	12 040	134 319
Var 00/99	23.6%	16.1%	2.4%	-19.6%	10.6%
2001	61 657	39 925	33 444	12 480	147 506
Var 01/00	14.1%	20.1%	-4.5%	3.6%	9.8%
2002	51 343	54 562	33 774	13 101	152 780
Var 02/01	-16.7%	36.6%	0.1%	4.1%	3.6%
2003	47 506	38 440	36 581	13 241	135 768
Var 03/02	-7.5%	-29.5%	8.3%	1.1%	-11.1%
2004	51 162	36 144	41 310	13 149	141 765
Var 04/03	7.7%	-5.1%	12.9%	-0.7%	4.4%
2005	46 032	36 187	44 957	15 004	142 180
Var 05/04	-10.1%	0.1%	8.8%	14.1%	0.3%
2006	57 952	43 758	49 470	15 800	166 980
Var 06/05	25.9%	20.01%	10.03%	5.3%	17.4%
2007	58 836	45 404	54 268	16 000	174 508
Var 07/06	1.5%	3.8%	9.7%	1.3%	4.5%
2008	63 513	47 680	57 121	12 566	180 880
Var 08/07	7,9%	5,0%	5,3%	-21,46%	3,65%
2009	66 554	52 194	58 119	9 131	185 998
Var 09/08	4,8%	9,5%	1,7%	-27,33%	2,82%

Tableau II.3 : Evolution du trafic de Route de 1998 à 2009.

Secteurs	2003	Var% 03/02	2004	Var% 04/03	2005	Var% 06/05	2006	Var% 06/05	2007	Var% 07/06	2008	Var% 08/07	2009
Secteur centre	71 619	-19.1	47 434	-34	46 966	-1	47 000	0.89	47 500	0.01	74 888	50,6	87 718
Secteur Est	50 480	-8.7	53 755	6.5	59 272	10	59 500	0.003	58 000	-0.02	75 263	8,2	80 835
Secteur Sud/Est	42 886	-1.6	45 888	7	47 046	2.5	47 700	0.01	48 877	0.02	17 616	2,8	16 718
Secteur Ouest	34 598	-13.6	32 873	-5	35 178	7	35 800	0.01	37 090	0.03	44 562	9,2	47 012
Secteur Sud/Sud	33 133	1.1	38 906	17.4	41 499	6.7	42 400	0.02	43 999	0.03	48 539	0,4	47 132
Secteur Sud/Centre	28 763	-14.2	33 479	16.4	32 289	-3.5	33 400	0.03	34 877	0.04	42 397	11,1	42 015
Secteur Sud/Ouest	6 948	-15.6	12 324	77.4	13 279	7.8	14 600	0.09	14 800	0.01	17 616	11,4	16 718
Total	268 427	-11.1	264 659	-1.4	275 529	4.1	280 400	9.17	285 143	0.9	358 149	13,4	376 612

Tableau II.4 : L'évolution de trafic par secteur de 2003 à 2009.