

UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département d'Aéronautique**

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Aéronautique

**DECONGESTION DES SECTEURS DE CONTROLE EN ROUTE PAR
LE PROCESSUS D'ALLOCATION DES CRENEAUX AUX DEPARTS**

Par

Fatima Zahra DRARENI

Devant Le jury composé de :

S.BERGHEUL	Maître de Conférence, U.de Blida	Président
T. REZZOUG	Maître de Conférence, U. de Blida	Rapporteur
D.SOUFI	Ingénieur. Cadre ENNA	Co-rapporteur
R.HAOUI	Maître de Conférence, USTHB	Examineur
M.LAGHA	Maître de Conférence (B), U. de Blida	Examineur
S.MEGUELLATI	Chargé de cours, U. de Blida	Invité
A.MOUFEK	Contrôleur de la C.A, ENNA	Invité

Blida, Novembre 2008

RESUME

La congestion aérienne est un problème universel qui s'explique par une inadéquation entre l'offre du système de contrôle et la demande du trafic aérien : lorsque le volume du trafic prévu dépasse la capacité déclarée, il subsiste le problème des retards et une pénurie de capacité de l'espace aérien. En effet, un niveau de congestion élevé accroît les risques d'accidents. Pour garantir la sécurité, de nombreuses solutions ont été envisagées, notamment en cherchant à augmenter les capacités disponibles et/ou adapter le trafic à celles-ci. L'une des mesures qui peut être envisagée, en adaptant la demande du trafic prévue aux capacités disponibles, est la régulation des flux de trafic par «Allocation des Créneaux au Départ des aéronefs».

Le but de ce travail est l'étude des mécanismes intervenant dans le processus de calcul des créneaux au départ. Cette étude sera appuyée par l'implémentation d'une Application qui permet la résolution du problème de la congestion des secteurs de contrôle en route par Allocation des Créneaux au Départ (appliqués au CCR Alger pour les secteurs AI/AS regroupés). Le processus consiste à retarder les vols impliqués dans les secteurs surchargés. Il s'agira par ces affectations de retard, de limiter le nombre d'aéronefs qui peuvent entrer dans un espace défini pendant un intervalle de temps donné. Cette application permet de respecter les contraintes de capacités horaires des secteurs de contrôle, d'organiser les vols de manière à limiter la charge instantanée de travail des contrôleurs, réduire ainsi le stress occasionné et améliorer la sécurité des vols. Néanmoins, plusieurs critères d'optimisation sont possibles, et dans notre travail nous nous intéressons plus aux propriétés qualitatives de la solution qu'aux coûts induit par ces retards. Cela se traduit par l'adoption des principes fondamentaux suivants : assurer un niveau de sécurité en ne dépassant pas les capacités déclarées des secteurs de contrôle aérien, lisser au mieux la courbe du trafic aérien et réduire les retards induits.

Mots clés : Gestion du trafic aérien, congestion aérienne, ATFM/ATFCM, régulation du trafic aérien, créneaux horaires, capacité secteur de contrôle.

ABSTRACT

The air congestion is a worldwide problem due to a mismatch between supply in air traffic control system and air traffic demand, when the forecast traffic may exceed air control system capacities there remains the problem of delays and a shortage of airspace capacity. Indeed, a high level of congestion increases the risk of accidents. Thus, to guarantee certain security level, measures should be taken including seeking to increase available capacity and / or adjust the traffic to them. One measure that may be considered, by the adjustment of air traffic demand to the available capacities, is «Departure Slot Allocation policy».

The purpose of this work is the study of mechanisms involved in the computation of «Departure Slot Allocation», and implementation of an Algorithm that allows solving the problem of en route sectors congestion by "Departure Slot Allocation" (applied to Algiers for the sectors AI / AS grouped). The process attribute delays to flights involved in sectors overloaded. The purpose of these assignments delays is to limit the number of aircraft that can enter an area during a specified time period. It allows the respect of sectors capacities constraints, arranging flights so as to limit instantaneous controllers work load, reducing therefore occasioned stress and so improving safety. However, several optimizations criteria's are possible, but in our work we are interested in more qualitative properties of the solution to the cost in terms of delays caused, this Would lead to such fundamental principles: ensuring a certain level of security without exceed sectors available capacities, the better smooth curve of air traffic, and finally to reduce induced delays.

Keywords: air traffic Management, air congestion, ATFM / ATFCM, air traffic regulation, slots, capacity control sector.

ملخص

تعتبر ظاهرة الاحتقان الجوي مشكلة عالمية, والتي تفسر بانعدام التكافؤ بين عرض نظام الملاحة الجوية و طلب حركة المرور الجوي : عندما تفوق حركة المرور الجوي المنتظرة السعة المعلنة لنظام الملاحة الجوية , يدخل هذا الأخير في ما يسمى بالاحتقان الجوي و الذي يترجم لدى المستخدمين بتأخير معتبر للرحلات. إذا كان مستوى الاحتقان الجوي مرتفع فان هذا يؤدي إلى ارتفاع معدل الحوادث الجوية. لذا, و لضمان للأمن الجوي تم أخذ عدة تدابير كزيادة سعة نظام المراقبة الجوية و/أو تكيف حجم الطلب المنتظر لحركة المرور الجوي مع سعة هذا الأخير. من بين التدابير الممكن أخذها, في ما يتعلق بتكيف حجم الطلب المنتظر مع سعة نظام المراقبة الجوية, هو تخصيص « مجالات زمنية لإقلاع الطائرات».

يهدف هذا العمل إلى دراسة المكانز مات التي تدخل ضمن سياق «تخصيص مجالات زمنية لإقلاع الطائرات وكذا إنجاز برنامج معلوماتي يمكننا من حل مشكلة الاحتقان الجوي , و ذلك بحساب « مجالات زمنية محددة لوقت إقلاع الطائرات ». و تطبيقه في مركز المراقبة الجوية الجزائري على القطاعين "ج.د/ج.ع" مضمومين. الهدف من عملية تخصيص « مجالات زمنية لإقلاع الطائرات » هو الحد من عدد الطائرات, التي يمكن لها أن تدخل في قطاع جوي معين في مدة زمنية معينة. تضمن هذه العملية مراعاة القواعد الإجبارية المحددة للسعة الساعية لقطاعات المراقبة الجوية , برمجة الرحلات بطريقة تسمح بحد من صعوبة مهام مراقبي العمليات الجوية و بهذا تقليل الضغط النفس الناتج و تحسين المستوى الأمني للرحلات الجوية. رغم ذلك فانه يمكن اخذ عدة معايير ممكنة لتحسين مستوى أداء البرنامج المعلوماتي, غير أننا اعتدنا أكثر في عملنا هذا بالخصائص النوعية للحلول المقدمة أكثر منها من تكلفة التأخير الناتج, و هذا يتحقق بتطبيق عدة قواعد أساسية مثل: ضمان مستوى معين لأمن الرحلات و عدم تجاوز السعة المعلنة للقطاعات الجوية, خف التأخيرات الناتج و تسوية منحى الحركة الجوية على أحسن وجه.

الكلمات الرئيسية : تسيير المرور الجوي , الاحتقان الجوي , ATFM/ATFCM , تنظيم
المرور الجوي, SLOT , سعة قطاعات المراقبة الجوية.

REMERCIEMENT

Tous d'abord, je remercie ALLAH, qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail.

Mes remerciements sont adressés avant tous à Mr T. REZZOUG, Maître de conférence au département d'Aéronautique de Blida, qui a accepté d'être mon directeur de mémoire.

J'exprime mes vifs remerciements pour mes deux co-directeur : Mr D. SOUFI pour sa compétence et la confiance qu'il m'a témoigné en me proposant ce sujet, et Mr A.MOUFEK, Contrôleur de la CA, pour sa précieuse aide et sa disponibilité, aucune expression ne pourrait exprimée toute ma gratitude.

C'est un grand honneur que me font Messieurs les membres du Jury, pour avoir accepté de consacrer de leur temps à l'examen de ce travail et à la rédaction des rapports de mémoire.

Nombreux sont ceux qui n'ont pas mesuré leur temps pour m'apporter leur aide, notamment les enseignants et le personnel du département d'aéronautique de Blida (Mr DRIOUCHE, Mr RAHIME, Mr MEGUELLATI, Mr BERGUEL, Mr LAGHA, Mr ZAABOT, Melle ZINEB, et DJILLA), Mme NACHIDA, Mr YAHIYA et Melle ZAHRA du Département d'Informatique de l'Université de Blida, le personnel du département système à l'ENNA (Melle BOUBEKER, Melle MESSOUS, Mr MAHFOUD, Mr SAMSON, ...), ainsi que Mr DJOUAMAA, Melle CHAHRA et Mr MOUNIR de la DDNA, Mr TEMAR, Mr ATTAFI du SIA, Mr TAYEBE, Mr BOUSLIMANNE, Melle KARIMA : merci à vous tous.

Enfin, je ne serai jamais assez reconnaissante envers ma famille et mes proches, pour l'indispensable soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de ces années de travail.

TABLES DES MATIERES

RESUME	
REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIÈRES	
LISTE DES ILLUSTRATION, FIGURES ET TABLEAUX	
INTRODUCTION.....	11
1. ETAT DE L'ART SUR LA REGULATION DES FLUX DE TRAFIC AERIEN PAR ALLOCATION DES CRENEAUX AU DEPART.....	18
1.1. Taxinomie des problèmes de régulation ATFCM.....	18
1.1.1. Introduction et historique de la recherche dans ce domaine	18
1.1.2. Le Ground Holding Problem (GHP).....	19
1.1.3. Le problème de gestion du trafic aérien (TFMP).....	19
1.1.4. Les problèmes de routage et de reroutement dynamique.....	20
1.1.4.1. Allocation de route et de niveaux aux aéronefs.....	20
1.1.4.2. Le reroutement dynamique.....	20
1.1.5. Les différentes versions du problème de régulation ATFCM.....	21
1.1.5.1. Statique-dynamique.....	21
1.1.5.2. Simple période- multi période.....	21
1.1.5.3. Déterministe probabiliste.....	21
1.2. Etat de l'art sur le GHP et ses extensions.....	22
1.2.1. Les modèles GHP.....	22
1.2.2. Les modèles TFMP.....	22
1.2.3. Récapitulatif de l'étude bibliographique.....	25
1.3. Les Modèles d'Allocation des Créneaux au départ.....	27
1.3.1. Historique de la régulation des flux de trafic aérien en Europe.....	27
1.3.2. Le Modèle CASA d'Allocation des créneaux au départ.....	28
1.3.2.1. Description du Modèle CASA.....	28
1.3.2.2. Inconvénients du modèle CASA.....	29

1.3.2.3. Les Améliorations possibles.....	30
1.3.3. Le Modèle SHAMAN.....	32
1.3.3.1. Description du Modèle standard "SHAMAN".....	32
1.3.3.2. Inconvénients du Modèle standard "SHAMAN".....	33
1.3.3.3. Les Améliorations possibles du modèle standard "SHAMAN".....	35
1.3.4. Conclusion sur les méthodes actuelles d'allocation des slots.....	36
 2. PROBLEMATIQUE DE LA CONGESTION AERIENNE - LA NOTION DE CAPACITE ET DE RETARD.....	37
2.1. Introduction	37
2.2. Problématique.....	38
2.2.1. Types de congestion aérienne	38
2.2.1.1. La congestion récurrente.....	38
2.2.1.2. La congestion non récurrente.....	39
2.2.2. Les causes de la congestion aérienne.....	39
2.2.2.1. Les facteurs de capacité.....	40
2.2.2.2. Les causes de manque de capacité.....	42
2.2.3. L'impacte de la congestion aérienne.....	47
2.2.3.1. L'effet économique.....	47
2.2.3.2. L'effet environnemental.....	47
2.2.3.3. D'autres effets potentiels.....	47
2.3. Les solutions envisagés pour la décongestion de l'espace aérien.....	47
2.3.1. Première approche pour la décongestion aérienne: Augmentation de la capacité du système de contrôle.....	48
2.3.1.1. Les solutions pour accroître la capacité au niveau des aérodromes et l'espace environnent.....	49
2.3.1.2. Solutions pour accroître la capacité de l'espace en route.....	54
2.3.1.3. Solutions communes: Améliorations opérationnelles.....	63
2.3.2. Deuxième approche pour la décongestion aérienne: Adaptation de la demande aux capacités déclarées des systèmes aériens.....	65

4.6.2.1. Les fonctions liées à la base de données.....	112
4.6.2.2. Les fonctions de calcul et d'affichage des résultats.....	112
4.6.3. Présentation de l'interface.....	113
4.6.3.1. Fichier.....	114
4.6.3.2. Traitement- Régulation.....	115
4.6.4. Présentation des résultats obtenus.....	116
4.6.5. Commentaires des résultats.....	118
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	124

APPENDICES

- A. Liste des symboles et des abréviations
- B. Présentation générale du contrôle aérien
- C. Quelques méthodes du calcul de capacité des secteurs de contrôle

REFERENCES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAHIQUES ET TABLEAUX

Figure.1.1. La valeur du délai correspond à la régulation la plus pénalisante.....	29
Figure.1.2. Surcharge entre 2 périodes avec le modèle SHAMAN.....	33
Figure.1.3. Le modèle SHAMAN autorise des surcharges sur des fenêtres de temps courtes (inférieure à 30 minutes).....	34
Figure.1.4. Pics de trafic chronique dus à l'optimisation du modèle SHAMAN.....	34
Figure.1.5. Modèle SHAMAN et modèle à fenêtre glissante.....	35
Figure.2.1. Les facteurs de capacité.....	40
Figure 3.1. Le scénario Level Caping (LC).....	73
Figure3.2. Schéma fonctionnel des activités ATFCM préactique.....	74
Figure 3.3. Organisation temporelle de l'ATFCM.....	74
Figure 3.4. Les phases de préallocation et d'allocation de créneaux au départ....	86
Figure.3.5. Le calcul de la CTOT d'un vol.....	93
Figure.4.1. Présentation de la fenêtre principale.....	113
Figure.4.2. La Fenêtre de Mise à jour des Points Significatifs.....	114
Figure.4.3. Présentation de la fenêtre de Régulation.....	115
Figure 4.4. Graphe comparatif de la Charge instantanée du trafic aérien sans coordination avant et après régulation(entre 09h30 et 15h30). « Trafic réel»	116
Figure 4.5. Graphe comparatif de la Charge instantanée du trafic aérien avec coordination avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30).TraficRéal»	117
Figure 4.6. Graphe comparatif de la Charge Horaire du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30). « Trafic Réel»	118
Figure 4.7. Graphe comparatif de la Charge instantanée du trafic aérien sans coordination avant et après régulation(entre 09h30 et 15h30). « Trafic réel»	120

Figure 4.8. Graphe comparatif de la Charge instantanée du trafic aérien avec coordination avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30). « Trafic Réel»	121
Figure 4.9. Graphe comparatif de la Charge Horaire du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30). « Trafic Réel»	122
Figure B.1. Formulaire plan de vol OACI.....	128
Tableau 1.1. Récapitulatif du problème de régulation ATFC.....	21
Tableau 1.2. Récapitulatif de l'état de l'art sur le TFMP.....	26
Tableau.3.1. La SAL avant l'application du principe PAPS.....	88
Tableau 3.2. La SAL après l'application du principe PAPS.....	88
Tableau 3.3. La SAL en appliquant le principe créneau le plus près possible de l'ETO.....	89
Tableau 3.4. La SAL en appliquant les principes de base.....	92
Tableau 4.1. Les limites latérales et verticales du secteur TMA Centre Alger AI/AS.....	98
Tableau 4.2. Exemple des zones à statut particulier.....	99
Tableau 4.3. Exemple des points significatifs.....	99
Tableau 4.4. Exemple de l'aérodrome de SETIF.....	100
Tableau 4.5. Description de la route ATS «A 6».....	100
Tableau 4.6. Performances d'aéronefs pour les aéronefs B747/H et B742/H....	102
Tableau 4.7. Table Aérodrome :TAB_AD.....	110
Tableau 4.8. Table performances aéronefs: TAB_PERF.....	110
Tableau 4.9. Table des routes ATS: TAB_ATS.....	111
Tableau 4.10. Table points significatifs: TAB_PNT.....	111
Tableau 4.11. Table profil de vol: TAB_PROF.....	111
Tableau 4.12. Table liste des créneaux: TAB_SAL.....	112

INTRODUCTION

La circulation aérienne représente l'ensemble des aéronefs en vol ainsi que les aéronefs évoluant au sol, sur l'aire de manœuvre d'un aéroport [1]. Les organismes de contrôle ATC sont responsables de l'écoulement du trafic à l'intérieur de l'espace aérien dont ils ont la charge. Un vol étant constitué de phases de montée, de croisière et de descente, sa gestion s'avère complexe. Il est donc nécessaire de confier le contrôle des diverses phases de vol à différents contrôleurs à savoir:

- *Le contrôle d'aéroport*, qui gère les aéronefs pendant toute la phase aéroportuaire, depuis la phase finale de descente jusqu'à son décollage suivant, comprend notamment la circulation au sol. La surveillance du trafic est avant tout visuelle (à partir de la tour de contrôle). Néanmoins, les plus grands aéroports sont aujourd'hui munis de système de visualisation radar du trafic au sol ainsi que des systèmes sophistiqués de détection des véhicules et des intrusions de piste.
- *Le contrôleur d'approche*, le transfère de contrôle des aéronefs peut ne pas s'effectuer directement de la tour de contrôle vers le centre de contrôle en route en passant par une phase intermédiaire « le contrôle d'approche ». Il a pour but, d'assurer la sécurité dans l'écoulement du trafic aérien et la mise en ordre de celui-ci pendant les phases de descente ou de montée (il existe des aéroports non menu de contrôle d'approche, en général de faible densité de trafic, dans ce cas le centre de contrôle en route se charge d'assurer les services de la CA pendant toute la phase d'approche).
- *Le contrôle en route*, prend en charge tout le trafic (national et international) qui pénètre dans sa zone de responsabilité. Il concerne généralement les aéronefs en phase de croisière (en Algérie le centre de contrôle régional de Oued-Smar est le seul centre qui assure les services de la C.A pour toute la FIR Alger).

L'objet des services de la CA est de maintenir la sécurité des aéronefs (anti-abordage et anti-collision) et d'assurer la régularité et la fluidité du trafic aérien. Pour ce faire, le travail des contrôleurs consiste en différentes tâches:

- *L'information de vol et l'alerte.* Le pilote a accès à des informations aéronautiques, météorologiques ainsi que des informations sur les autres vols évoluant à proximité et dans certains cas à des suggestions (dans un espace à service consultatif). Le contrôleur doit prendre en compte les messages d'alerte ou de détresse transmis par un aéronef et déclenche si nécessaire les opérations de recherche et de sauvetage (service d'alerte);
- *La fonction de contrôle.* Elle consiste à maintenir un espacement suffisant entre les aéronefs. Ainsi, on distingue deux types de contrôle: *Le contrôle radar* qui est assuré au moyen des indications du radar matérialisé par les échos des aéronefs apparaissant sur un écran radar; et *le contrôle aux procédures (classique)* qui est effectif en Algérie. Il consiste en la gestion des flux aériens, où le positionnement d'un appareil se fait en se basant sur les informations des stations de radionavigation au sol (VOR, DME, NDB...). L'aéronef communique sa position relative au contrôleur par contact radio, ce dernier détermine grâce à l'aide de bandes de progression de vol appelée "Strip" une image mentale du trafic. Le contrôleur assure les séparations en conformité avec les standards OACI conformément aux aides à la navigation utilisées.

L'espace aérien est classé par l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) en 7 catégories (nommées de A à G) selon les services rendus et le type de trafic (IFR, VFR) pouvant évoluer dans cet espace. Afin de confier aux contrôleurs des zones de responsabilité de taille raisonnable, l'espace aérien, quelque soit sa classe, est partitionné en différentes positions de contrôle (secteurs). À chaque secteur est affectée, une équipe de contrôleurs qui est responsable du respect des normes de sécurité en temps réel. Géré par un opérateur humain, il existe une limite « capacité secteur¹ »

¹ Géré par des opérateurs humains, un secteur a une capacité limitée par le nombre d'aéronefs que l'équipe de contrôle peut écouler par unité de temps (généralement une heure).

dépendant essentiellement du type de trafic à écouler (en route ou en approche, stable ou en évolution), du personnel (du point de vue effectifs et qualification), de la structure de l'espace aérien (complexité du réseau de route, sectorisation, classes d'espace aérien, services fournies), type et disponibilité des moyens techniques (moyens radionavigation, Radar, fréquences...etc.). Si cette capacité est dépassée, le contrôleur ne sera plus à même de gérer tous les aéronefs sous sa responsabilité et donc de garantir la sécurité des vols.

Ces dernières années, l'accroissement continu de la demande du trafic aérien non assortie avec celle des capacités du système de contrôle, a engendré des problèmes de congestion des secteurs aériens (les contrôleurs exposent leurs difficultés en ces termes : Le trafic est en expansion, mais l'espace n'est pas extensible [2]), dans le passé une des solutions utilisée est l'augmentation des capacités des secteurs de contrôle par : le recrutement de personnels supplémentaires, les innovations techniques accompagnées de nouvelles méthodes de travail augmentant le rendement des contrôleurs, les restructurations de l'espace aérien. Ces mesures et ces innovations ont permis d'absorber toujours plus de trafic tout en améliorant ou en maintenant un niveau de sécurité élevé. Citons pour illustration de ces évolutions l'introduction du radar, l'automatisation des coordinations inter-centres et inter-secteurs, l'introduction d'interfaces homme-machines de plus en plus évoluées, la définition «d'autoroutes aériennes» et la mises en place des différentes réformes telles les schémas de route RNAV, l'espacement VHF à 8,33 kHz ou encore la réduction de l'espacement vertical RVSM, le redécoupage de l'espace aérien en secteurs plus petit...etc.

Ces solutions ont toutes pour objectif d'accroître la capacité du système de contrôle pour traiter un trafic en constante évolution. Cependant, compte tenu de la croissance exponentielle de la demande du trafic aérien ces dernières années le problème de congestion persiste. Les organismes de gestion de trafic

aérien se sont orientés vers une autre approche pour réduire la congestion. La demande de trafic aérien connaît non seulement de fortes variations saisonnières (périodes des vacances notamment), mais aussi des variations quotidiennes avec des heures de pointe, variables en fonction des secteurs. De plus le phénomène de congestion se traduit par une concordance espace-temps du trafic aérien dans les secteurs, ainsi il est possible de réduire les surcharges en séparant les aéronefs dans l'espace (Allocation de routes Alternatives, contournement des zones congestionnées) et/ou dans le temps (Allocation de créneaux): ce mécanisme de régulation du trafic aérien est appelé ATFCM (Air Traffic Flow and Capacity Management).

L'ATFCM est un service complémentaire aux services ATS. Il s'agit d'obtenir une structure de trafic optimal à travers les zones où la demande prévue va dépasser la capacité durant des périodes données. Le but est : de satisfaire, dans la mesure du possible, les demandes des opérateurs aériens, d'assurer une utilisation optimale de la capacité de contrôle et d'adapter au mieux la demande de trafic aux exigences opérationnelles. Cette gestion des flux aériens n'est pas un but en soi, mais un simple outil pour palier aux manques existants; le but premier étant de mettre en oeuvre un service à même de satisfaire la demande. La fonction de gestion des flux de trafic aérien et de la capacité est effectuée en plusieurs phases successives, aux moyens et horizons d'actions bien distincts [3]: *L'ATFCM stratégique*, dont le but est d'organiser le trafic de façon macroscopique à moyen et long terme (de 18 mois à quelques jours avant le jour d'opérations). Pendant cette phase sont élaborés le plan de capacité (capacity plan) pour l'année à venir qui assigne à chaque centre de contrôle des objectifs de capacité, les schémas d'orientation de trafic (rerouting scheme), décrivant les routes à suivre en fonction de l'origine et de la destination, les accords inter-centres et les accords avec les militaires qui permettent aux civils d'utiliser leurs zones aériennes pour écouler les pointes de trafic. *L'ATFCM pré-tactique*, on parle souvent de pré-régulation, qui consiste à organiser une journée de trafic j , la veille ($j-1$) ou l'avant-veille ($j-2$). On dispose pour cela de données relativement précises : sont déjà connus la majorité des plans de vol, la capacité de contrôle que peut offrir chaque centre en fonction des effectifs qui seront présents le jour j , le débit maximal d'aéronefs pouvant

pénétrer dans un secteur pendant une période de temps donnée. Les mesures globales de gestion des flux (reroutement ou régulation des décollages) sont décidées pendant cette phase et rendues publiques sous forme d'un ATFCM Daily Plan (ADP) communiqué par ATFCM Notification Message (ANM) aux compagnies aériennes et aux contrôleurs aériens. *L'ATFCM tactique* consiste à organiser les différents flux en tenant compte des événements du jour (activation des zones militaires, conditions météorologique, panne d'équipement...). Il s'agit plutôt de mesures d'ajustement de l'ADP qui prennent en compte le trafic réel et les impondérables du moment.

Les mesures de régulation de la demande peuvent prendre différentes formes [4]. Dans les systèmes les plus simples, les CCR qui exercent la régulation à l'égard des centres de contrôle régionaux voisins diffusent des avis demandant que les aéronefs concernés soient espacés selon des intervalles prescrits. Par exemple : un aéronef toutes les 10 minutes, en parle dans ce cas de « taux d'acceptation ». Les aéronefs sont parfois appelés à suivre des trajectoires prédéfinies, c'est " le schéma d'orientation de trafic" ou encore un rerouting qui consiste à donner à l'appareil en vol un changement de route ou de niveau de vol pour lui éviter le ou les secteurs congestionnés. Une autre forme de régulation consiste à retarder les aéronefs en vol en leurs appliquant des attentes en route, ou en leurs demandant d'évoluer à des vitesses réduites pour permettre d'absorber au moins une partie des retards. L'attente en route ou le vol à un régime réduit ne sont pas attrayants pour les exploitants à cause de l'économie de carburant qui en résulte. Il faut toutes fois observer qu'une vitesse réduite en route risque fort d'augmenter l'encombrement sur le tronçon de route et de conduire à une complexité accrue dans les secteurs. Une forme améliorée et plus complexe de régulation des arrivées aux secteurs congestionnés est possible avec un système automatisé, c'est " l'allocation des créneaux au départ ".

Ce processus consiste à retarder les heures de décollage des vols impliqués dans les secteurs surchargés. L'objectif de ces affectations des retards est de respecter les contraintes de capacité en route fournies par chaque centre

de contrôle suivant leur schéma d'ouverture quotidien². Aussi, plutôt que de faire attendre en l'air les aéronefs, il a été décidé de leur attribuer des créneaux de départ (sous forme de retard par rapport à l'heure de départ demandée) et de les faire attendre au sol: non seulement la sécurité y gagne, puisque les risques d'abordage sont moindres au sol que dans les circuits d'attente saturés, mais aussi les compagnies y retrouvent elles au moins en partie leur compte, puisque l'attente au sol est moins coûteuse que l'attente en vol, ce qui permet aussi de respecter les contraintes d'environnement en réduisant les émissions de gaz polluants. La régulation de trafic aérien par "Allocation des créneaux au départ", envisagée dans ce mémoire comme solution pour la décongestion des secteurs en route, permet d'éviter les surcharges des secteurs de contrôle en séparant les aéronefs dans le temps sans leurs changer de trajectoire.

Le mémoire est organisé de la manière suivante, en premier lieu une Introduction générale à l'étude.

Chapitre 1 : ETAT DE L'ART SUR LES MODELES D'ALLOCATION DES CRENEAUX AU DEPART; Ce chapitre donne une description sommaire des études et des techniques de résolution par « Allocation des créneaux au départ ». Nous avons commencé, tout d'abord, par les travaux réalisés dans le contexte global de la régulation du trafic aérien (ATFCM) ensuite par ceux qui concernent, plus particulièrement, la régulation par allocation des créneaux au départ.

Chapitre 2: PROBLEMATIQUE DE LA CONGESTION AERIENNE : NOTION DE CAPACITE ET DE RETARDS; ce chapitre traite la problématique de la congestion aérienne et explique la notion de capacité et sa relation étroite avec les retards. Une description détaillée des causes et des conséquences de manque de capacité sera ainsi donnée.

² C'est le planning élaboré manuellement par le Flight Management Position, des positions ouvertes pendant une journée de trafic.

Chapitre 3 : DECONGESTION DES SECTEURS DE CONTROLE EN ROUTE PAR LE PROCESSUS D'ALLOCATION DE CRENEAUX AU DEPART; face à un déséquilibre entre "l'offre" du système de contrôle et "la demande" de trafic aérien, un ajustement va se faire en utilisant la régulation des flux par "Allocation des créneaux au départ". Il s'agit de limiter le nombre d'aéronefs qui pénètrent dans un secteur donné pendant un intervalle de temps donné. L'utilisation de ce processus permettra de lisser les pics de demande et de diminuer la charge de trafic occasionnée tout en assurant le respect des capacités déclarées des secteurs de contrôle.

Chapitre 4: DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION:IMPLEMENTATION ET RESULTATS; Ce chapitre est consacré à la description de l'application développée pour l'Allocation des Créneaux au Départ ainsi que les résultats obtenus sur un échantillon de trafic. Nous montrons comment réaliser un équilibrage entre l'offre et la demande de trafic en affectant les vols à des créneaux de départs, ce qui nous permettra d'obtenir des secteurs de contrôle équilibrés en terme de charge de trafic.

Nous terminons par une conclusion: après avoir fait le point sur la solution proposée dans ce mémoire, nous terminons par une conclusion et des perspectives de recherche qui s'ouvrent encore, et qui permettent d'améliorer le processus d'Allocation des Créneaux au Départ.

CHAPITRE 1

ETAT DE L'ART SUR LA REGULATION DES FLUX DE TRAFIC AERIEN PAR ALLOCATION DES CRENEAUX AU DEPART

1.1. Taxinomie des problèmes de régulation ATFCM

1.1.1. Introduction et historique de la recherche dans ce domaine

Face à l'augmentation constante et continue du trafic aérien (augmentation moyenne annuelle de 9% depuis 1950) [5], et en dépit de l'augmentation concurrente des capacités de contrôle, le système global de la navigation aérienne a atteint dans les secteurs de grand trafic (Etats-Unis, Europe de l'ouest, Asie de l'est) un degré d'utilisation proche de la saturation provoquant de nombreux retards lors des périodes les plus chargées. Les premières victimes de la saturation ont été historiquement les aéroports. Ils restent, aux Etats-Unis, le principal goulot d'étranglement. Lorsque le nombre d'aéronefs souhaitant atterrir est supérieur à la capacité de l'aéroport, les contrôleurs en charge sont obligés d'imposer des attentes en l'air très coûteuses pour les compagnies. Pour résoudre ce problème, les premières recherches dans le domaine de la régulation du trafic aérien au milieu des années 80 ont été basées sur le principe « un retard au sol coûte moins cher qu'un retard en vol ». Il serait alors plus économique de retarder les aéronefs avant leur décollage lorsqu'on prévoit une demande plus importante qu'aux capacités disponibles. Ces recherches étaient plus orientées vers le modèle américain où la capacité de l'espace en l'air n'est pas critique. Pour pouvoir prendre en compte les espaces aériens européens, où la saturation des espaces en route est également un problème majeur, il a été nécessaire d'étendre les recherches aux cas où la capacité de l'espace aérien en route est aussi limitative que les capacités aéroports.

Au fur et à mesure que des chercheurs se sont intéressés à ce sujet et à ses extensions, un certain formalisme s'est imposé dans la désignation des différents problèmes. On s'intéressera principalement dans notre cas au problème nommé *Slot Allocation Problem* (SAP) qu'on cherche à résoudre

dans le cas de la régulation à savoir : déterminer pour chaque aéronef un créneau de décollage afin d'éliminer les saturations des secteurs de contrôle en route et de minimiser les surcoûts.

1.1.2. Le Ground Holding Problem (GHP) [13]

Basé sur l'idée qu'un retard au sol est moins coûteux qu'un retard en vol, ce problème cherche à allouer des retards au décollage des aéronefs afin d'éviter des temps d'attente en vol dus à la capacité limitée de l'espace aérien et des aéroports lors de leurs arrivées. Le GHP est aussi quelquefois appelé *Slot Allocation Problem* (SAP) dans la littérature spécialisée. Les premières approches ont été réalisées aux Etats-Unis où les problèmes de saturation sont essentiellement localisés au niveau des aéroports, ce qui explique que la capacité des secteurs n'ait pas été prise en compte dans les premiers modèles. D'une manière naturelle les chercheurs se sont d'abord intéressés à la version la plus simple du problème dont la résolution pourra ensuite servir de base pour la résolution des extensions. Dans cet esprit, la version la plus ancienne et la plus simple du GHP est le *Single-Airport Ground Holding Problem* (SAGHP) dans lequel on ne considère qu'un seul aéroport d'arrivée pour un ensemble donné d'aéroports de départ. On considère au contraire un réseau entier d'aéroports dans le *Multi-Airport Ground Holding Problem* (MAGHP).

Si aux Etats-Unis les saturations sont limitées aux aéroports, ce n'est pas le cas en Europe en raison de la proximité de grands pôles d'échanges et de la complexité induite par le découpage territorial. Pour pouvoir prendre en compte ces saturations, ils ont introduit la capacité de l'aéroport de départ ou la capacité des secteurs en vol tant pour le SAGHP que pour le MAGHP: on parle alors de *Air Traffic Flow Management Problem*, on trouve aussi des auteurs précisant « with en-route capacities ».

1.1.3. Le problème de gestion du trafic aérien (TFMP) [12-13]

Ce modèle, aussi appelé *Generalized Tactical Traffic Flow Management Problem* (CTFMP) est une extension des problèmes ci-dessus puisque les contraintes de capacité des secteurs sont systématiquement prises en compte.

Nous pouvons de plus ajouter la possibilité de modifier la vitesse des aéronefs pendant leur vol, voire d'imposer des délais en vol (c'est très similaire d'un point de vue de la modélisation), tout en respectant les capacités des aéroports de départ et d'arrivée et des secteurs. Enfin nous pouvons également ajouter la possibilité de changer la route des aéronefs : c'est le *Air Traffic Flow Management Rerouting Problem* (TFMRP).

1.1.4. Les problèmes de routage et de reroutement dynamique [6]

Deux types de problèmes présents dans la littérature spécialisée présentent des points communs avec le problème d'optimisation de la régulation court terme, mais abordés à des échelles de temps différents : plus en amont pour les problèmes d'allocation de routes et de niveaux, plus en aval pour les problèmes de reroutement dynamique.

1.1.4.1. Allocation de route et de niveaux de vols aux aéronefs

Un problème courant dans la recherche sur les transports est le problème de routage des véhicules sur un réseau. Dans le cas du trafic aérien ce problème consiste à déterminer pour une journée donnée les routes, les niveaux de vol, voire les créneaux de décollage alloués aux vols planifiés. Ce problème est abordé d'un point de vue planification, c'est-à-dire plutôt dans le cadre de l'ATFCM pré-tactique, quelques jours avant le décollage. La fonction objective recherche alors à minimiser les conflits potentiels de manière à diminuer la charge des contrôleurs. Ce problème vise à rationaliser le dépôt des plans de vols.

1.1.4.2. Le reroutement dynamique

Dans les cas où les conditions météo sont extrêmes et dangereuses ou d'activités militaires empêchant le survol de zones complètes de l'espace aérien, la résolution du problème de reroutement dynamique consiste à trouver une trajectoire pour un aéronef évitant les zones de perturbation tout en minimisant la consommation supplémentaire de carburant. Ce problème se situe quasiment dans le cadre du contrôle aérien en temps réel.

1.1.5. Les différentes versions du problème de régulation ATFCM

On trouve dans la littérature spécialisée de nombreuses approches :

1.1.5.1. Statique-dynamique

Lorsqu'on calcule une solution définitivement pour la journée, le modèle est dit statique. Il est dit dynamique si on l'actualise au cours du temps, lorsque de nouvelles données deviennent disponibles.

1.1.5.2. Simple période- multi période

On effectue la régulation sur une seule période où on divise l'horizon en plusieurs périodes. A noter que cette distinction n'est quasiment jamais précisée puisqu'on utilise naturellement des modèles multi-périodes, les simples périodes n'ayant qu'un intérêt méthodologique et encore limité.

1.1.5.3. Déterministe probabiliste

Si on considère que les différents paramètres sont connus à l'avance, on parle de modèle déterministe, sinon, on parle d'approche probabiliste ou stochastique. Plusieurs extensions de ces modèles ont été envisagées. On peut ainsi considérer une contrainte d'équité (fairness) entre les différentes compagnies aériennes concernées par la régulation. On peut également prendre en compte la dépendance entre les capacités de décollage et d'atterrissage des aérodromes et des secteurs de contrôle.

Tableau 1.1 : Récapitulatif du problème de régulation ATFCM

	Un seul aérodrome	Plusieurs aérodromes	Capacité des secteurs en route	Reroutement possible
SAGHP				
MAGHP				
TFMP				
TFMRP				

1.2. Etat de l'art sur le GHP et ses extensions

1.2.1. Les modèles GHP

Odoni (1987 [6]) a été le premier à formaliser le problème GHP. Différentes versions du SAGHP ont été étudiées entre 1987 et 1997 : de statique à dynamique probabiliste (Terrab, Andreatta, Richetta, Hoffman, Ball ...).

Le MAGHP a été étudié de même par de nombreux auteurs (Vranas, Andreatta, Brunetta). Les détails de ces travaux sont donnés par Andreatta (1993, [7]) pour un état de l'art détaillé du SAGHP et à Hoffman et Ball (1997, [8]) pour une étude des différents modèles du SAGHP avec des contraintes de bancs de vols (banking constraints). Récemment, les travaux concernant le GHP se sont orientés en prenant en compte les nouvelles procédures américaines basées sur le CDM, les calculs et les allocations de créneaux ne s'effectuant alors plus pour un vol mais pour des groupes de vols.[9]

1.2.2. Les modèles TFMP

Le problème TFMP a été étudié pour la première fois dans les années 1993-1995. Depuis les travaux se sont multipliés sur le sujet en augmentant à la fois la complexité des modèles et la taille des instances testées. On donne ici un bref aperçu des méthodes générales d'approche du problème.

1.2.2.1. Tasic, Babic Cangalovic, Hohlacov (1994, [10])

Cet article ne se place pas dans le cadre opérationnel mais est plutôt un travail de défrichage sur le comportement des algorithmes proposés. Les instances et les temps de calculs ne sont donc pas réalistes. Une originalité de cette approche réside dans la modélisation de la demande. L'importance du choix de la fonction coût, et donc de la politique de régulation adoptée, sur la nature des résultats et sur la répartition des retards entre les différents usagers est clairement mise en évidence.

1.2.2.2. Maugis (1995, [12])

Cet article développe un modèle d'optimisation destiné à être intégré à un outil d'aide à la décision pré-tactique. Trois approches distinctes sont

proposées mais c'est finalement la plus classique qui est retenue ; la programmation linéaire en nombres entiers. Le modèle présenté est très flexible et permet de nombreuses extensions (surcharge de certains secteurs, connectivité des vols, reroutement, bancs de vols, agrégation de vols...) mais les tests ne sont effectués que pour l'affectation des retards au sol. Une étude détaillée des différentes mesures possibles d'inéquité entre les vols est effectuée.

1.2.2.3. Tasic, Babic Cangalovic, Hohlacov (1997, [11])

De la même manière que dans l'article présenté en 1.2.2.1, le but n'est pas ici de proposer un outil opérationnel d'aide à la décision, mais de proposer une approche prenant en compte la possibilité du reroutement. On peut ainsi évaluer sommairement le gain que l'on peut en attendre, qui est très positif sur les instances étudiées. Ce modèle est simplement une extension du modèle précédent pour prendre en compte le reroutement.

1.2.2.4. Vranas (1997, [15])

Cet article s'intéresse au problème du TFMP dans le cadre de la régulation tactique en Europe effectuée par la CFMU par CASA (Computer Assisted Slot Allocation). Le problème posé est alors l'allocation optimale des créneaux de décollage. L'auteur propose une nouvelle modélisation en programmation linéaire en nombres entiers qui comporte beaucoup moins de variables que la version de Bertsimas et Stock. Une étude assez complète est alors réalisée pour comparer les allocations effectuées par CASA et celles obtenues en résolvant le problème de manière optimale à partir du modèle de Bertsimas and Stock.

1.2.2.5. Van den Akker, Nachtigall (1997, [16])

Cet article s'attaque au problème du TFMP sans prendre en compte les possibilités de reroutement. Le modèle utilisé est le même que celui de Maugis et les données des tests sont également les mêmes. Les auteurs utilisent en revanche un processus de génération de colonnes pour résoudre le programme linéaire posé et les résultats sont très encourageants. Ils fournissent également une heuristique pour obtenir à chaque itération du processus

de génération de colonnes une solution entière qui, dans les résultats expérimentaux, est assez bonne.

1.2.2.6. Bertsimas and Stock (1998, [13])

Cet article est un article de référence dans la littérature spécialisée consacrée à la résolution du TFMP. Les auteurs proposent une modélisation en programmation linéaire novatrice qui permet d'obtenir presque toujours des solutions entières. Les tests assez poussés effectués sur de grandes instances viennent confirmer les résultats mathématiques sur les volumes de trafic (secteurs). A noter cependant qu'aucune garantie d'intégrité n'est donnée théoriquement et que Vranas (1997) en utilisant ce même modèle a obtenu des solutions optimales non entières. De nombreuses extensions du modèle sont proposées théoriquement (interdépendance des capacités de départ et d'arrivée des aéroports, reroutement, bancs de vols, connections multiples...) mais les tests ne sont effectués que dans le cas le plus simple et on n'a pas d'information sur les propriétés d'intégrité du modèle étendu.

1.2.2.7. Oussedik, Delahaye, Schoenauer (1998, [11])

Le problème de la gestion du trafic aérien est abordé de manière différente et plus indépendante des modèles de Bertsimas et Stock. Ce n'est pas le cas des autres approches utilisant la programmation linéaire en nombres entiers. Ici, c'est la technique de l'optimisation stochastique et notamment des algorithmes génétiques qui est retenue. Outre cette différence de méthode, à noter également une différence importante d'objectifs puisque les auteurs cherchent à minimiser non pas le retard total en vol, comme c'est le cas dans la plupart des autres articles sur le TFMP, mais la congestion. Cet article propose une modélisation fine et, privilège de l'optimisation stochastique, pas du tout linéaire.

1.2.2.8. Bertsimas and Stock (2000, [14])

Après avoir écrit un article sur le TFMP, Bertsimas et Stock essaient ici d'ajouter les possibilités de reroutement en utilisant une approche différente. Ils effectuent une modélisation en un multi-flot dynamique puis calculent à partir

d'un algorithme de relaxation lagrangienne et d'un algorithme probabiliste un ensemble de trajectoires pour les avions, ils choisissent une de ces trajectoires par un programme linéaire en nombres entiers.

1.2.2.9. Alonso, Escudero, Ortuno (2000,[17])

Les auteurs proposent une extension du modèle de Bertsimas and Stock pour prendre en compte le caractère stochastique du système. La modélisation stochastique est faite par un arbre de scénarios. L'approche la plus prometteuse «full recourse policy» consiste à chercher une solution par scénario en respectant le principe de non anticipation : pour deux scénarios identiques jusqu'à la date t , les décisions prises jusqu'à la date t sont les mêmes. Ainsi, on ne communique les décisions qu'à la date t en fonction du parcours dans l'arbre des scénarios.

1.2.2.10. Barnier Brisset Rivière (2001, [18])

On s'intéresse ici au problème d'allocation des créneaux de décollage en prenant en compte la capacité des secteurs de contrôle. L'approche retenue est celle de la programmation par contraintes.

Plusieurs modèles sont proposés, le plus efficace est celui comportant des intervalles de temps glissants pour vérifier les contraintes de capacité. Le contexte envisagé est la régulation pré-tactique et les solutions sont évaluées en terme de qualité des résultats sans prendre en compte le temps de calcul.

1.2.3. Récapitulatif de l'étude bibliographique

Tous les travaux étudiés ici ont pour point commun d'aborder le problème d'allocation de créneaux de décollage et/ou de routes aériennes alternatives pour les vols de manière à respecter les contraintes de capacité des secteurs et des aéroports tout en minimisant le coût de la politique choisie, à l'exception des travaux de Oussedik [19] qui visent une minimisation de la complexité du trafic. Une grande diversité d'outils de la recherche opérationnelle sont utilisés pour résoudre ce problème : programmation linéaire en nombres entiers (résolue par branch and bound ou heuristiques), programmation par contraintes, algorithmes génétiques, métaheuristiques. (Voir Tableau 1.2)

Tableau 1.2. Récapitulatif de l'état de l'art sur le TFMP.

Auteurs	Modélisation, contraintes	Contraintes Objectifs	Actions possibles
Tosic (1995)	PLNE : heuristiques	capacités	retard au sol (non limité)
Tosic (1995)	PLNE : heuristiques	capacités	retard au sol (4 périodes) reroutement
Bertsimas Stock (1995)	PLNE, relaxation des contraintes d'intégralité	capacités, vols continués	retard au sol, retard en l'air
Vranas (1997)	PLNE, relaxation puis branch & bound	capacités, vols continués	retard en l'air tests sur le modèle B-S
Oussedik (1998)	Algorithmes génétiques	capacités, minimisation de la congestion	retard en l'air (entre 60 et 90 mn) reroutement
Bertsimas & Stock (2000)	multi-flot : génération de chemins 4D puis PLNE pour choisir	capacités, vols continués	retard au sol, retard en l'air, reroutement
Alonso (2000)	PLNE et résolution par relaxations et heuristiques	capacités stochastiques, vols continués	retard au sol, retard en l'air, <i>4 périodes de retard possible</i>
Maugis (1995)	PLNE et relaxation des contraintes d'intégralité	capacités en route	retard au sol (240 mn max), annulation de vols
Akker & Nachtigall	PLNE et génération de colonnes	capacités en route	retard au sol (240 mn max)

Remarque

Pour notre cas, aucune approche proposée ne peut s'appliquer directement à la résolution du problème d'Allocation des Créneaux au Départ. Cependant, la structure mathématique du problème est la même et les enseignements tirés des travaux précédents ont été utilisés dans le processus de résolution que nous avons développé au chapitre IV.

1.3. Les Modèles d'Allocation des Créneaux au Départ

Pour la FIR Alger, le trafic aérien est plus important en route, dû aux vols de transit (les survols), ainsi nous rencontrons le même problème que les Européens, à savoir la congestion des secteurs en route et non au niveau des aéroports. De ce fait, Le modèle qui se rapproche le plus de notre cas est celui évoqué par Barnier Brisset Rivière. Nous présentons donc, dans ce qui suit, les différents modèles d'Allocation des Créneaux au Départ ainsi que les améliorations possibles.

1.3.1. Historique de la régulation des flux de trafic aérien en Europe

En Europe, les premières tentatives de gestion des flux de trafic pour répondre à une saturation du système de contrôle du trafic aérien ont été envisagées à la fin des années 60 et mises en place au début des années 70 (1972 en France, 1975 en Allemagne). Ces tentatives n'ont pas été coordonnées à un niveau supranational du fait de la séparation de la responsabilité de la gestion du trafic entre les différents pays. Bien que pouvant être efficaces au niveau local, les premières mises en oeuvre aggravèrent les conséquences des problèmes croissants de congestion au niveau européen, du fait d'un manque de communication et de coordination entre les différentes unités d'ATFCM. Les bases d'un système européen global d'ATFCM (en remplacement des différents systèmes nationaux) ont été posées lors du meeting OACI, consacré à l'espace aérien européen en 1980. La CFMU (Central Flow Management Unit) devait voir réellement le jour en juillet 1989, sous la responsabilité d'Eurocontrol.

La CFMU est basé sur l'organisation de gestion du trafic centralisée de l'OACI (CTMO). Elle fournit le service de gestion des flux de trafic aux ATS, comprenant notamment les centres de contrôle aérien, et aux utilisateurs de cet espace aérien principalement les compagnies aériennes. La CFMU cherche à optimiser l'utilisation du système aérien, en s'intéressant à la fois à l'espace-temps aérien (Airspace Time) et aux capacités du système de contrôle (capacités des centres de contrôles et des aéroports).

Le principal outil de régulation utilisé par la CFMU est de retarder les aéronefs au sol par le biais d'allocation de créneaux de décollage. Cette allocation est un processus complexe qui a été automatisé en Europe à l'aide du système CASA (Computer Assisted Slot Allocation).

1.3.2. Le Modèle CASA d'Allocation des Créneaux au Départ

1.3.2.1. Description du Modèle CASA [19-20-21-22-23]

L'organisme central de régulation des flux de trafic CFMU est chargé, entre autres mesures stratégiques et tactiques de retarder les créneaux de décollage des vols impliqués dans les secteurs surchargés. La CFMU résout ces problèmes en deux étapes:

- Un outil "pré- tactique" (PREDICT) détecte les secteurs surchargés et permet à un expert de choisir des régulations en simulant leur impact;
- Un système "tactique" (TACT) auquel est intégré le module CASA, utilise ensuite un Algorithme Glouton pour allouer dynamiquement les créneaux de décollage des vols régulés selon le principe "premier arrivé, premier servi" au fur et à mesure que les vols parviennent à la CFMU.

CASA calcule une liste de créneaux en divisant la durée de la période à réguler par sa capacité et tente d'attribuer chaque créneau selon l'heure d'arrivée des vols dans le secteur concerné. Quand un nouveau plan de vol arrive, la solution est reconsidérée et tous les créneaux déjà préalloués peuvent être décalés pour respecter le principe "premier arrivé au secteur régulé premier servi".

La solution obtenue par ce processus dépend de l'ordre de résolution des contraintes et aucune optimisation globale n'y est possible, excepté lors de la phase finale où les créneaux alloués à des vols annulés tardivement seront réattribués. De plus, dans le cas où un vol subit des régulations multiples, le créneau est calculé uniquement en fonction du secteur qui "induit le plus grand retard" (Figure 1.1), ce qui peut violer les contraintes de capacité des autres secteurs traversés par ce vol. Si un vol traverse plusieurs zones régulées il reçoit le retard le plus important. Il sera donc accepté avec ce retard dans toutes les zones. Dans ce cas, le mécanisme employé par CASA n'est pas optimisé.

Illustrons ce qui se passe sur un exemple simple. Soit un aéronef qui traverse deux zones régulées. La première lui donne un retard de 10 minutes et la seconde un retard de 30 minutes. L'aéronef partira avec 30 minutes de retard. Mais le premier secteur peut-il prendre cet aéronef sans problème avec 30 minutes de retard au lieu de 10 ?

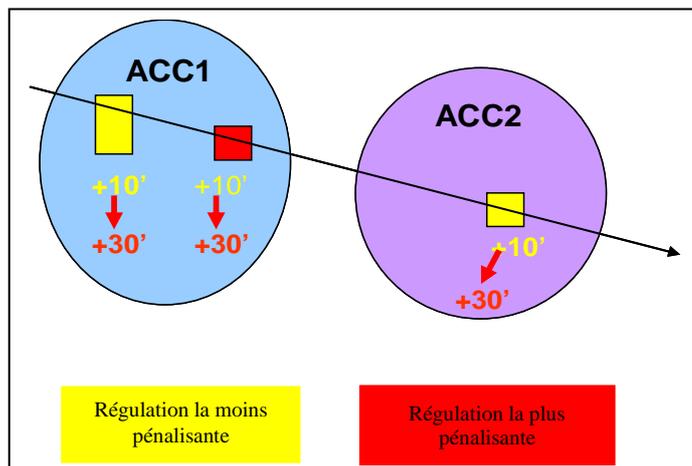


Figure.1.1. la valeur du délai correspond à la régulation la plus pénalisante.

Remarque

Pendant la phase d'allocation, des messages sont échangés entre le système TACT/CASA et l'opérateur aérien.

1.3.2.2. Inconvénients du modèle CASA

Nous avons vu précédemment que l'allocation des créneaux par CASA se fonde sur le principe FPFS «First Planned First Served» et sur la régulation la plus pénalisante. L'algorithme de CASA est basé sur le principe du premier prévu (dans une régulation) premier servi. En fait dès qu'il y a combinaison de régulations, c'est-à-dire lorsque des vols passent par plusieurs zones régulées, l'application rigoureuse, dans chacune des régulations, de ce principe FPFS conduirait à des délais très importants, alors même que les capacités ne seraient pas atteintes. C'est pourquoi l'algorithme de CASA, tout en appliquant ce principe réalise un compromis entre l'équité (au sens FPFS) et le risque de surcharge. Ce modèle ne peut-il pas être amélioré ?

- Le principe « premier arrivé, premier servi » semble garantir l'équité entre tous les vols mais il peut être remplacé ou complété par d'autres priorités tout aussi légitimes, en vue d'une meilleure efficacité.
- Que le délai d'un vol soit imposé par la régulation la plus pénalisante n'est pas une garantie de performance. En effet, CASA ne cherche pas la solution optimale (au sens global), il traite chaque régulation indépendamment et ne prend pas en compte la globalité du trafic aérien.

1.3.2.3. Les Améliorations possibles

1.3.2.3.1. Introduction

Le Centre d'Expertise FDR (Flight Data Research) réalise pour la CFMU des études en vue d'améliorer le fonctionnement actuel de l'ATFCM en Europe. Certaines de ces études portent sur le programme CASA d'attribution de créneaux. Parallèlement à la surveillance de cet équilibre et à l'amélioration de l'algorithme actuel, un projet à plus long terme a été initié. Il s'agit d'ISA (Innovative Slot Allocation) dont l'objectif est l'étude d'autres systèmes de priorités: étude de faisabilité et quantification de l'abandon éventuel des règles actuellement appliquées par la CFMU.

1.3.2.3.2. Présentation de l'étude ISA

Plusieurs stratégies d'attribution des créneaux ont été développées et comparées à CASA. Elles sont décrites ci-dessous :

- ISA FPFS (First Planned First Served)

Cette heuristique avait pour but de reproduire CASA puis de servir de référence, à valeurs des paramètres identiques (lissage, surcharge,...), pour la mesure des délais des autres stratégies.

Cette méthodologie a dû être abandonnée car il était impossible de reproduire fidèlement le compromis CASA avec IlogSolver³.

Néanmoins cette heuristique a été utile dans certaines mesures (celle de l'application stricte du principe FPFS, par exemple). Elle a permis aussi d'apprécier la qualité de CASA qui semble réduire le délai total, avec un bon lissage, sans risque de surcharge importante et peu d'entorses au principe FPFS.

- ISA RCO non pondérée (Reduce Cumulative Overloads)

Cette stratégie a pour objectif la minimisation du délai par vol, en un temps de calcul comparable à celui de CASA. Elle utilise pour cela les vols combinés (ceux qui traversent plusieurs régulations) partant du principe que plus un vol est combiné plus il est susceptible de retarder un grand nombre de vols moins ou non combinés. Pénalisant ces vols par rapport à leur ordre naturel, cette heuristique abandonne tout objectif d'équité.

- ISA OPT (Optimal)

Cette stratégie, ainsi que d'autres méthodes d'optimisation permet d'apprécier la qualité de RCO (plus généralement d'une méthode d'attribution de créneaux) en calculant l'optimum global. On obtient ainsi à quelle distance de cet optimum se trouve le délai total calculé par RCO.

- ISA RCO pondérée

Il s'agit essentiellement d'une étude de faisabilité qui veut anticiper les résultats de l'étude « ATFCM Priorities » en développant un outil permettant d'attribuer aux vols des priorités relatives individuelles. Il est alors possible de donner à chaque vol un poids différent dans la fonction de coût à minimiser, le choix n'est plus réduit, comme c'est le cas dans CASA, à « régulé ou exempté ».

³ Une librairie de programmation par contraintes sur des domaines finis d'entiers, écrite en Objectif Caml. Elle offre toutes les possibilités usuelles pour créer et manipuler des variables à domaine fini, des expressions arithmétiques et des contraintes (non obligatoirement linéaires). ILOG solver permet de construire aisément des contraintes et des buts (même récursif) en utilisant des fonctions Objectif Caml d'ordre supérieur.

Cette étude a été menée en pondérant les vols par le nombre de passagers. Le résultat obtenu est donc le délai par passager. Cette prise en compte de la taille des aéronefs réduit sensiblement le délai par passager. Elle pénalise lourdement les petits aéronefs pour lesquels les délais deviennent très importants. Un compromis entre coût total et coût maximal devrait donc être recherché.

1.3.2.3.3. Conclusion sur les études ISA

La première conclusion de l'étude ISA est qu'il est possible, grâce en particulier à la programmation par contraintes, d'attribuer, au moins de façon statique, des priorités relatives individuelles aux vols, lors de l'allocation des créneaux ATFCM. De plus il est possible de changer la ou les contraintes en fonction des objectifs choisis et ce, sans changer les algorithmes. On peut par exemple choisir différentes options : priorité aux court-courriers, priorité aux gros porteurs ou encore minimisation du délai maximum.

Le deuxième enseignement important d'ISA est la qualité de CASA qui réalise un bon compromis entre les différents objectifs que sont l'équité, la réduction du délai total, celle du délai maximal et le lissage/suppression des surcharges. Néanmoins, grâce à la programmation par contraintes, d'autres compromis sont possibles et peuvent donner jusqu'à 30% de gain par passager, en conservant le lissage actuel de CASA. Si le nombre de régulations venait à augmenter, et avec lui le nombre de vols combinés, ce gain devrait logiquement croître également.

1.3.3. Le Modèle SHAMAN [19-23-24]

1.3.3.1. Description du Modèle standard "SHAMAN"

Pour surmonter les inconvénients et le manque d'efficacité de CASA, le CENA a développé un module d'allocation de créneau en programmation par contrainte au sein de la plate-forme SHAMAN. Cet outil pose des contraintes de capacité sur tous les secteurs ouverts en divisant leur durée totale en tranches contiguës de 30 minutes et en restreignant le nombre de vol qui entrent durant chacune de ces tranches. Avec cette approche la Programmation Par Contraintes

apporte une vue globale des contraintes de capacité, si bien que les solutions (s'il en existe) sont consistantes (toutes les contraintes sont satisfaites).

Cependant, le model SHAMAN n'empêche pas des pics de trafic pouvant excéder la capacité des secteurs sur des périodes dont le début n'est pas un multiple de 30 minutes à partir du début de leur contrainte, et les contrôleurs auraient alors à gérer des charges de trafic trop importantes. En outre même si SHAMAN ne tente pas d'optimiser la solution obtenue, la stratégie de recherche utilisée est guidée par la minimisation de la somme totale des délais. En conséquence, les vols retardés ont une tendance chronique à se concentrer au début de chaque tranche de 30 minutes, ce qui génère également des pics de trafic dépassant les capacités (si ont les calcul sur des périodes inférieurs à 30 minutes).

1.3.3.2. Inconvénients du Modèle standart "SHAMAN"

Le modèle SHAMAN a l'inconvénient d'être fortement discontinu. Il contraint seulement la charge du secteur au début de chaque période c'est-à-dire uniquement 48 fois par jours (pour des périodes de 30 minutes). Ainsi, la charge peut grimper bien au-delà de la capacité spécifiée pour des fenêtres de temps qui ne commence pas à une heure multiple de 30 minutes. La Figure illustre ce phénomène: pour un nombre total de vol qui n'excède pas la capacité ni dans la première période, ni dans la seconde, une tranche de 30 minutes chevauchant les deux autres peut compter jusqu'à deux fois trop de vols.

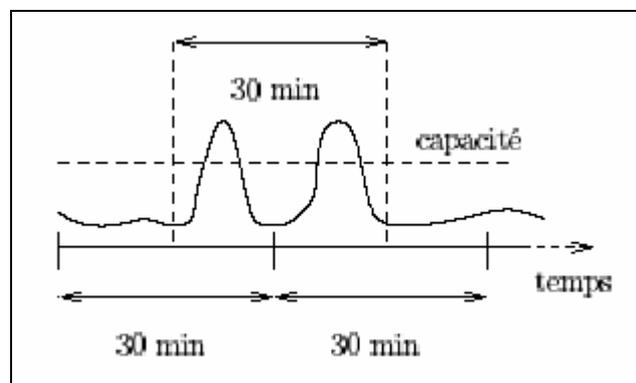


Figure. 1.2. Surcharge entre 2 périodes avec le modèle SHAMAN.

De plus les contraintes de ce modèle n'empêche pas les pics de trafic pour des fenêtres de temps inférieure à 30 minutes comme illustre la Figure 1.3: les deux profils correspondent (approximativement) à la même quantité de vol (supposée inférieure à la capacité sur la durée totale de la période), mais celui de gauche, réalisé par le modèle SHAMAN, répartit moins bien la charge de travail pour un contrôleur que le profil de droite, beaucoup plus régulier.

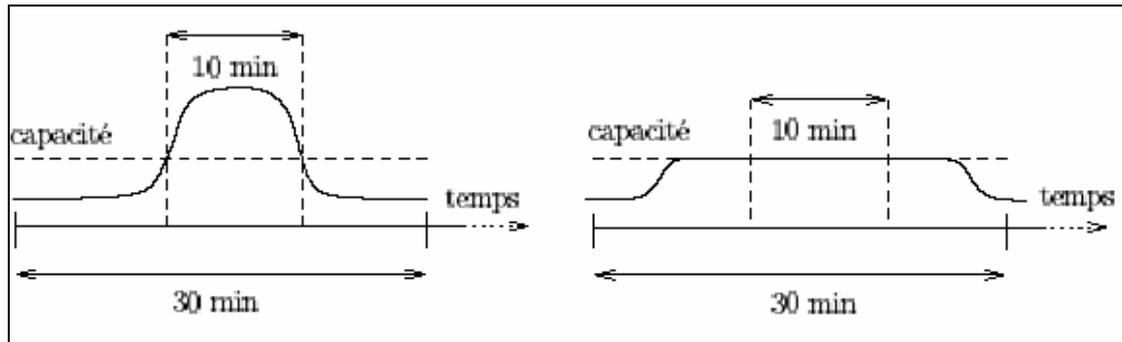


Figure.1.3. le modèle SHAMAN autorise des surcharges sur des fenêtres de temps courtes (inférieure à 30 minutes).

Comme l'objet de la fonction de coût est de minimiser la somme des retards, l'effet de bord attendu de cette modélisation est la concentration de vols en début de périodes: les vols retardés sont programmés le plus tôt possible dans la prochaine fenêtre de temps. La figure suivante illustre ce comportement, la courbe en pointillés correspond à la charge d'un secteur avant régulation, et le modèle SHAMAN tend à décaler la surcharge de la première période au début de la seconde.

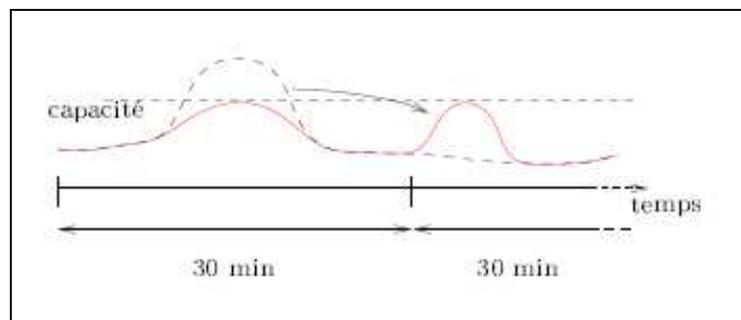


Figure.1.4. Pics de trafic chronique dus à l'optimisation du modèle SHAMAN.

1.3.3.3. Les Améliorations possibles du modèle standard "SHAMAN"

1.3.3.3.1. Le modèle à fenêtre glissante

C'est un simple raffinement du modèle standard "SHAMAN", développé au Laboratoire d'Optimisation Globale (CENA/ENAC). Il permet de lisser le profil de la charge de travail des contrôleurs avec une modélisation plus contraignante des contraintes de capacité. Un paramètre fait varier la durée du modèle le moins contraignant (SHAMAN), au plus contraignant (les contraintes de capacité sont satisfaites sur n'importe quelle période d'une durée donnée). En conservant l'idée du modèle SHAMAN, il est possible de définir un modèle "plus continu" en considérant des périodes qui se chevauchent, comme le montre la figure 1.5.

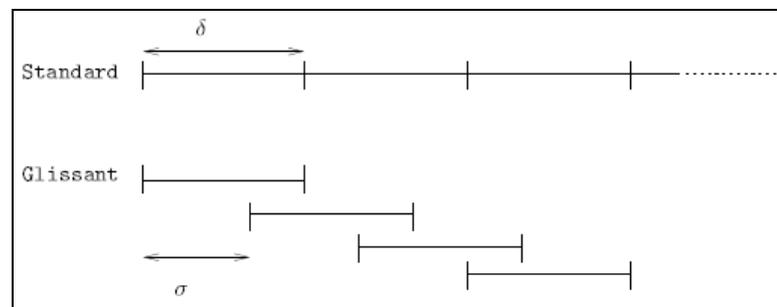


Figure.1.5. Modèle SHAMAN et modèle à fenêtre glissante.

Ce modèle prend évidemment le modèle standard "SHAMAN" et lui est équivalent pour $\sigma = \delta$. On s'attend à ce que le profil de la charge soit de plus en plus lisse quand σ diminue et donc que d'avantage de fenêtres de temps sont prises en compte.

1.3.3.3.2. Le modèle par tri

Dans ce modèle, les contraintes de capacité sont imposées avec un modèle « dual » du modèle standard "SHAMAN". Les vols qui entrent dans le secteur ne sont plus comptés comme précédemment, mais seuls les rangs de dates d'entrée sont considérées: si les rangs de deux vols sont trop proches, on contraint leurs dates à être suffisamment séparées dans le temps.

L'utilisation d'une contrainte de tri a déjà été proposé par Zhou [25] pour résoudre le problème Job-shop "ordonnancement". Ce modèle par tri assure

que les contraintes de capacité sont respectées "continûment" sur chaque secteur. Le modèle glissant doit lui être équivalent lorsque le paramètre σ est réduit à l'unité de temps, c'est-à-dire que toutes les fenêtres de temps de durée δ sont contraintes.

1.3.4. Conclusion sur les méthodes actuelles d'allocation des slots

L'allocation des créneaux pour l'ATFCM est un problème d'optimisation difficile. Les contraintes de capacité des secteurs de contrôle ne sont pas clairement définies et la programmation par contraintes permet d'en modéliser différentes interprétations qui accordent plus ou moins d'importance à la régularité de la charge de travail des contrôleurs.

Le modèle à fenêtres de temps contiguë fournit des solutions peu réalistes dans lesquelles apparaissent des pics de trafic qui amènent probablement les centres de contrôle à sous-estimer leur capacité réelle. En revanche, le modèle à fenêtre glissante ou par contraintes de tri assure une charge de travail régulière en produisant des problèmes beaucoup plus contraints menant à des solutions plus coûteuses en terme de somme des retards attribués.

La grande taille des données de trafic aérien, le nombre de vol et la taille des domaines, rendent le problème d'allocation de créneaux difficile à optimiser suivant le critère de la somme totale des délais attribués, mais des solutions optimales sont obtenues avec le retard maximal comme critère de minimisation. D'autre part, l'intégration dans la fonction de coût de divers facteurs tels que la régularité du trafic est une nécessité opérationnelle qui pénaliserait fortement les modèles qui minimisent la somme des retards.

Un système idéal devrait donc avoir la possibilité de répartir efficacement la charge dans l'espace (lissage). Pour cela, il devrait appréhender le trafic ainsi que l'ensemble des régulations de façon globale, l'objectif final étant d'obtenir un délai total minimum avec une charge de travail équilibré. [25]

CHAPITRE II PROBLEMATIQUE DE LA CONGESTION AERIENNE LA NOTION DE CAPACITE ET RETARD

2.1. Introduction

L'industrie du transport aérien joue un rôle de premier plan dans l'activité économique mondiale et demeure l'un des secteurs de l'économie dont la croissance est la plus rapide. La baisse des prix des billets, à la suite de la libéralisation du secteur, l'a rendu accessible à une partie bien plus grande de la population. Grâce à sa rapidité et à la réduction de ses coûts, l'avion est désormais un mode de transport alternatif au train et à la voiture. Depuis une quinzaine d'années, on observe dans le monde des taux moyens de croissance annuels du trafic aérien de l'ordre de 3 à 6 %. [26]

Cet accroissement régulier de la demande du trafic aérien, non assorti avec celle de la capacité du système de contrôle, a engendré des problèmes de congestion donnant lieu à des niveaux non maîtrisés des retards. Ces dernières années, entre 25 et 35 % des vols sont arrivés plus de quinze minutes après l'heure mentionnée sur les billets [26]. Cette situation est à l'origine de nombreuses protestations des passagers, qui se plaignent auprès des compagnies aériennes, elles mêmes touchées par les retards.

Mais pourquoi mener une étude sur la congestion aérienne et les retards qu'elle occasionne?

Plusieurs raisons justifient cet intérêt. Un premier argument est lié à la sécurité. Souvent, les contrôleurs aériens expliquent qu'il existe une relation entre le maintien de la sécurité et la réduction des retards. Mais ce lien n'est pas toujours évident. En effet, un problème de congestion non ou mal traité accroît les risques d'accidents. La sécurité et la fluidité ne sont donc pas deux objectifs opposés; au contraire, la réduction de la congestion permettrait de renforcer l'un et d'améliorer l'autre.

Ensuite, le deuxième intérêt de cette volonté, est le respect des contraintes d'environnement en réduisant les émissions polluantes dues aux surcroûts de la consommation d'énergie (retards en vol). Enfin, une troisième justification concerne les coûts des retards: En effet, ces retards sont très coûteux. Le montant de la perte économique qu'ils engendrent est difficile à quantifier. Une étude récente (ITA, 2005) [27], évaluant les conséquences financières des retards sur les passagers et sur les compagnies (au niveau mondial), avance le chiffre de dix milliards d'euros, il semble donc important de traiter la congestion pour réduire ce gaspillage.

2.2. Problématique

La congestion aérienne est un problème universel, que connaissent particulièrement tous les grands aéroports et les Centres de Contrôle Régionaux. Elle se traduit par une inadéquation entre l'offre et la demande, où le nombre de vols à traiter dépasse la capacité du système de contrôle, ce qui engendre une dégradation de la qualité de service et un risque accru d'accidents. Elle se déclenche lorsque la demande dépasse l'offre dans ;

- Les Infrastructures Aéroportuaires : l'insuffisance des capacités aéroportuaires (pour l'atterrissage ou le décollage, la circulation au sol).
- Le contrôle aérien
 - Le nombre d'aéronefs qui peuvent être contrôlés en même temps est limité, le nombre de contrôleurs disponibles... etc.
 - L'organisation de l'espace aérien (l'espace aérien est limité)

2.2.1. Types de congestion aérienne

On distingue deux types de congestion [29]

2.2.1.1. La congestion récurrente

La congestion récurrente est une congestion répétitive dans l'espace et/ou le temps (de la journée, du mois ou de l'année). Elle exprime la notion de récurrence de la demande du transport, et plus précisément le fait que le volume de la circulation aérienne excède l'offre du système ATC pendant

des périodes, des jours ou des heures donnés liée aux déplacements dus aux activités habituelles de la société (étude, travail, congés, loisirs, pèlerinage...) ce qui engendre "des heures de pointe". Son traitement nécessite des améliorations opérationnelles et des mesures agissant essentiellement sur la demande.

2.2.1.2. La congestion non récurrente

La congestion non récurrente (appelé aussi la congestion incidente) est due aux phénomènes aléatoires ou événementiels, et est causée localement par un accident, la météo, les activités militaires, événements exceptionnels, événements sportif (coupe du monde de football, Jeux Olympique)...etc. Elle peut se produire à toute heure du jour, mais elle est particulièrement pénalisante lorsqu'elle s'ajoute à la congestion récurrente. Elle est mieux maîtrisée par des améliorations opérationnelles en temps réel (stratégies de la gestion des incidents).

2.2.2. Les causes de la congestion aérienne

La congestion aérienne met principalement en cause l'insuffisance de la capacité du contrôle aérien. D'après un recensement des origines des retards, fait par les compagnies aériennes, la navigation aérienne est responsable d'environ 35 % des retards; c'est à la capacité du contrôle aérien, service qui assure la sécurité des vol, qu'incombe une grande majorité de ces retards, soit 68 % [27]. Si trop de vols demandent à être contrôlés, dans un espace restreint sur une période de temps réduite, par rapport à la capacité du contrôle, les services du contrôle aérien lancent une procédure qui limite le nombre de vols dans cet espace à cette période. Certains vols sont alors retardés.

C'est donc environ un quart des vols qui sont en retard du fait de la capacité du contrôle aérien [27]. Mais des difficultés liées à la capacité ne mettent pas en jeu uniquement l'offre de services. Si ces problèmes de congestion surviennent, c'est effectivement que l'offre est insuffisante, mais cela signifie aussi que la demande est trop importante. Les compagnies

qui dénoncent les services du contrôle aérien contribuent de façon indirecte à une forte dégradation du service qu'elles offrent à leurs clients du fait de leurs stratégies commerciales. Il est reproché aux grandes compagnies de contribuer aux problèmes d'encombrement de l'espace aérien en programmant plus de vols aux heures de pointe qu'il n'est possible aux services de contrôle aérien d'en surveiller. [30-31-32]

2.2.2.1. Les facteurs de capacité [33-34-35]

La capacité d'un centre de contrôle se mesure par son aptitude à écouler le trafic aérien avec une sécurité maximale et dans des conditions optimales de régularité. Pour l'espace aérien, c'est le nombre maximum de vols qui peuvent être contrôlés et donc pénétrer dans cet espace en une heure. Sa valeur dépend de plusieurs paramètres tels que le type de trafic à écouler (IFR, VFR, en évolution ou stable...), le personnel (nombre d'effectif, qualification...), l'organisation (procédures, les structures de route, sectorisation...), disponibilité et types des moyens techniques (radar, communication, calculateurs, simulateur....), les conditions Météo....etc.

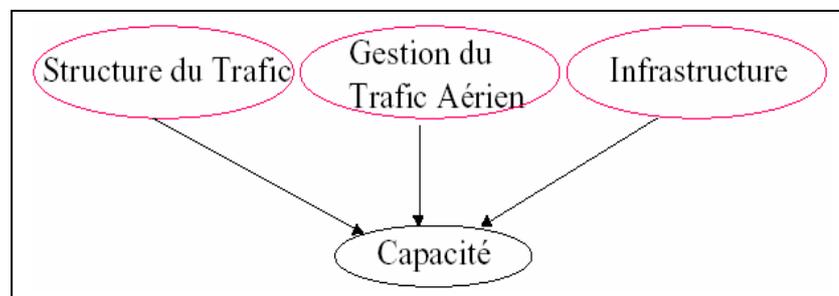


Figure.2.1. Les facteurs de capacité.

Les facteurs qui entre en ligne de compte pour la détermination de la capacité sont :

2.2.2.1.1. Structure de Trafic

- Type d'Aviation : Commerciale, générale, d'affaires, ...
- Régime de vol: IFR (instrument flight rules), VFR(visual flight rules)
- Pourcentage des arrivées et des départs : La densité du trafic aérien

2.2.2.1.2. Gestion du Trafic aérien

- Type d'équipements à disposition des contrôleurs : HF, VHF, VOR, DME, NDB, ILS, Radar...
- Service fournie par les organes ATC : Contrôle radar, contrôle aux procédures « classique », suggestions, information de vol seulement...
- Règles générales : Un seul aéronef sur la piste.
- Règles de séparations pour la turbulence de sillage.
- Règles de priorités à l'atterrissage
- Qualité du Contrôle : Qualification, nombre et expérience des contrôleurs, systèmes automatiques d'aides à la décision, Séquencement des arrivées et des départs, Contrôle et guidage des mouvements au sol...

2.2.2.1.3. Infrastructure

- Stratégie de gestion du système de piste(s) : Piste unique, doublet de pistes parallèles (rapprochées, éloignées), doublet de pistes sécantes, plus de deux pistes...
- Réseau de voies de circulation : Les dispositifs d'entrée et de sortie de piste (rapide), taxiways entre pistes et de liaison aux installations terminales.
- Aires de Stationnement : La configuration des postes de stationnement pour les entrées et les sorties des aéronefs indépendantes les unes des autres, réserve d'espace pour postes supplémentaires et matériel d'escale.

2.2.2.1.4. D'autres facteurs sont fortement limitatifs

- Les problèmes environnementaux. Ecologie et gestion des nuisances sonores (interdiction de survol) ;
- Les politiques douanières et policières (anti-terrorisme notamment)
- Conditions météorologiques. Visibilité, Vent (sens du mouvement, dispersion des turbulences, cisaillement), les phénomènes météorologiques dangereux (brouillard, grêle, orages, neige...).

2.2.2.2. Les causes de manque de capacité [36-37-38-39-40-41]

Le facteur qui limite l'accroissement de la capacité tient d'abord à la saturation des capacités de contrôle de la navigation aérienne, notamment dans certaines régions du monde telles que l'Europe et les Etats Unis d'Amérique. Parmi les raisons conduisant à cette limitation, nous citons :

- Le volume de l'espace aérien théoriquement disponible qui se trouve réduit par un partage souvent inadéquat entre les utilisateurs civils et militaires ;
- Le manque de coordination entre les civils et les militaires ;
- Les limitations de capacité de contrôle peuvent provenir du fait que les positions des aéronefs en temps réel et celles prévues ne sont pas connues avec précision des équipes de contrôle au sol (absence de système de surveillance Radar ou même insuffisance d'installations au sol des aides à la navigation "VOR, DME, ILS..."ou par manque d'équipements de communication "utilisation d'HF et absence de couverture VHF suffisante", ce qui impose des marges de "sécurité" minimums de séparation "plus importantes :par exemple en route, pour deux aéronefs qui sont établis sur la même route et au même niveau, un espacement de 10 minutes (environ 80NM) est exigée avec une couverture VHF, et de 40 NM en utilisant un DME sur leurs route. Si on utilise un Radar secondaire, ce minimum est de 10 NM , ce qui permet de multiplier par 8 le nombre de trafic admis sur la même route au même niveau en passant ainsi du contrôle "procédurale" "séparation en temps ou en distance" au contrôle Radar "séparation Radar". Ce minimum peut, dans certaines conditions, être réduit.
- L'organisation du contrôle et du réseau de route ne facilite pas la fluidité du trafic : en effet, les aéronefs doivent suivre des routes aériennes qui existent grâce à des balises au sol. Ce système a l'avantage de permettre de bien connaître la position des aéronefs, mais, il crée d'importants problèmes de congestion.
- La gestion de l'espace aérien s'effectue par secteur de contrôle, qui coïncide le plus souvent avec les frontières des Etats. En revanche, la séparation

au niveau des frontières est susceptible d'être source d'inefficacité, puisqu'elle ne tient pas compte des flux de trafic, autrement dit le tracé des routes aériennes demeure encore très national. D'autre part cette coexistence de ciels nationaux se caractérise par l'utilisation d'équipements et de procédures en matière de régulation aérienne, qui peuvent varier d'un pays à l'autre. Cette mauvaise structuration du ciel est aujourd'hui mise en évidence, puisque désormais, cette gestion nationale de l'espace aérien se montre incapable de faire face à la croissance du trafic aérien civil et apparaît comme une des causes principales du problème de congestion.

- Limite de capacité d'infrastructure : a ces limitations de capacités de contrôle s'ajoutent les limites de la capacité d'accueil des aéroports, sans doute encore plus difficile à surmonter, vu les investissements importants que cela nécessite, en effet une piste d'aéroport est l'aboutissement (ou le départ) d'un entonnoir dans lequel le trafic vient se concentrer et voit ainsi son débit limité inévitablement par le nombre de pistes disponibles, sachant que pas plus d'un avion à la fois ne peut décoller ou atterrir d'une piste, le débit maximum ne pourrait excéder 40 mouvements par heure pour une même piste. A l'aéroport d'Alger (Houari Boumediene, DAAG), pour la piste 23 (équipé ILS) et pour une procédure d'attente sur "OA", la séquence théorique est de 6 minutes (c'est la séquence la plus courte en Algérie) ce qui permet d'avoir un maximum de 10 mouvements (en atterrissage) par heure, qui semble suffisant, mais en tout état de cause, on peut saturer l'attente à Alger.
- Les opérations au sol sont caractérisées par une grande diversité des imprévus. Le nombre d'intervenants non coordonnés, la nécessité d'entretien et de contrôle régulier des infrastructures et des avions, la gestion des passagers et de leurs bagages sont autant d'éléments qui rendent difficile la planification et demandent une réactivité maximale en temps réel.
- Les impératifs de la régulation du trafic sont de plus en plus contraignants pour l'aéroport : les créneaux imposés sont des heures de décollage et non de départ du parking (justement parce que les temps de roulage

sont trop imprécis). Leurs respects sont donc à la seule charge du contrôle d'aérodrome, pour lequel ces contraintes peuvent parfois devenir ingérables.

- La nature et la répartition du trafic sont également des facteurs de première importance:
 - La classification de l'aérodrome détermine la nature des vols autorisés, en fonction de leur catégorie, vitesse d'approche et de leurs natures (commercial, court ou long courrier ...), ce qui fixe indirectement l'ordre de grandeur de la capacité de l'aérodrome.
 - La configuration de l'aérodrome détermine le taux de fréquentation de chaque catégorie d'aéronef 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 des capacités des pistes.
 - Enfin, les procédures d'exploitation des parkings et des voies de circulation (qui doivent être conformes aux règles de circulation), peuvent s'avérer plus ou moins efficaces en terme de retards générés. Sur ce point, la compétence technique des contrôleurs et des équipages (connaissance de la plateforme et de l'aéronef) peuvent jouer un rôle considérable.
- La stratégie des compagnies est aussi à l'origine de la congestion : les compagnies élargissent et augmentent leur réseau dans le but de conquérir ou de conserver des parts de marché, la multiplication des plates-formes de correspondances (hubs) provoque des concentrations d'aéronefs contribuant à une hausse de la densité du trafic aux heures de pointes. (Cette situation est celle de la plupart des pays européens, et des pays du golf).
- La capacité des ressources humaines assurant le contrôle dans les airs ou dans les aérodromes est un élément fondamental dans la maîtrise de la capacité, effectivement une équipe de contrôle ne peut pas gérer simultanément plus qu'un nombre limité d'aéronefs, ce qui conduit à diviser l'espace en morceaux de plus en plus petits -les secteurs- au fur et à mesure que la densité de trafic augmente, et/ou à limiter la capacité si le nombre requis d'équipes de contrôle n'est pas disponibles.
- L'impact de l'ATFCM : elle a un impact positif aussi bien sur la sécurité en empêchant des surcharges, que sur la capacité moyenne déclarée

en éliminant le risque des pics de trafic inattendu. Cependant, l'ATFCM peut avoir un effet très négatif sur l'utilisation de piste en ralentissant généralement les écoulements pénétrant le système. Considérant les facteurs d'une demande régissante d'incertitude décrite ci-dessus, les vols limiteurs en les ralentissant vers le bas au début d'une période de pointe contribueront plus tard à la congestion d'aérodrome.

- Limitations du système ATM actuel. Les concepts et les systèmes actuels d'ATM présentent un certain nombre de faiblesses qui tiennent notamment aux facteurs suivants :
 - Disparité des services et des procédures résultant de l'exploitation de systèmes de conception différente, et automatisation limitée des outils dont dispose le contrôleur;
 - Recours, pour les échanges air-sol, à des communications vocales par radio proches de la saturation (parfois même saturé);
 - Rigidité des divisions de l'espace aérien et des structures de route, qui reposent souvent sur des besoins nationaux et n'exploitent pas de manière optimale l'intégralité des moyens ATM disponibles;
 - Absence de planification concertée et limitation des moyens d'échange d'informations en temps réel entre l'ATM, les autorités aéroportuaires et les usagers de l'espace aérien, ainsi qu'entre les civils et les militaires, ce qui se traduit par un manque de souplesse dans les réponses aux événements en temps réel et à l'évolution des besoins opérationnels des usagers ainsi qu'une sous-utilisation des capacités disponibles;
 - Incapacité d'exploiter pleinement le potentiel qu'offrent les équipements électroniques de bord en termes d'amélioration des performances;
 - Grave pénurie de contrôleurs aériens dans un certain nombre d'États, due à des contraintes financières nationales et à l'absence de données de planification validées à l'échelon du réseau ATM;
 - Longueur des délais nécessaires à la mise au point de systèmes améliorés et à leur déploiement à bord des aéronefs ou au sol, ce qui complique la planification de la transition et entraîne des coûts élevés. Cette situation est aggravée par les retards enregistrés dans bon nombre de projets ATM.

- La météo : Lorsque les conditions de visibilité sont dégradées, la circulation aérienne peut rapidement être paralysée. Même lorsque le contrôle dispose d'une visualisation radar de la situation, la réglementation actuelle ne prévoit pas le guidage précis d'un aéronef par le contrôle, car la responsabilité du pilote (pour l'anti-collision) n'est pas remise en cause. Ces situations (dangereuses) nécessitent donc souvent des pratiques opérationnelles à la limite de la réglementation, où la responsabilité de chacun n'est plus clairement spécifiée.
- 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.
- l'incertitude de la demande :
 - Les Vols : La demande est déterminée par des programmes et des plans de vol déposés. Seulement 80% de la demande du trafic, dans l'ensemble, est connu le jour avant que les vols aient lieu. Pour un aéroport coordonné⁴, où il y a seulement du trafic commercial, plus de 95% de vols sont connus un jour avant. Certains des vols annulés ou supplémentaires, vols d'affaires... etc ne sont pas encore connus.
 - Heure de Décollage. Un degré significatif d'incertitude concernant l'heure de décollage dus aux compagnies aériennes ou aux problèmes techniques affectant l'aéronef, l'embarquement de passagers, chargement du fret...etc., les retards imposés par l'ATFCM, et la fenêtre du créneau de cette dernière (l'heure de décollage doit avoir lieu dans un délai de -5 minutes et +10 minutes du temps autorisé).
 - Temps de vol : Un autre facteur incertain est le temps de vol, qui dépend des compagnies aériennes, des conditions météorologiques, des mesures de temps réel d'ATC (vol direct, niveau de vol) et des procédures de départ

⁴ Sur un aéroport où la demande de trafic excède la capacité pendant une certaine période de la journée un processus attribuant, suivant certaines règles, aux compagnies aériennes des créneaux horaires, des heures prévues de décollage ou d'atterrissage, peut être mis en place sur la base d'une capacité limitée. L'aéroport est alors dit coordonné

ou d'arrivée standardisées « SID »/« STAR » par rapport à la piste en service.

2.2.3. L'impact de la congestion aérienne

La congestion aérienne se manifeste, aujourd'hui, principalement par des retards, mais elle risque, à plus long terme, de poser des problèmes de sécurité. Elle augmente les risques d'accident, réduit la mobilité et ralentie l'évolution économique. Elle est aussi une cause majeure des émissions polluantes (contribution de 2.5% du total des émissions polluantes), et compte tenu de la croissance du transport aérien, les prévisions à l'horizon 2050 porteraient la part de l'aérien à 3%. [42]

2.2.3.1. L'effet économique

- L'augmentation des retards entraîne une baisse de la productivité, et donc des pertes potentielles qui peuvent se chiffrer, au niveau mondial, par des milliards de dollars.

2.2.3.2. L'effet environnemental

- Le surcroît de la consommation d'énergie implique l'augmentation des émissions polluantes
- La nuisance sonore.

2.2.3.3. D'autres effets potentiels

- Manque de sécurité et risque d'accidents.

2.3. Les solutions envisagées pour la décongestion de l'espace aérien [2-35-43-44]

L'accroissement continu de la demande du trafic aérien ces dernières années non assortie avec celle de la capacité du système (ATC), a engendré des problèmes de congestion. Les services ATS chargés du contrôle de la circulation aérienne ont dû trouver des solutions pour faire face à cette augmentation. En fait la congestion se traduit par une inadéquation entre l'offre (capacité du système de contrôle) et la demande (la demande du trafic aérien),

on peut ainsi résoudre le problème en agissant sur l'une ou l'autre, voir les deux en même temps. La voie la plus naturelle pour résoudre ce problème pourrait être l'augmentation de la capacité du système de contrôle, considéré comme étant la plus limitative dans l'écoulement du trafic. Cependant, le problème de la congestion s'explique par une inadéquation entre l'offre et la demande, on peut aussi tenter d'adapter le trafic aux ressources disponibles en régulant ce dernier, en changeant les cheminement des aéronefs (rérouting) ou en appliquant des contraintes tarifaires par l'augmentation des redevances de route ou d'atterrissage aux heures de pointe pour les secteurs ou aérodrômes saturés.

2.3.1. Première approche pour la décongestion aérienne: Augmentation de la capacité du système de contrôle

La capacité du système de contrôle pourrait être améliorée en apportant des solutions d'ordre opérationnelles et/ou techniques.

Sur le plan opérationnel, les secteurs de contrôle peuvent être restructurés pour optimiser les flux de trafic, le réseau de route peut être réajusté pour diminuer le nombre de conflits potentiels et améliorer l'écoulement du flux aérien, les périodes de travail des contrôleurs peuvent être réorganisées afin d'offrir une capacité maximale lors de forte demande, une gestion globale des flux de trafic peut encor être améliorée.

Sur le plan technique, l'introduction de nouveaux outils et systèmes (comme le RADAR, l'MLS, ADS-B, la multilatération, outils d'aide à la décision ...) de plus en plus performants peuvent accroître la capacité du contrôle aérien et améliorer en même temps la gestion des flux de trafic.

2.3.1.1. Les solutions pour accroître la capacité au niveau des aérodrômes et de l'espace environnent [26-29-32-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-54-55]

Les contraintes de capacité varient considérablement d'un aérodrôme à un autre. Bien entendu, la meilleure solution serait d'augmenter la capacité aéroportuaire en construisant ou en agrandissant des aérodrômes, des pistes

et des aéroports, mais cette solution n'est pas toujours faisable. Les états doivent alors trouver des moyens de traiter efficacement et équitablement la demande excédentaire.

2.3.1.1.1. Outils économiques

En termes économiques, des mesures peuvent être considérées visant à augmenter la capacité ou à gérer la saturation. Certains Etats, dans lesquels l'insuffisance de la capacité aéroportuaire est particulièrement prononcée, appliquent une ou plusieurs mesures, en agissant tant sur l'offre que sur la demande. La tarification de pointe (faire payer plus cher les vols pendant les périodes à forte demande) est une solution envisageable lorsqu'il existe une demande trop forte, qualifiées de "*périodes de pointe*", par rapport à la capacité d'une infrastructure. Elle conduit les compagnies aériennes à étaler leurs départs de façon à lisser le trafic et réduire les encombrements.

La tarification de pointe se justifie, non seulement par un coût supérieur afin d'avoir une capacité supérieure disponible en présence d'une forte demande, mais aussi par la volonté d'opérer un certain rééquilibrage des demandes sur les différentes périodes. De ce point de vue, l'objectif d'une tarification de pointe est de déplacer la demande des périodes de pointe vers les périodes hors pointe, elle peut être utile:

- Pour assurer l'efficacité économique : une régulation par le péage permet de dissuader les déplacements à faible utilité économique durant les heures de pointe et de permettre des déplacements à forte utilité économique plus rapides durant ces heures.
- Maximisation de l'utilisation efficace des ressources disponibles. Bien que cette méthode permet d'étaler la demande, elle présente l'inconvénient de favoriser les compagnies les plus riches.

2.3.1.1.2. Nécessité de lever les couvre-feux nocturnes aux niveaux des aéroports :

La croissance des activités de transport aérien dans le monde exige constamment d'augmenter les infrastructures et la capacité des aéroports. Les efforts déployés par les états et par l'OACI n'ont donnés que des résultats limités. Augmenter la capacité aéroportuaire devient difficile en raison de la lourdeur des investissements et du manque de place. D'une part, on souffre d'une insuffisance de capacité due à l'augmentation de la demande, de l'autre, on n'utilise pas pleinement la capacité disponible en raison des couvre-feux imposés la nuit. Le secteur de transport aérien ne permet pas de tels luxes. Le recours actuel aux couvre-feux nocturnes dans divers aéroports du monde a en outre des effets négatifs sur la capacité de traitement de la circulation aérienne et sur les infrastructures des autres aéroports.

Il est clair qu'il faut trouver d'autres moyens plus simples pour accroître la capacité des aéroports et remédier à la situation créée par des volumes de trafic croissants. Une des possibilités est de réexaminer la nécessité de maintenir les couvre-feux nocturnes aux aéroports, de façon que les aéroports soient ouverts au trafic 24 heures sur 24. Cela se traduirait aussi par une utilisation optimale des secteurs de contrôle en route et des infrastructures d'autres aéroports que les couvre-feux nocturnes imposés ailleurs pénalisent indirectement.

2.3.1.1.3. 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 :

- 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.

- 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. Là encore, la recherche d'un séquençage optimal 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.
- Réduction des normes de séparation : Certaines conditions météorologiques particulières entraînent des baisses considérables des capacités aéroportuaires, notamment parce qu'on guide les avions jusqu'à l'atterrissage, ce qui nécessite 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, ce qui permet de réduire les normes de séparation.
 - 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.

- Amélioration de la prévisibilité du trafic aéroportuaire : L'aérodrome apparaît comme l'endroit où le trafic aérien est le moins prévisible. L'enchaînement des actions pendant l'escale d'un aéronef 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'aéronefs 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'aérodrome et d'approche, mais également entre chaque intervenant sur un même aérodrome.
- Améliorer la Coordination entre les aérodromes : L'échange d'informations de trafic entre différents aérodromes coordonnés est encore relativement faible. La connaissance des retards prévus sur un aérodrome permet pourtant d'optimiser la gestion des vols de tous les aérodromes qui lui sont connectés. Dans ce cadre, des systèmes (AMAN : *Arrival Manager* et DMAN : *Departure Manager*), mis à jour en temps réel, ont été développés pour permettre d'informer les aérodromes coordonnés des évolutions du trafic.
- Amélioration des systèmes de surveillance et de guidage au sol (ASMGCS) : Les premiers concepts SMGCS (Surface Movement Guidance and Control System) introduits par l'OACI 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 aérodromes. Ces concepts fixent un ensemble d'objectifs pour les futurs systèmes de surveillance et de guidage des aéronefs au sol :
- La sécurité doit être améliorée 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 aéronefs. 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 et en vol 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'aérodrome « tout-temps », au sein duquel les aéronefs 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 aéronefs, peuvent participer à leur séquençage dans les zones de parking et sur les bretelles d'accès à la piste. (L'aérodrome d'Alger Houari Boumediene est équipé d'un Radar de surveillance de surface 2008)
 - ❖ Le Data Link (transmission automatique de certaines données entre le contrôle et l'aéronef) peut également jouer un rôle en simplifiant la tâche des contrôleurs et en rendant plus disponible la fréquence de communication radio.

2.3.1.2. Solutions pour accroître la capacité de l'espace en route

2.3.1.2.1. Améliorer l'organisation et la gestion de l'espace aérien

- L'organisation de l'espace aérien doit se baser sur le principe de volumes contigus d'espace aérien conçus d'après des critères de performance opérationnels, indépendants des contraintes liées aux frontières nationales, d'où une liberté maximale pour tous les usagers de l'espace aérien, compatible avec le niveau requis de sécurité et de capacité tout en tenant dûment compte des besoins des états en termes de sûreté et de défense.
- Une optimisation de l'organisation de l'espace aérien doit se faire de façon que tous les usagers disposent d'une liberté de mouvement : La simplification passera par une harmonisation de la classification OACI des espaces aériens ATS. Cette simplification sera profitable à la sécurité, les configurations d'espace aérien étant moins complexes, et servira de base à l'adoption de règles et procédures communes et sans ambiguïté pour les vols tant IFR que VFR.
- La mise en oeuvre du concept d'utilisation flexible de l'espace aérien indépendamment des frontières nationales, débouchera sur des processus de planification et de gestion de l'espace aérien menés en collaboration entre les civils et les militaires. L'utilisation dynamique des espaces aériens doit permettre le gain en terme d'espace aérien exploitable pour les civils et les militaires.
- Optimisation du réseau de routes par l'amélioration du réseau actuel de routes fixes, dans l'optique de mieux tirer parti de la flexibilité accrue qu'offrent le concept FUA (Concept d'utilisation flexible de l'espace aérien) et l'exploitation des techniques (RVSM, RNAV...) permettant de concevoir des structures de route et d'éviter les concentrations d'aéronefs en des points encombrés. Dans l'ensemble, les vols pourront emprunter des routes plus directes, offrant un meilleur rendement sur le plan de la consommation, et de recourir à des itinéraires de contournement pour éviter les zones de forte densité de trafic aérien.
- Optimisation de la conception des secteurs ATC : Lorsque la densité du trafic le permet, les divisions rigides de l'espace aérien disparaîtront progressivement au profit d'une formule d'allocation plus souple. L'objectif est

d'augmenter la capacité en passant à une structure tout à fait souple de l'espace aérien, dans laquelle les limites de secteur seront adaptées en temps réel aux courants de trafic particuliers et aux pointes de la demande, et deviendront indépendantes des frontières nationales. aussi l'application initiale du RVSM augmentera la capacité des secteurs.

- Optimisation de l'espace aérien en régions terminales (TMA) : La reconfiguration et l'optimisation des routes d'arrivée et de départ (STAR et SID) qui servent à structurer les courants de trafic aux abords des aéroports les plus chargés vont contribuer à renforcer la capacité de l'espace aérien dans les régions de contrôle terminales (TMA) et pourraient augmenter le débit de certains aéroports. La mise en œuvre de cet objectif passera par l'amélioration des performances des aéronefs, qui débouchera, à long terme, sur l'objectif ultime qu'est la RNAV 4D dans l'espace aérien des TMA.
- Principe d'un continuum d'Espace Aérien : Pour l'accroissement de la capacité, l'espace aérien international peut être considéré comme un continuum dégagé des contraintes qu'imposent les frontières. La planification, la structure opérationnelle, la gestion et l'exploitation de l'espace aérien doivent refléter ce principe et être mis en œuvre de manière cohérente en vue de :
 - Offrir une capacité suffisante pour absorber la demande de tous les usagers, à tout moment dans de bonnes conditions d'efficacité et de rendement, et aux périodes de forte charge, sans imposer (en conditions normales) de pénalisations notables sur les plans opérationnel et économique.
 - Permettre aux aéroports d'exploiter au mieux la capacité potentielle, telle qu'elle résulte de l'infrastructure en place, des restrictions d'ordre politique et écologique et de l'utilisation économique des ressources.

2.3.1.2.2. Organisation stratégique et meilleure prévisibilité

L'augmentation de la capacité (et également de la sécurité) découlera principalement de la mise en place de moyens organisationnels tels que l'élimination stratégique des conflits ou le lissage des flux de trafic, ce qui repose sur une amélioration de l'échange de données entre les unités au sol et l'utilisation d'assistance informatique et d'autres développements techniques, ainsi que l'exploitation de données de trajectoire de vol plus précises.

2.3.1.2.3. Les concepts de free route et free flight : l'automatisation du contrôle aérien et de l'aéronef

Dans le domaine de la gestion du trafic aérien, les concepts en vogue de «Free-Route» et de «Free-Flight» espèrent répondre aux problèmes de «congestion» de l'espace aérien. En Europe, le Free-Flight a été envisagé dans le but d'alléger la charge de travail du contrôleur en s'affranchissant d'un contrôle centralisé au profit d'un contrôle embarqué, tout en utilisant des routes directes. La vision du Free-Flight ouvre la perspective d'un nouveau système où les aéronefs en croisière ne sont plus contrôlés depuis le sol, mais résolvent eux-mêmes les éventuels conflits qu'ils peuvent rencontrer avec d'autres aéronefs. En effet dans le système actuel, ce sont les contrôleurs aériens qui assurent cette fonction, le pilote étant maître de sa manœuvre mais devant se conformer aux instructions du contrôle.

➤ L'automatisation dans l'aéronef

Les progrès technologiques en matière de circulation de l'information permettent d'envisager des liaisons de données permanentes entre le sol et l'aéronef. De plus les automatismes de l'aéronef aident le pilote lors des différentes phases de vol (montée, en route et descente), dans des conditions météorologiques très dégradées. Il reste encore quelques progrès à faire dans le domaine pour arriver au tout automatique jusqu'à l'arrêt devant l'aérogare. Mais pilotage automatique et liaisons sol-bord performantes autorisent à penser que l'on pourrait voir un jour un système de transport aérien entièrement commandé par les organismes au sol, qui déterminerait les trajectoires à suivre

par les pilotes automatiques. D'éventuels pilotes humains ne seraient là que pour surveiller le bon fonctionnement des automatismes, comme c'est déjà souvent le cas actuellement.

➤ L'automatisation des systèmes de contrôle aérien

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 les collisions au sol. Sa raison d'être est avant tout la sécurité. L'automatisation du contrôle consiste à transférer à un système (totalement ou partiellement) des tâches effectuées jusqu'à présent par un opérateur humain. Tant que l'automatisation n'est pas totale, l'opérateur garde un rôle et on parlera d'assistance automatisée. L'automatisation de l'ATC peut améliorer les performances dans trois domaines :

- La sécurité : en éliminant les erreurs humaines ou en diminuant leur impact, par une meilleure information, des filets de sauvegarde et une certaine supervision de l'homme par la machine (75% des accidents sont dus à des erreurs humaines) ;
- La capacité : en utilisant la machine comme collaborateur de l'homme ;
- L'efficacité de la gestion du trafic en réduisant les restrictions imposées aux aéronefs (routes directes, niveaux optimaux,...), par exemple qu'un système totalement « FREE-ROUTE » permettant d'économiser 10% sur le coût du carburant.

2.3.1.2.4. Utilisation des futurs concepts opérationnels de navigation

Les futurs concepts opérationnels de navigation sont la navigation de surface (RNAV) et les performances de navigation requise (RNP) soutenues par un système global de navigation par satellite (GNSS).

➤ La Navigation de surface (RNAV)

Méthode de navigation permettant le vol sur n'importe quelle trajectoire voulue dans les limites de la couverture des aides à la navigation à référence sur station au sol, ou dans les limites des possibilités d'une aide autonome ou grâce à une combinaison de ces deux moyens. Le RNAV autorise le vol dans n'importe quel espace aérien et sur n'importe quelle trajectoire à l'intérieur de tolérances de précision prescrites, sans qu'il soit nécessaire de survoler directement les installations de navigation basées au sol (VOR, NDB...). L'aéronef et les points tournants de sa route sont alors localisés par leurs coordonnées géographiques (Localisation par satellite ou par station inertielle ou localisation combinée).

➤ Précision de navigation requise (RNP)

Le concept RNP définit la qualité de navigation minimale à l'intérieur d'une route RNAV, et elle qualifie à la fois cette route et les aéronefs admis dans cet espace aérien. Elle le caractérise au moyen de l'expression d'une précision de navigation (le type de RNP) à respecter à l'intérieur de cet espace. Le type de RNP est lié au niveau de performance des équipements de bord des aéronefs. Exemple : Les aéronefs capables de rester au moins *95% du temps de vol à moins de 5NM* de la route nominale prévue respectent une *RNP5*.

➤ Le Système Global de Navigation par Satellite (GNSS)

Le concept GNSS (Global Navigation Satellite System) regroupe les différents systèmes de positionnement par satellite de base (GPS, GLONASS, GALILEO ...). Un récepteur à bord de l'aéronef capte les signaux d'au moins quatre satellites synchrones (Horloges atomiques), un calculateur traite les différents signaux et détermine la position de l'aéronef.

➤ La Réduction du Minimum de Séparation Verticale (RVSM)

Le trafic aérien est en constante croissance sur le plan mondial. Les systèmes ATM devront évoluer afin de pouvoir absorber cet accroissement continu du trafic. De toutes les mesures actuellement mise en œuvre et normalisé

par l'OACI, le RVSM a été jugée la plus rentable pour répondre à ce besoin, grâce à la mise à disposition de six niveaux de vol supplémentaires utilisables dans la bande d'espace aérien comprise entre les FL 290 et FL 410 inclus. La mise en œuvre du RVSM apporte principalement, les avantages suivants :

- Des profils de route optimisés : La mise à disposition de niveaux de vol supplémentaires, dans la bande d'altitude la plus fréquentée, permet aux exploitants de planifier leurs vols et de les faire évoluer suivant le profil de route vertical optimal pour un type de vol donné, ou au plus près de ce profil. ainsi des économies de carburant pourront être réalisés (suivant des études effectuées en Europe, les économies réalisables ont été estimées entre 0,5% et 1% de la consommation totale du carburant, ce qui correspond à une économie globale de 155 millions d'euros sur la période de 20 ans suivant la mise en œuvre du RVSM.
- Augmentation de la capacité ATC : Une série de simulation ATC en temps réel, effectuée au centre expérimental d'EUROCONTROL (CEE) de Brétigny, en France, a montré que le RVSM permettra de réduire la charge de travail des contrôleurs. Il ressort de ces simulations que la capacité des secteurs concernés pourra augmenter de 20% par rapport à celle d'un environnement avec minimum de séparation verticale conventionnel (CVSM). Par ailleurs, il est possible d'accroître encore la capacité en modifiant la structure de l'espace aérien grâce, par exemple, à une nouvelle sectorisation et/ou à l'introduction de secteurs supplémentaires. Pour cela les aéronefs doivent être homologués RVSM et avoir des équipements (détermination de l'altitude et de la position) plus précis. En Algérie l'RVSM a été implémentée au nord de la FIR Alger le 25/10/2007 et pour le reste de la FIR (secteur sud-sud) le 25/09/2008 (ainsi que toute la région AFI).

2.3.1.2.6. Utilisation de nouvelle technologie de communications

En raison d'une augmentation des besoins en communications aéronautiques et de la pénurie de fréquences que les revendications du spectre aéronautique provenant d'intérêts non aéronautiques risquent de causer, l'utilisation efficace du spectre aéronautique par les systèmes de communications

devient un aspect de plus en plus critique de la planification de la navigation aérienne.

Au cours de la dernière décennie, l'OACI a pris en compte, un certain nombre de nouvelles techniques de communications air-sol et air-air, certaines numériques (liaison de données HF, liaison numérique VHF, VDL mode 2, mode 3 et mode 4, SSR mode S et CPDLC, ACARS), d'autres analogiques (espacement de 8,33 kHz des canaux). La mise en œuvre de certaines de ces techniques est en cours et contribue à l'augmentation de l'ensemble des besoins concernant le spectre aéronautique, tandis que les systèmes de communications vocales air-sol classiques continuent à fonctionner, constituant encore le moyen principal pour les communications opérationnelles. Les communications vocales entre pilotes et contrôleurs de la circulation aérienne iront de pair avec la transmission de messages textuels d'écran à écran grâce au système dénommé CPDLC (communications contrôleur-pilote par liaison de données). Ce système (utilisé au CCR d'Alger) doit informatiser une part sans cesse croissante des communications air-sol effectuées chaque jour, ce qui allégera la charge de travail aux deux bouts de la chaîne et libérera, au profit de communications plus urgentes, des canaux radio déjà très encombrés.

➤ Utilisation de Two-Way Data-link ATC Communications en route: TWDL

- Congestion des fréquences. Le canal VHF est saturé physiquement, on ne peut utiliser qu'une communication à la fois. De plus, il y a une relation importante entre la charge de travail des contrôleurs (et donc de la capacité du traitement de trafic) et le volume de communications nécessaire à l'accomplissement de sa tâche. La contrainte est au départ davantage d'ordre technique que relatif à la capacité de traitement du contrôleur, mais par suite du séquençage non optimisé des échanges, le contrôleur est occupé par des tâches qui ralentissent le traitement des flux de trafic.

Des tests en simulation ont prouvé que la possibilité d'utiliser à sa convenance la voix ou le Data Link même pour un nombre limité d'applications (texte libre, clairances en niveau) réduisait le nombre

de communications vocales initiées par le contrôleur de 41%. Le temps total d'occupation de la VHF vocale, lui, diminuait de 45%.

- Erreurs de communication. Outre l'aspect "saturation" et ses conséquences sur l'efficacité du contrôleur (et donc de la capacité de traitement du trafic), le canal vocal ajoute un certain taux d'erreur de compréhension entre pilote et contrôleur. En 1988, la FAA a noté que 23% des violations de séparation étaient liées à de telles erreurs. Dans un rapport d'enquête compilé par Aviation Safety Reporting System, il est indiqué que 70 à 80% des incidents potentiellement dangereux incluent un mauvais passage d'information vocal entre le contrôleur sol et le pilote, et que la plus grande part incrimine la liaison radio. Le Data-Link de ce point de vue apporte des améliorations notables :
 - Le message est adressé à un aéronef particulier (pas d'erreur d'aiguillage),
 - Le message est codé et envoyé aux aéronefs de telle manière qu'il n'y ait pas de perte ou de modification d'information,
 - Le message, s'il est composé par une procédure informatique (menus, proposition de choix de clairances...) aura nécessairement une syntaxe claire et précise (pas d'erreur d'interprétation),
 - Le message apparaîtra sur un écran ou du papier (lisibilité). Il peut être conservé en mémoire (pas de problème d'oubli).
- Les expérimentations en simulation temps-réel ont indiquées que l'utilisation du TWDL en route réduisait les délais de manière significative, en même temps qu'elle améliorait l'efficacité opérationnelle. Les gains spécifiques sont :
 - Un niveau de sécurité plus élevé observé par les contrôleurs et superviseurs sans surcharge de travail.
 - L'élimination des contraintes d'espacement prévues pour éviter la saturation dans un secteur de départ, ce qui a diminué les délais au décollage (temps cumulés sur une période donnée) de 62% ;

- L'augmentation de la capacité des secteurs et une meilleure efficacité dans les opérations aériennes, la durée et la distance parcourue des vols ayant été réduites de 20% ;
- Un contrôle plus efficace du trafic quand celui-ci augmentait de 10 à 40% ;

2.3.1.2.7. La gestion de l'information

Les activités, telles que la prévision de trajectoires, la mise en séquence des aéronefs et la prise de décision en collaboration, exigent que toutes les parties : les services d'information aéronautique (AIS) et les services de météorologie aéronautique (MET), les services de la navigation aérienne..., disposent d'informations identiques précises sur l'environnement et les règles d'exploitation, et la disponibilité, en temps voulu, de données précises et de haute intégrité. Les services d'information aéronautique devront être améliorés et développés afin de fournir un service harmonisé et coordonné qui livrera des informations actualisées de qualité pour toutes les phases de vol et pour tous les usagers.

2.3.1.2.8. Améliorer la coordination civile- militaire

La croissance continue du trafic aérien et la lutte contre les retards ont fait de l'amélioration de la coordination civile-militaire une des priorités de la navigation aérienne. Grâce au concept d'utilisation souple de l'espace aérien, les autorités civiles et militaires sont en mesure d'améliorer la coordination de leur circulation aérienne. Avec un double objectif : permettre aux services de la navigation aérienne de mieux écouler un trafic en croissance continue tout en préservant les activités militaires.

L'exemple de l'Europe: Le concept d'utilisation souple de l'espace aérien (adopté par la CEAC en 1994) fournit aux autorités civiles et militaires un cadre de gestion commune de l'espace aérien. Il se décline en trois niveaux de coordination: stratégique, pré-tactique et tactique (ou temps réel). Au niveau stratégique, les autorités civiles et militaires, réunies au sein d'un directoire, définissent les structures d'espace cogérées et fixent les procédures de négociation et les règles de priorité. Au niveau pré-tactique (à j-1), la CNGE

alloue temporairement ces structures d'espace en fonction des besoins. Enfin, le niveau tactique recouvre la coordination en temps réel entre contrôleurs civils et contrôleurs militaires.

2.3.1.3. Solutions communes: Améliorations opérationnelles

L'utilisation la plus efficace de l'espace aérien disponible et de la capacité aéroportuaire ne peut se réaliser que si tous les éléments concernés du système de la circulation aérienne ont été pris en compte au cours de la planification, au moyen d'une méthode d'analyse des systèmes. L'écoulement de la circulation est freiné par les étranglements internes au système; une limitation en un point quelconque contribue à restreindre la capacité. C'est pourquoi ni le système aéroportuaire ni le système de navigation aérienne ne doit être examiné séparément dans la planification d'améliorations.

Les améliorations opérationnelles représentent en fait les diverses étapes de réalisation du nouveau concept opérationnel d'ATM. La gestion de la circulation aérienne est constituée d'une partie sol et d'une partie air, l'une et l'autre sont nécessaires pour assurer la sécurité et l'efficacité pendant toutes les phases de vol. Le contrôle de la circulation aérienne (ATC) est l'élément principal de l'ATM. Les fonctions de l'ATM comprennent le contrôle de la circulation aérienne, la gestion des courants de trafic aérien et de la capacité (ATFCM) et la gestion de l'espace aérien (ASM). Ces trois éléments contribuent à la réalisation des objectifs d'ATM durant les différentes phases de vol.

2.3.1.3.1. Organisation et gestion de l'espace aérien OGEA

L'organisation de l'espace aérien établira des structures d'espace aérien en fonction des divers types d'activité aérienne, du volume de trafic et des différents niveaux de service.

La gestion de l'espace aérien est le processus par lequel les options d'espace aérien sont choisies et appliquées pour répondre aux besoins de la communauté ATM. Les changements sont les suivants :

- Tout l'espace aérien fera l'objet de l'ATM et sera une ressource utilisable ;
- La gestion de l'espace aérien sera dynamique et souple ;
- Toute restriction d'utilisation d'un volume donné d'espace aérien sera considérée comme temporaire ;
- Tout l'espace aérien sera géré de façon souple. Les limites d'espace aérien seront ajustées en fonction de courants de trafic ; elles ne devraient pas dépendre de frontières nationales ni d'installations.

2.3.1.3.2. Opérations d'aérodrome OA

Partie intégrante du système ATM, l'aérodrome doit fournir l'infrastructure sol requise (éclairage, voies de circulation, pistes et sorties de pistes, guidage au sol précis, etc.) pour améliorer la sécurité et maximiser la capacité quelles que soient les conditions météorologiques. Le système ATM permettra l'utilisation efficace de la capacité des infrastructures. Les changements conceptuels seront les suivants :

- Le temps d'occupation des pistes sera réduit ;
- Les aéronefs pourront se déplacer en sécurité quelles que soient les conditions météorologiques sans que la capacité de l'aérodrome ne soit affectée ;
- Un guidage au sol précis des aéronefs à destination et en provenance des pistes sera nécessaire dans toutes les conditions ;
- La position (à un niveau de précision suffisant) et l'intention de tous les véhicules et aéronefs sur les aires de mouvement seront connues et mises à la disposition des membres appropriés de la communauté ATM.

2.3.2. Deuxième approche pour la décongestion aérienne

Adapter la demande à l'offre par régulation du trafic aérien.

CHAPITRE III

DECONGESTION DES SECTEURS DE CONTROLE EN ROUTE PAR LE PROCESSUS D'ALLOCATION DES CRENEAUX AU DEPART

3.1. Introduction

Le trafic aérien a présenté pendant de nombreuses années une croissance annuelle importante, correspondant environ à un doublement tous les 10 ans. En 2005, le trafic passager du transport régulier des États contractants de l'OACI a atteint la barre des deux milliards pour la première fois. Une projection de croissance de 3,5 % par an à long terme porterait ce chiffre à plus de 2,5 milliards d'ici l'an 2015. [35]

Compte tenu des saturations actuelles, l'espace aérien ne sera plus en mesure de satisfaire la demande de trafic aérien au cours des prochaines années. Il subsiste cependant le problème des retards dus à la congestion de l'espace aérien et une pénurie chronique de capacité. Ainsi, de nombreuses solutions ont été envisagées pour parer à ce problème, notamment en cherchant à augmenter les capacités disponibles et/ou adapter le trafic à celles-ci.

Les tentatives qui visent à augmenter les capacités du système de contrôle ont été toujours contestées par des coûts souvent prohibitifs, des difficultés à insérer de nouvelles infrastructures, et des impacts sur l'environnement. Elles n'ont permis qu'une stabilisation des délais par vol au cours des dernières années. Ainsi les organismes de gestion se sont orientés vers une autre approche pour réduire la congestion en adaptant la demande aux ressources disponibles.

De plus, la demande de transport aérien est liée aux déplacements dus aux activités habituelles de la société (étude, travail, loisirs, vacances...). Elle a donc la tendance à se concentrer dans le temps et dans l'espace donnant naissance à des pointes de trafic: certains jours, certaines heures et certaines zones sont plus chargées que d'autres. Le traitement de ce type de congestion (congestion récurrente) passe par des améliorations opérationnelles mais aussi

par des mesures agissant essentiellement sur la demande : « les mesures de régulation des flux aérien » qui sont plus rapides et plus faciles à mettre en oeuvre.

3.2. Problématique de congestion des secteurs de contrôle en route [3]

L'espace aérien est découpé en briques élémentaires: les secteurs. Un secteur de contrôle est un domaine délimité de l'espace aérien (défini par une altitude plancher et des frontières latérales) qui est traversé par des routes aériennes, pour lequel une équipe de contrôleurs assure la sécurité des vols. Tous les aéronefs qui s'y trouvent sont en liaison radio avec ces contrôleurs. Les secteurs sont affiliés à un centre de contrôle (CCR), au lieu où se trouve physiquement le contrôleur. Plus le nombre d'aéronefs dans un secteur est important, plus la charge de contrôle induite augmente.

La sectorisation a pour but de répartir sur des positions de contrôle (qui correspondent à des fréquences) des charges de travail de valeurs comparables.

Elle permet :

- La gestion et l'accélération des courants de trafic aérien ;
- L'augmentation de la capacité de chaque secteur pour répondre à la demande du trafic aérien ;
- L'équilibrage de la capacité disponible et charge de trafic ;
- La structuration de l'espace aérien de façon simple et efficace.

Pour faire face à l'accroissement de la demande du trafic, on augmente le nombre de secteurs afin de réduire la charge de chacun deux. Mais ce découpage géographique n'est pas reproductible à l'infini, car un temps de présence minimum en fréquence des aéronefs doit être ménagé pour laisser au contrôleur le temps de régler les éventuels conflits avec une anticipation effective. D'autre part, la multiplication des secteurs augmente le nombre de coordination, ce qui accroît les risques de conflits.

Lorsque le trafic est faible, on peut regrouper deux ou plusieurs secteurs sur la même position de contrôle. Inversement, si le trafic augmente, on opère un dégroupement des secteurs précédemment groupés.

3.2.1. La capacité d'un secteur de contrôle

3.2.1.1. Définition

La capacité d'un secteur de contrôle est le nombre maximum d'aéronefs pouvant entrer dans ce secteur pendant un intervalle de temps donné (généralement une heure). Elle est sensé correspondre à la charge maximale qu'un contrôleur peut supporter. Elle varie donc en fonction de nombreux paramètres dont certains assez subjectifs comme le bon fonctionnement de tous les équipements mis à la disposition des contrôleurs, la disponibilité des routes aériennes, la qualification et le nombre de contrôleurs... etc.

3.2.1.2. Le calcul des capacités des secteurs de contrôle

Les méthodes d'estimation de la capacité ont fait l'objet de nombreux et divers travaux. Si autant d'énergie a été dépensée pour essayer de mettre au point une méthode, c'est parce que le besoin d'obtenir un chiffre précis de capacité est réel. Les raisons sont diverses mais tout aussi importantes. Rappelons tout d'abord que la capacité d'un centre de contrôle est son aptitude à écouler le trafic avec une sécurité maximale et dans de bonnes conditions de régularité. Un système ATC doit donc être conçu pour obtenir une capacité de contrôle adaptée à la demande du trafic prévue sur de longues périodes mais doit aussi être en mesure de s'adapter au mieux à la demande immédiate du trafic. Ainsi, toute planification, qu'elle soit à long ou court terme, passe par une connaissance de la capacité "d'accueil" de l'espace aérien qui peut être offerte aux usagers. D'une part, les prévisions de trafic peuvent révéler des lacunes de la capacité. Il faut alors réorganiser l'espace ou les flux pour éliminer les zones limitatives ainsi mises en évidence. Cette réorganisation doit se faire de manière coordonnée et homogène car il ne servirait à rien de disposer de plusieurs secteurs juxtaposés dont les capacités seraient très différentes. On risquerait des engorgements sur certains secteurs tandis que d'autre seraient sous-employés.

D'autre part, lorsque la demande de trafic est déjà telle qu'il risque de se produire des surcharges locales qui entraîneraient un retard dans l'acheminement du trafic à travers les secteurs, il faut envisager des mesures de régulation. La connaissance des valeurs de la capacité permet à l'organisme qui gère les flux de trafic (ATFCM) d'imposer des restrictions telles que le dispositif ne soit pas surchargé et que les usagers ne subissent pas de pénalisation excessive. On peut noter qu'il est tout aussi indispensable d'avoir une estimation précise de la demande de trafic.

Enfin, il ne faut pas oublier que si un système ATC est composé de règles et procédures universellement adoptées, de matériels toujours plus sophistiqués, il ne pourrait pas fonctionner sans les contrôleurs aériens. La capacité offerte est donc étroitement liée à l'effectif des contrôleurs disponibles et qualifiés. En fonction des normes d'armement des unités de contrôle, on calcule l'effectif nécessaire pour assurer une capacité globale donnée. Inversement, l'effectif disponible et les normes d'armement permettent de calculer le nombre de secteurs ouverts (les différentes configurations d'un centre de contrôle) et ainsi de connaître les valeurs de la capacité liés aux diverses configurations.

Remarque

En Algérie, aucune étude n'a été effectuée pour déterminer la valeur de la capacité des secteurs de contrôle. Pour notre étude, nous avons pris la valeur de 24 avions/heure (ce nombre correspond au maximum d'aéronefs utilisés dans les exercices de qualification).

3.2.2. Problème posé et solution envisagée

Chaque compagnie décide elle-même des plans de vols de ses aéronefs et utilise les routes les plus directes, ce qui conduit à la concentration de ces vols dans certaine route de l'espace aérien.

Contrôlé par un opérateur humain, il existe une limite, capacité secteur, au-delà de laquelle le contrôleur en charge du secteur ne peut plus accepter d'aéronefs, et oblige ces derniers à contourner son secteur en traversant des secteurs voisins moins chargés. On dit alors que le secteur est saturé.

En effet, lorsque le trafic ne peut être dévié, il est mis en attente en amont faisant augmenter progressivement la charge de contrôle d'autres secteurs jusqu'à ce qu'ils soient saturés. Cet état critique doit être évité car il provoque un phénomène cumulatif de surcharge sur les secteurs amonts pouvant remonter jusqu'aux aéroports de départ.

Il a donc été envisagé, afin de résoudre en partie les problèmes de surcharge des secteurs de contrôle, d'augmenter la capacité globale de l'espace aérien en réduisant la taille des secteurs. Il semble cependant que l'on soit arrivé à la limite de cette solution. En effet, en deçà d'une certaine taille, le gain d'un découpage du secteur sera annihilé par l'augmentation de la charge de travail des contrôleurs dû à la coordination avec les secteurs adjacents. D'autres solutions d'ordre opérationnel comme la définition d'autoroutes aériennes, le RVSM, la RNAV, la réduction des espacements en fréquence VHF «8.33 KHz» ...etc, ont montrées l'incapacité de prendre toute la demande des opérateurs aériens.

Ainsi, les autorités de la navigation aérienne ont dû mettre en place des mesures de régulation visant à "lisser" les pics de demande, en limitant le nombre d'aéronefs qui peuvent pénétrer dans un secteur donné pendant une durée donnée: ce mécanisme de régulation de trafic est appelé ATFCM: la gestion des flux de trafic aérien et de la capacité ou Air Traffic Flow and capacity Management (ATFCM).

Envers l'ATS, l'objectif de l'ATFCM (en anticipant les situations de dépassement des capacités) est de lisser l'écoulement du trafic aérien et de protéger les contrôleurs aériens des surcharges, et envers les AOs l'objectif étant d'aider à la planification des vols et la minimisation des surcoûts liés à la congestion.

3.2.2.1. La fonction de gestion des flux de trafic aérien et de la capacité (ATFCM)

L'ATFCM est un service complémentaire aux ATS. Il est destiné à contribuer à la sécurité, à l'ordre et à la rapidité de l'écoulement de la circulation aérienne en faisant en sorte que la capacité ATC soit utilisée au maximum

et que le volume de trafic soit compatible avec les capacités déclarées par l'autorité ATS compétente. [3] l'ATFCM cherche à assurer un écoulement sûr du trafic aérien avec trois objectifs principaux : protection des contrôleurs contre les surcharges, lissage du trafic et minimisation des conséquences de la congestion pour les compagnies aériennes.

L'expression «gestion des courants de trafic aérien et de la capacité» recouvre toutes activités relatives à l'organisation et à l'acheminement des courants de trafic aérien de façon que, tout en assurant que les vols des différents aéronefs se dérouleront de façon sûre, ordonnée et rapide, la totalité du trafic présent à un endroit donné ou dans une région donnée sera compatible avec la capacité du système ATC.

3.2.2.1.1. Le but des opérations d'ATFCM [4]

La gestion des courants de trafic aérien et de la capacité (ATFCM) a pour double objectif stratégique la protection du réseau ATM contre les surcharges et une meilleure adéquation entre les besoins des exploitants d'aéronefs, les aéroports, les capacités et le contrôle de la circulation aérienne. La mise en oeuvre de cette stratégie consistera à équilibrer la capacité et la demande, depuis la planification stratégique jusqu'à l'exécution tactique des vols, compte tenu des limites des aéroports et de l'espace aérien, d'événements inattendus ou de pointes de trafic anormales. L'ATFCM sera le moyen privilégié pour assurer la ponctualité et l'efficacité des vols, tout en gérant au mieux la capacité disponible. Les principaux objectifs sont alors:

- Assurer la sécurité des services de la circulation aérienne en évitant les dépassements de capacité horaire des unités de contrôles (secteurs, arrivées, départs sur aéroport).
- Assurer la fluidité dans l'écoulement du trafic aérien par une distribution régulière du trafic.
- Assurer une utilisation optimale de la capacité ATC disponible toute en minimisant les retards, en utilisant les espaces non encombrés pour des réacheminements (rerouteings), regroupements/dégroupements en fonction de la demande.

- Utilisation flexible de l'espace aérien.
- Assurer, dans la mesure du possible, le principe d'équité entre les vols "premier arrivé/premier servi".
- Fournir des informations aux utilisateurs ces derniers connaissent à l'avance les lieux régulés, les périodes de régulation et les raisons des retards prévus.

3.2.2.1.2. Les phases d'exécution des opérations d'ATFCM [3]

L'ATFCM, dont l'objectif est de prévenir les situations de surcharge en optimisant l'utilisation des capacités disponible du système de contrôle, s'organise en trois phases:

- La phase stratégique, qui consiste à définir un schéma général d'orientation du trafic en fonction des flux aériens.
- La phase pré-tactique (J-2), qui consiste à préparer, à partir de l'analyse statistique du trafic et la connaissance des effectifs disponibles le jour J, les mesures à prendre pour assurer le respect des capacités des secteurs.
- La phase tactique (jour J), qui consiste au suivi de la situation en temps réel de manière à prendre des mesures adaptatives afin de tenir compte des différences entre le trafic prévu et le trafic réel.

❖ La phase stratégique

Constitué d'un ensemble de mesures à long terme qui sont revues chaque année. Cette phase est un pré-requis aux phases pré-tactique et tactique, en terme d'organisation:

- définition des stratégies de régulation;
- définition des schémas d'orientation du trafic;
- définition des modalités d'utilisation des routes et itinéraires;
- participation à l'aménagement de l'espace (modification de la sectorisation)...etc;

C'est lors de cette phase que sont décrits les éléments qui permettront de mettre en oeuvre les régulations. Elle nécessite donc une parfaite connaissance des flux de trafic des centres de contrôle ainsi que des mécanismes de régulation et d'allocation de créneaux. La phase stratégique s'applique aussi pour la gestion d'événements modifiant sensiblement les caractéristiques du trafic, comme par exemple, le salon du Bourget, la coupe de monde de football, ou encor le pèlerinage. Les modifications de la demande du trafic sont alors suffisamment importantes pour nécessiter une gestion différente de certains flux de trafic. Cette phase intègre aussi l'analyse a posteriori d'événements permettant de faire évoluer le système: analyse d'incidents, de dépassement de capacité, de la répartition du trafic ... etc.

➤ Notion de scénario

Pour prévenir les saturations plusieurs possibilités peuvent être envisagés, qui consistent à modifier la trajectoire spatiale des vols de manière à leur faire éviter les secteurs les plus chargés. Etant donné que les secteurs sont des polyèdres comportant un niveau de vol minimal et un niveau de vol maximal, les actions qui permettent d'éviter un secteur sont le changement de niveau de vol (éviter un secteur en passant au dessus ou au dessous) et les reroutements (éviter un secteur en suivant une autre route aérienne).

Les « scénarios » élaborés en stratégie ont pour objectif de préparer des propositions afin de désengorger certains axes sensibles. Il existe 3 types de scénario:

- RR (Re-Routeing);
- AR (Alternative Route);
- LC (Level Capping).

Les scénarios RR proposent pour des couples [aérodrome de départ; aérodrome de destination] de nouvelles routes permettant d'éviter un secteur ou un centre de contrôle.

Les scénarios AR proposent pour des couples [aérodrome de départ; aérodrome de destination] de nouvelles routes mais avec une contrainte quantitative : pas plus de n vols par heure, ou accepte des niveaux de vols normalement interdits dans le RAD (Route Available Document).

Les scénarios LC proposent pour des couples [aérodrome de départ; aérodrome de destination] des plafonnements en niveau de certaines routes pour réduire les surcharges.

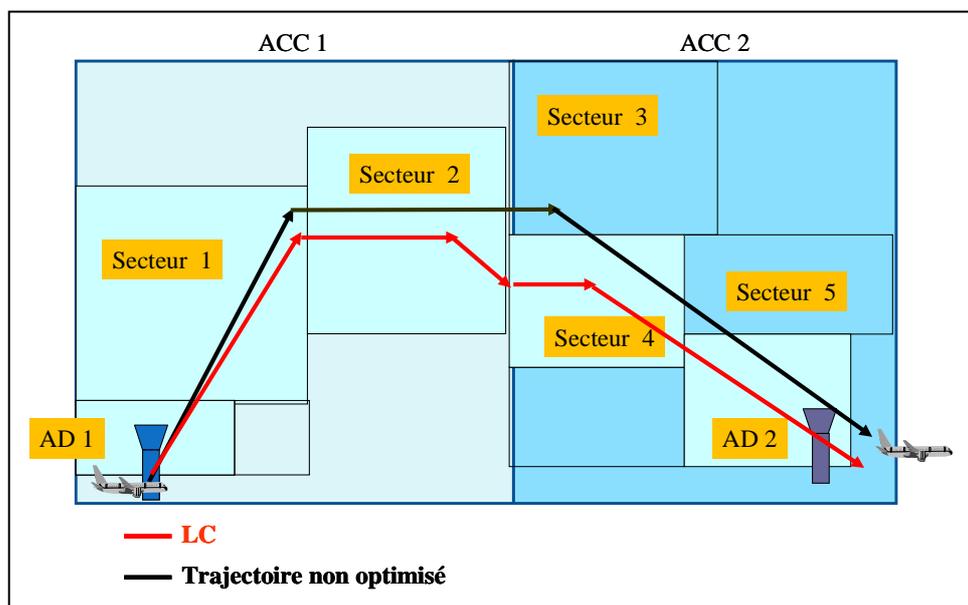


Figure 3.1. Le scénario Level Capping (LC).

❖ La phase pré-tactique

L'objectif de cette phase est de prendre des mesures préventives afin d'éviter toute surcharge de secteurs. Basée sur une analyse du trafic passé (J-7), de l'activité militaire planifiée et du nombre de secteurs ouvrables (effectif contrôleurs), elle consiste en la détermination de configurations de secteurs (regroupements) permettant d'absorber la demande de trafic en générant le moins de délai possible. Si la demande de trafic dépasse la capacité d'accueil des différents secteurs, une demande de régulation pourra être faite à J-2.

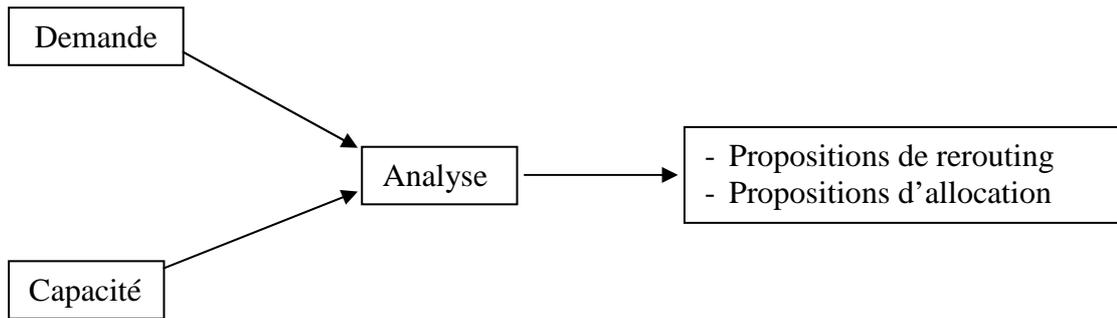


Figure 3.2. Schéma fonctionnel des activités ATFCM pré-tactique

❖ La phase tactique

L'objectif de la phase tactique est d'assurer, en temps réel, une charge de trafic gérable par les contrôleurs. Elle nécessite un travail de surveillance des charges de trafic qui pourra donner lieu à une activité de régulation. La phase tactique est rendue nécessaire à cause des aléas de l'exploitation : évolution quantitative et qualitative des flux de trafic. Les opérations ATFCM tactiques devraient consister à :

- Exécuter les mesures tactiques convenues en Pré-tactique afin de réduire et de régulariser les courants de trafic là où la demande prévue dépasse la capacité;
- Surveiller l'évolution de l'état de la circulation aérienne le jour J.

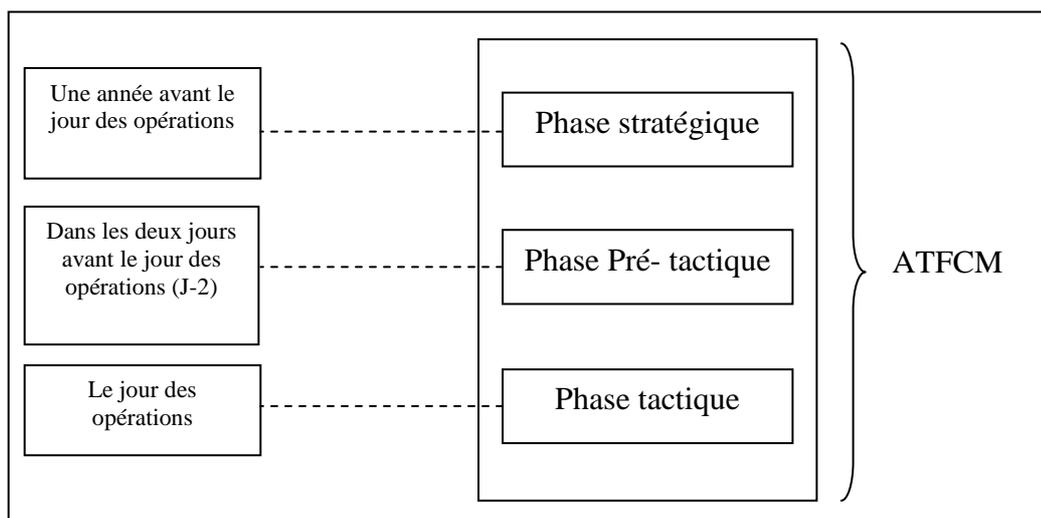


Figure 3.3. Organisation temporelle de l'ATFCM.

3.2.2.2. La mise en place des mesures de régulation

La régulation des flux de trafic est un filtre tactique destiné à homogénéiser les vols qui doivent traverser l'espace aérien contrôlé : il s'agit de limiter le nombre d'appareils qui pénètrent dans un secteur donné pendant un intervalle de temps donné. Ce planning est raffiné en temps réel par les contrôleurs.

Bien avant d'appliquer une régulation, il convient d'utiliser la prédiction de la demande attendue afin d'informer les exploitants et les pilotes des retards auxquels ils peuvent s'attendre. Il convient ainsi d'élaborer une prévision détaillée des courants de trafic dans une zone géographique donnée (composé d'une ou de plusieurs FIR). [4]

Pour appliquer des mesures de régulation, il est nécessaire de déterminer exactement la capacité du système ATC et d'évaluer le niveau de la demande du trafic au dessus duquel il sera nécessaire d'appliquer une régulation (Parmi les raisons qui motivent le calcul de capacité, nous avons cité l'adaptation de la demande prévue à l'aptitude des centres de contrôle à absorber cette demande. Un « chiffre » de capacité est donc un outil indispensable aux organismes de gestion du trafic pour réaliser leur objectif de régulation, aussi bien dans l'espace que dans le temps, et ce avec le souci de garantir à la fois un niveau de sécurité maximal et une optimisation de l'écoulement du trafic) [4]. Ayant déterminé ce niveau, l'ATFCM devrait fournir au centre de contrôle régional desservant une région déterminée, sur une base horaire (et avec la meilleure précision possible), des renseignements sur les heures prévues d'arrivée et de départ (prévisions du trafic) de tous les aéronefs au cours de chaque période où l'on peut s'attendre à un trafic de pointe. De préférence il conviendrait d'établir pareilles prédictions au moins trois heures à l'avance et de les revoir et de les réviser périodiquement par la suite [4]. Une fois identifiées (les périodes et les zones de régulation), ces indications devraient être largement diffusées, à l'aide du RSFTA moyennant des messages de régulation ou d'autres réseaux spécifiques.

Des mesures de régulation de la demande s'imposent pour assurer un équilibre raisonnable entre la demande du trafic aérien et la capacité des services ATS à absorber cette demande. Toutefois, il convient de souligner que ces mesures sont de caractère restrictif et qu'il convient de faire l'utilisation minimale et, toutes les fois que c'est possible, de les appliquer sélectivement afin qu'elles ne touchent que la partie du trafic qui est la cause du problème. Lorsque des mesures de régulation du débit s'imposent, il convient de ne les appliquer que pour la période de temps au cours de laquelle la demande attendue du trafic aérien dépassera la capacité dans ces zones. Il y a lieu d'appliquer et de coordonner les différentes mesures de régulation de façon qu'elles n'exercent pas d'effet cumulatif sur certains vols.

3.2.2.2.1. Les formes de régulation

Les mesures de régulation de la demande peuvent prendre différentes formes. Dans les systèmes les plus simples, les ACC qui exercent la régulation à l'égard des centres de contrôle régional voisins diffusent des avis demandant que les aéronefs concernés soient espacés selon des intervalles prescrits. Par exemple un aéronef toutes les 10 minutes, en parle dans ce cas des "taux d'acceptation". Les aéronefs sont parfois appelés à suivre des trajectoires prédéfinies c'est "le schéma d'orientation de trafic" ou encore un rerouting qui consiste à dérouter l'appareil en vol en lui imposant un changement de route et/ou de niveau de vol. Une autre forme de régulation consiste à retarder les aéronefs en vol en leur appliquant des attentes en route, ou en leurs demandant d'évoluer à des vitesses réduites pour permettre d'absorber au moins une partie des retards.

L'Attente en route ou le vol à un régime réduit ne sont pas attrayant pour les exploitants à cause de l'économie de carburant qui en résulte. Il faut toute fois observer qu'une vitesse réduite en route risque fort d'augmenter l'encombrement sur le tronçon de route et de conduire à une complexité accrue dans les secteurs. Une forme améliorée et plus complexe de régulation des arrivées aux secteurs congestionnés est possible avec un système automatisé, c'est le processus "d'Allocation des Créneaux au Départ".

3.2.2.2. Les vols exemptés des mesures de régulation [4]

❖ Type de vols exemptés des mesures de régulation

Dans le contexte de l'ATFCM, il convient d'exempter des mesures de régulation les types de vol ci-après:

- Les vols provenant de zones non associées à la zone de responsabilité de l'autorité Algérienne sont exemptés de l'obtention de créneaux pour entrer dans les zones ATFM soumises à régulation.
- Les vols en situation d'urgence, y compris les vols qui sont l'objet d'une intervention illicite;
- Les vols effectués à des fins humanitaires;
- Les vols effectués à des fins médicales;
- Les vols effectués pour des missions de recherche et de sauvetage;
- Les vols d'Etat ou avec statut de chef d'Etat;
- Autres vols expressément demandés par les pouvoirs publics.

❖ Traitement des vols exemptés des mesures de régulation

Un vol exempté est pris en compte dans la liste des créneaux mais ne subit aucun délai : le vol est forcé à son ETO. Il en résulte qu'un tel vol n'est pas soumis au principe « premier arrivé, premier servi » : il est prioritaire.

3.2.2.2.3. Capacité et régulation

Parmi les raisons qui motivent le calcul de capacité, nous avons cité l'adaptation de la demande prévue à l'aptitude des centres de contrôle à absorber ce trafic. La connaissance de la capacité est donc un outil indispensable aux organismes de gestion du trafic pour réaliser leur objectif de régulation, aussi bien dans l'espace que dans le temps, et ce avec le souci de garantir à la fois un niveau de sécurité maximum et une optimisation de l'écoulement du trafic. Il est donc important de connaître et avec précision la valeur de la capacité des secteurs concernés. Si elle est sous estimée, ce seront autant d'aéronefs maintenus au sol inutilement ; dans le cas contraire, c'est en l'air que les aéronefs risquent d'attendre ou pire encor des surcharges des secteurs de contrôles et donc l'affectation de la sécurité des vols.

3.2.2.3. Situation en FIR Alger

En Algérie, le transport aérien constitue l'une des branches les plus dynamiques de l'économie Algérienne. La croissance de l'économie du pays est donc en partie soutenue par la branche « transport aérien ». Ce secteur relève du ministère des transports. Ces attributions sont définies par lois et sont exercées par le biais de la Direction de l'Aviation Civile et de la météorologie (DACM) structurée en sous Directions à savoir, la sous Direction du Transport Aérien, la sous Direction de la Navigation Aérienne (ENNA), la sous Direction de la Météorologie (ONM) et la sous Direction des Aéroports (EGSA). Ces sous Directions sont chargées non seulement de l'élaboration des textes et règlements mais aussi de leur suivi et de leur contrôle.

Les analyses tenues ces dernières années ont montrés que le trafic aérien dans la FIR Alger, bien sensible aux fluctuations économiques et aux aléas conjoncturels nationaux et internationaux, est en constante progression (3% à 4%). La position géographique à la limite des deux continents l'Europe et l'Afrique fait de cette FIR un partenaire incontournable dans les grandes rencontres qu'organise l'OACI dont elle est membre. La croissance de son industrie pétrolière, la volonté politique du développement, le développement du tourisme et des voyages d'affaires ainsi que la libéralisation du transport aérien sont à l'origine de la croissance considérable que connaît actuellement le transport aérien en Algérie.

Dans ce contexte, la capacité actuelle du système de contrôle dans la FIR Alger a bien atteint son objectif jusqu'ici, bien que parfois il est constaté une sous capacité. La demande présente des pointes dans le temps et dans l'espace : certains jours, certaines heures et certaines zones sont plus chargés que d'autres. Ces contraintes vont probablement s'intensifier à l'avenir, à mesure que le transport aérien continuera à se développer.

3.2.2.3.1. Présentation des secteurs de contrôle

La totalité de l'espace aérien Algérien est appelé « FIR Alger ». Le découpage de celle-ci (en huit secteurs de contrôle) est basé sur des constats et des analyses de trafic. Il a été établi en fonction des routes aériennes, des moyens de radionavigation, des aérodromes et également de la charge de trafic.

Au nombre de huit, les secteurs sont les suivants :

- Secteur Sud-Sud ;
- Secteur Sud-Centre ;
- Secteur Sud-Est ;
- Secteur Sud-Ouest ;
- Secteur Nord-Est ;
- Secteur Nord-Ouest ;
- Secteur Centre Alger Inférieur (AI) ;
- Secteur Centre Alger Supérieur (AS).

Chaque secteur a ces spécificités et ces caractéristiques :

- Le secteur Sud-Sud : Couvre la partie extrême Sud de l'Algérie. L'essentiel du trafic aérien dans ce secteur est de type transit. La plus part du temps les transits sont des vols en provenance de l'Europe à destination de l'Afrique ou l'Amérique du sud et vis versa (la pointe de trafic est le plus souvent la nuit au environs de 00 :00 à 02 :00 GMT).
- Le secteur Sud-Est : à la particularité d'avoir une forte concentration des vols VFR, le plus souvent ce sont des petits appareils effectuant des photos aériennes ou des relevés du terrains, ou des vols entres les plateformes pétrolières (au voisinage de DAUH « Hassi Messaoud » et la plus forte pointe de trafic est aux environs de 10 : 00 GMT).
- Le secteur Nord-Ouest : pendant les périodes de forte demande de trafic, ce secteur est d'une complexité extrême dans la mesure où la majeure partie de cet espace aérien est composée de zones dangereuses ou interdites au survol d'appareils civils.

- Le secteur Nord-Est : ce secteur est caractérisé par sa complexité au point de vue structure du réseau de route, nombre d'aérodromes⁵.
- Le secteur Centre Alger : le trafic aérien est considérablement plus en évolution dans ce secteur que dans tous les autres secteurs. La majorité du trafic est soit en montée ou en descente (La pointe de trafic est le plus souvent enregistrée la matinée). En raison de la présence de l'aérodrome international d'Alger Houari Boumediene et de l'aérodrome de Boufarik, donc de la charge de trafic induite, ce secteur nécessite la plus part du temps plusieurs contrôleurs pour sa gestion. Dans cette optique, il a été partagé en : secteur Inférieure situé jusqu'au F245, et secteur Supérieure au-delà. Ces deux secteurs sont souvent regroupés par manque d'effectifs (il faut au moins neuf ans d'expérience dans le CCR Alger pour accéder au poste de premier contrôleur « TMA2 »).

Remarques

- Au point de vue densité de trafic, la TMA Alger (comparée aux autres secteurs) est le secteur le plus chargé. De plus, et toujours par manque d'effectifs qualifiés, ce secteur se trouve souvent en sous capacité, ce qui engendre des problèmes de congestion pendant les heures de pointes. Raisons pour lesquelles nous avons choisi ce secteur comme exemple pour l'application des régulations.
- La stratégie des contrôleurs Algérien prévoit que les secteurs puissent être regroupés. Un même contrôleur ne gérant plus un seul secteur mais plusieurs. Cette technique est utilisée pour les périodes de faible trafic. Elle se justifie par deux points:
 - Eviter d'utiliser inutilement des ressources humaines.
 - Maintenir une charge de travail suffisante pour le contrôleur (des études montrent que les erreurs humaines sont plus importantes en dessous d'une certaine charge de travail : inattention, somnolence).

⁵ DABC, DABB, DAAE, DAAS, DABT, DAEO, DAUB, DAAV, DABS, DABP

3.3. Décongestion des secteurs de contrôle en route par le processus «d'Allocation des Créneaux au Départ» [2-4-35]

Les secteurs de contrôle, comme nous l'avons vu précédemment, ont une capacité maximale exprimée en débit d'aéronefs. Si trop de vols demandent à être contrôlés, dans un espace restreint sur une période de temps réduite, par rapport à la capacité des services de contrôle, ces derniers lancent des procédures de régulation pour parer aux difficultés. Pareils mesures produisent fréquemment des retards non maîtrisés des vols au départ, des attentes en vol, des niveaux de vol peu économiques, des réacheminements et des changements d'itinéraires, des perturbations des horaires de vols, des pénalisations économiques et des surconsommations de carburant, des encombrements dans les aéroports et/ou dans les aéroports, et le mécontentement des passagers.

Pour éviter que trop d'aéronefs se présentent en même temps, dans un secteur de contrôle donné, nous choisissons de réguler cette demande en modifiant l'heure de décollage de certains vols (retards au départ). Nous imposons donc aux aéronefs de décoller à une heure donnée « créneau » qu'il doit obligatoirement respecter.

Nous allons donc séparer les aéronefs dans le temps par l'attribution de créneaux au départ. Le processus consiste à affecter des créneaux de décollage en fonction des ressources disponibles (capacités des secteurs et des aéroports) au premier vol demandeur PAPS (Premier Arrivé au secteur régulé Premier Servi). Cette méthode permet d'atteindre un objectif majeur de prévention de la surcharge des secteurs et des aéroports tout en veillant au principe d'équité entre compagnies (ne pas privilégier une compagnie par rapport à une autre).

3.3.1. Définition d'un créneau

Un créneau horaire est défini comme « la période considérée d'un jour et d'une heure pendant laquelle un aéronef doit arriver à un aéroport ou en partir ». [4]

Dans notre cas (créneaux au décollage), le créneau est alloué sous forme d'une heure calculée de décollage (CTOT). Une tolérance de -5 à +10 minutes par rapport à la CTOT est définie comme la période de temps pendant laquelle le vol peut être autorisé à décoller. Cette tolérance est destinée principalement pour le contrôle au sol. Pendant la phase de roulage, un vol au départ peut être retardé à différents endroits de l'aéroport : autour des parkings lorsqu'il croise le trafic à l'arrivée, devant les intersections lorsqu'il cède le passage à d'autres et enfin devant la piste, où les avions doivent souvent faire la queue pour respecter le temps de séparation nécessaire entre chaque décollage ou atterrissage. Si un aéronef manque son créneau il ne peut décoller avant d'en avoir obtenu un autre.

3.3.2. Processus d'Allocation des Créneaux au Départ

Le processus de régulation par "Allocation des Créneaux au Départ", consiste à retarder les horaires de décollages des vols impliqués dans les secteurs surchargés. Ces délais sont imposés à un vol donné avant sa mise en route.

L'objectif de l'affectations de ces délais est de respecter les contraintes de capacité en route fournies par chaque centre de contrôle suivant leur schéma d'ouverture quotidien⁶. Aussi, plutôt que de faire attendre en l'air les aéronefs, il a été décidé de leur attribuer des créneaux de départ (sous forme de retard par rapport à l'heure de départ demandée) et les faire attendre au sol, non seulement

⁶ C'est le planning élaboré par le Flight Management Position, des positions ouvertes pendant une journée de trafic.

la sécurité y gagne, puisque les risques d'abordage sont moindres au sol que dans des circuits d'attente saturés, mais les compagnies y retrouvent-elles -au moins en partie- leur compte puisque l'attente au sol est moins coûteuse que l'attente en vol, ce qui permet aussi de respecter les contraintes d'environnement en réduisant les émissions de gaz polluant. Une telle régulation permet de limiter le nombre d'aéronefs entrant dans un espace donné pendant une durée spécifiée. Elle a un double but :

- Protéger les secteurs des surcharges de trafic préjudiciables à la sécurité;
- Optimiser l'utilisation de l'ensemble des capacités de contrôle offertes aux usagers.

Remarques

- Les régulations ATFCM au sol devraient être appliquées principalement lorsque la demande est bien au dessus de la capacité (10% ou plus). L'application de régulations ATFCM pour toutes autres raisons ne permet pas d'éviter les surcharges et génère au contraire des retards superflus » [34]
- Les opérateurs aériens doivent déposer un plan de vol 3 heures avant leurs EOBT (l'heure à laquelle ils prévoient de commencer le roulage) qui indique la route, l'heure de décollage et divers éléments concernant le vol. C'est la collecte et l'étude de ces plans de vol qui permet de prévoir et de gérer le trafic.

3.3.2.1. Présentation des différentes étapes d'Allocation des Créneaux au Départ

Pour chaque secteur régulé, on génère une liste de créneaux (SAL) initialement vide. Ainsi, si un secteur d'une capacité horaire de 15 aéronefs par heure se trouve régulé, le processus génère une liste de 15 créneaux, espacés de 4 minutes chacun (60 minutes divisées par la capacité) et cela pour toute la durée de la régulation. La liste ainsi générée va se remplir au fur et à mesure de l'arrivée des plans de vol. Si un aéronef veut prendre un créneau déjà préalloué à un autre vol, c'est l'aéronef qui aurait dû arriver le premier sur la régulation en l'absence de celle-ci qui obtient le créneau. L'autre aéronef est reclassé dans

le créneau suivant, et si ce dernier est occupé alors le processus se répète. Il peut donc se produire une réaction en chaîne. Un nouveau vol peut décaler de proche en proche de nombreux aéronefs.

L'allocation obtenue est évolutive puisque chaque nouveau message (plan de vol, DLA : Delay, CNL : Cancel...) peut bouleverser la liste. Pour l'instant, on ne parle que d'une préallocation des créneaux. A une période de temps fixée (Slot Issue Time SIT), deux heures avant l'heure estimée de départ du poste de stationnement (EOBT), le créneau passe de l'état préalloué à l'état alloué, à ce stade le créneau ne peut plus être pris par un autre vol à son état préalloué.

Sur cette base, l'heure de décollage pour un vol donné est calculée. C'est cette information, heure calculée de décollage (CTOT), qui est communiquée à l'opérateur aérien et aux organismes ATC concernés.

Le processus passe ainsi par plusieurs étapes:

3.3.2.1.1. L'établissement de la liste de créneaux SAL

Pour chaque régulation, on construit une liste de créneaux appelée Slot Allocation List (SAL) initialement vide. Une régulation peut être divisée en sous périodes ayant chacune un taux associé. Avec ces données, on construit initialement une SAL vide en divisant chaque sous période de régulation en créneaux d'égale durée, chacun associé à une heure de référence (Href).

Exemple : Pour une sous période de 1 heures 30 min à laquelle est associée un taux de 20 aéronefs par heure, on aura dans la SAL 30 créneaux espacés chacun de 3 minutes.

3.3.2.1.2. La préallocation de créneaux

Après avoir sélectionné les vols concernées par cette régulation (dans la phase pré-tactique de l'ATFCM, sont identifiées les zones et les périodes de régulation), on attribut à chaque vol un créneau provisoire dit « préalloué » sur la base de l'heure prévue pour l'entrée dans le secteur régulé (ETO).

Pour cela nous avons choisi de respecter les principes suivants :

- Pas de surcharge de trafic.
- Les vols exemptés ne sont pas sujets aux mesures de régulation.
- Règle du « premier arrivé, premier servi » : les vols concernés par une régulation doivent être ordonnés dans la SAL en fonction de leurs ETO.
- Attribuer aux vols les créneaux les plus près possible de leurs ETO.
- Si la régulation ne dépasse pas la valeur de 5 minutes, elle sera négligée.

Remarque

La liste des créneaux provisoires est sujette à de nombreuses modifications pour appliquer à tout moment les principes précédents. Ceci se produit, par exemple, suite à l'arrivée d'un nouveau plan de vol, Ce qui conduit à un recalcul fréquent des créneaux.

3.3.2.1.3. L'allocation de créneaux

A un moment fixé avant l'EOBT (deux heures avant l'heure estimée de départ du poste de stationnement) pour chaque vol la phase de préallocation se termine. Le créneau est alors alloué au vol, on entre dans la phase d'allocation. Une fois le créneau alloué, il ne peut être pris par un autre vol à son état préalloué.

Remarque

Dans une SAL, on trouve, en même temps, des vols dont le créneau est préalloué, d'autres dont le créneau est alloué ainsi que des vols prioritaires dont le créneau est imposé.

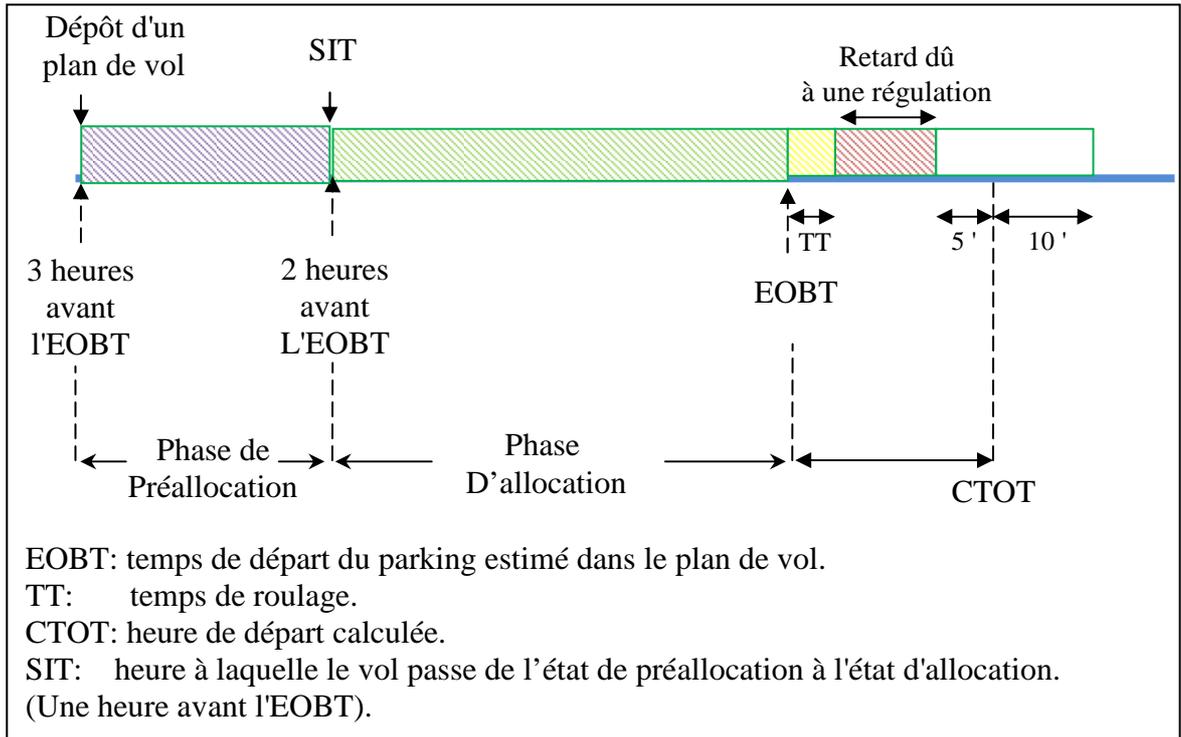


Figure 3.4. Les phases de préallocation et d'allocation de créneaux au départ.

3.3.2.2. Remplissage de la SAL

3.3.2.2.1. Les principes de base

➤ « premier arrivé, premier servi »

Cette règle de priorité garantit l'équité entre les vols. En effet, elle assure que l'ordre des vols dans la SAL est celui des arrivées de ces vols dans le secteur régulé. Quand on reçoit les données du deuxième vol (vol 2), en appliquant la règle précédente, on va essayer de lui préallouer le créneau le plus proche de son ETO. Trois cas se présentent alors :

- Le créneau est libre : il est préalloué au vol 2.
- Le créneau est déjà préalloué au vol 1 :
 - Si $ETO(1) > ETO(2)$ alors le vol 2 prend le créneau. Le vol 1 est décalé dans la SAL. L'application de la règle « premier arrivé, premier servi » peut ainsi induire une réaction en chaîne, le vol décalé pouvant à son tour prendre le créneau d'un autre vol.
 - Si $ETO(1) < ETO(2)$ alors le programme essaye de préallouer au vol 2 un créneau libre dans la liste.
- Le créneau est déjà alloué : il ne peut être pris par un vol candidat à la préallocation. Le programme tente de préallouer au vol 2 le créneau suivant sur la liste.

Remarque

Si le plan de vol arrive en retard (moins de trois heures avant l'EOBT) le principe du premier arrivé premier servi n'est pas appliqué.

Exemple 1

Soit une régulation avec un taux de 24/60. Etudions une partie de la SAL. Les cases noires représentent les créneaux alloués.

Soit le vol DAH6003 avec: $ETO(DAH6003) = 10H33'$. On veut lui attribuer un créneau. L'application du principe « premier arrivé, premier servi » donne ce résultat:

On a déjà : ETO (ZSOLW) = 10H35' et ETO (DTH801) = 10H31'.

- 10H35 n'est pas disponible car ETO(DTH801) < ETO(DAH6003).
- 10H37 est déjà alloué.
- 10H40 est le 1^{er} créneau disponible pour DAH6003 car ETO (DAH6003) < ETO (ZSOLW) : il lui est préalloué.
- ZSOLW est décalé au créneau suivant (10H42) qui est disponible.

Résultat 1

CTO (DAH6003) = 10H40' et

CTO (ZSOLW) = 10H42'.

Tableau.3.1.La SAL avant

créneaux	vols
10H30	
10H32	
10H35	DTH801
10H37	
10H40	ZSOLW
10H42	

Tableau 3.2.La SAL après

créneaux	vols
10H30	
10H32	
10H35	DTH801
10H37	
10H40	DAH6003
10H42	ZSOLW

➤ « Créneau le plus près possible de l'ETO »

Il n'est pas raisonnable de décaler des vols sur de longues durées: la demande en trafic étant concentrée sur des périodes précises. Il faut tenter de satisfaire au mieux la demande avec un minimum de modifications et sans dépasser un seuil de perturbations critique qui pourrait induire l'annulation de certains vols. Ainsi pour chaque vol, on préalloue le créneau libre de la SAL vérifiant :

- Heure de référence du créneau (Href) la plus proche possible de l'ETO du vol.
- Href ≥ ETO.

Définir un créneau revient à déterminer, dans chaque régulation, l'heure d'entrée calculée du vol appelée CTO. Lorsqu'un vol est placé dans un créneau, la CTO assignée au vol correspond à l'heure de référence du créneau.

Exemple 2

Soit une régulation avec un taux de 24/60. Etudions une partie de la SAL. Les cases noires représentent toujours les créneaux non libres (alloués). On a :

ETO (ZSOLW) = 10H35'. En appliquant le principe Href la plus proche de l'ETO:

- 10H37' n'est pas libre. 10H40' est préalloué.

Résultat 2

CTO (ZSOLW) = 10H40'.

Tableau 3.3. La SAL avec le principe « créneau le plus près possible de l'ETO »

créneaux	vols
10H30	
10H32	
10H35	
10H37	
10H40	ZSOLW
10H42	

➤ « La fenêtre d'incertitude (FI) »

Les vols subissent des perturbations (erreur de prévision) modifiant leurs horaires de décollage ou leurs horaires d'entrée dans les secteurs. Ces variations sont dues aux conditions météorologiques, aux modifications de vitesse, ainsi qu'à des considérations propres aux compagnies. Face à l'imprécision des temps de vol et même à l'incertitude quant à l'heure de décollage des aéronefs, il est absurde de considérer qu'un aéronef va arriver dans le secteur régulé à la minute près à l'heure de son créneau. Le paramètre « fenêtre d'incertitude » a été créé en réponse pragmatique à ce constat.

Ce paramètre introduit une tolérance entre l'heure de référence du créneau attribué et la CTO assignée au vol (La valeur de 5 minutes de part et d'autre de H_{ref} semble donner de bons résultats pour les secteurs en route, et 2 minutes pour les secteurs d'approche [15]).

➤ « Changement tardif »

Lorsque l'opérateur aérien ne peut pas respecter la CTOT qu'il a reçu, il demande un changement de l'EOBT. L'application devrait lui attribuer un nouveau créneau proche de la nouvelle heure estimée de décollage. Pour palier à ce problème nous choisissons de laisser intentionnellement des créneaux « vides » réservés pour d'éventuels changements tardifs.

➤ « La distance parcourue »

Les vols ayant des distances de parcourir importantes auront toujours l'avantage d'être insérés en premiers lieu dans la SAL, contrairement à ceux de courte distance qui seront pénalisés, et subissent toujours des délais trop importants. Un compromis devra être recherché. Une façon pour le faire est d'associer des pourcentages pour chaque catégorie de vol: Cat1 : longue distance (plus de 5 heures de vol pour arriver au secteur régulé), Cat2 : moyenne distance (entre 2 et 5 heures de vol pour arriver au secteur régulé) et Cat3 : courte distance (inférieur à 2 heures de vol pour arriver au secteur régulé). Les vols proches des secteurs régulés « Cat3 » devraient avoir accès à tous les créneaux disponibles, les vols de « Cat2 » par contre ne pourront accéder qu'aux créneaux réservés pour les Cat1 et Cat2, les vols de « Cat1 » ne peuvent accéder qu'aux créneaux réservés à cette catégorie, de ce fait, la SAL sera divisée en trois sous-SAL avec pour chaque catégorie un ensemble de créneaux dédiés et déterminés par étude statistique.

➤ « Amélioration de créneau »

Lorsqu'un aéronef annule son vol, ou demande de changer son EOBT, il libère son créneau pour un autre emplacement. Le programme devrait permettre d'améliorer le ou les autres créneaux alloués. Au lieu de changer toutes les CTOT des vols prévues, occasionnant un chamboulement de la SAL, nous optons pour des améliorations significatives qui apportent un réel bénéfice pour les vols

(au moins 15 minutes en cas général, et au moins 5 minutes pour les vols prêt au décollage et demandant à partir immédiatement).

NB : les principes d),e) et f) cités en haut ne seront pas implémentés dans notre application en raisons de la complexité de leur intégration et du fait que notre application ne traite que le trafic décollant de la FIR Alger.

3.3.2.2.2. La notion de CTO minimum

Pour chaque régulation, à l'ETO d'un vol, on associe la « CTO minimum » qui représente l'heure de référence du créneau qui lui conviendrait le mieux dans la SAL de la régulation considérée.

Exemple :

A partir de la régulation définie précédemment (taux de 24/60)...,
ETO (ANS5236)= 10H35', alors 10H37' est son CTO minimum.

3.3.2.2.3. La recherche d'un créneau dans la SAL

Dans un premier temps, on cherche pour le vol le créneau disponible le plus près possible de l'ETO dans l'intervalle $[CTO_{\min} - 5 ; CTO_{\min} + 5]$. L'heure de référence du créneau trouvé peut ainsi être inférieure à l'ETO du vol (dans la limite de la demi-fenêtre). Bien évidemment, si on ne trouve pas de créneau disponible dans cet intervalle, on poursuit la recherche dans les créneaux suivants ($H_{\text{ref}} > CTO_{\min} + 5$) et ce, jusqu'à l'heure limite de la régulation. Quand on trouve un créneau dans la fenêtre d'incertitude, ce créneau est gelé et le vol occupe le créneau correspondant à son CTO_{\min} . Ainsi, il peut y avoir plusieurs vols dans le même créneau mais il ne s'agit pas de vol en surcharge.

Exemple 3

Soit une régulation avec un taux de 30/60. Etudions une partie de la SAL. Les cases noires représentent toujours les créneaux non libres (alloués). Soit les vols suivants : ETO (DTH801) = 10H31'. ETO (DAH6003) = 10H33'. ETO (ZSOLW) = 10H35'.

En tenant compte des principes cités ci-dessus, alors:

- CTOMin (DTH801) = 10H32,
- CTOMin (DAH6003) = 10H34,
- CTOMin (ZSOLW) = 10H36.
- Pour une FI de 10 minutes

➤ Cas de l'DTH801

- 10H32 (CTOMin) est déjà alloué.
- 10H30 (créneau le plus près de la CTOMin dans la FI) est disponible : il est donc gelé et l'DTH801 occupe donc le créneau 10H32 (c'est le deuxième vol dans ce créneau).

➤ Cas de l'ZSOLW

- 10H36 (CTOMin) est déjà alloué.
- 10H34 n'est pas disponible car ETO (DAH6003) < ETO (ZSOLW).
- 10H38 est déjà alloué.
- 10H40 est un créneau libre hors de la FI donc CTO = Href.

Bilan

CTO (DTH801) = CTOMin = 10H32 et Href (DTH801) = 10H30.

CTO (ZSOLW) = Href = 10H40.

Tableau 3.4. La SAL en appliquant les principes de base

créneaux	vols
10H28	
10H30	Gelé par DTH801
10H32	DTH801
10H34	DAH6003
10H36	
10H38	
10H40	ZSOLW

3.3.2.2.4. Calcul du délai du à une régulation

Pour un vol donné, on calcule le délai du vol dans la régulation concernée. Ce délai est égale à :

$$Délai (voli) = CTO (voli) - CTO \min(voli) \quad (3.1)$$

Ainsi dans la FI le délai est nul $CTO (vol i) = CTO_{\min} (vol i)$.

3.3.2.2.5. Calcul de la CTOT

C'est la valeur de la CTOT qui sera fournit aux opérateurs aériens. Elle se calcul de la manière suivante:

$$CTOT (voli) = ETOT (voli) + délai (voli) \quad (3.2)$$

Avec:

$$ETOT (voli) = EOBT (voli) + TT \quad (3.3)$$

EOBT: c'est l'heure estimée de départ du poste de stationnement.

TT: le temps moyen de roulage (généralement 10 minutes).

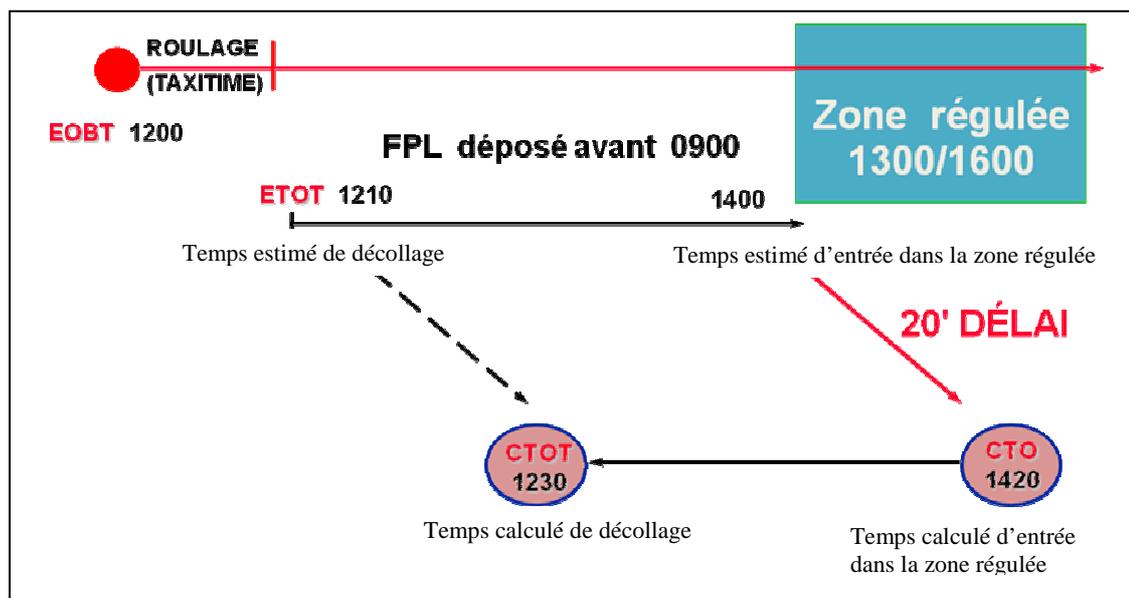
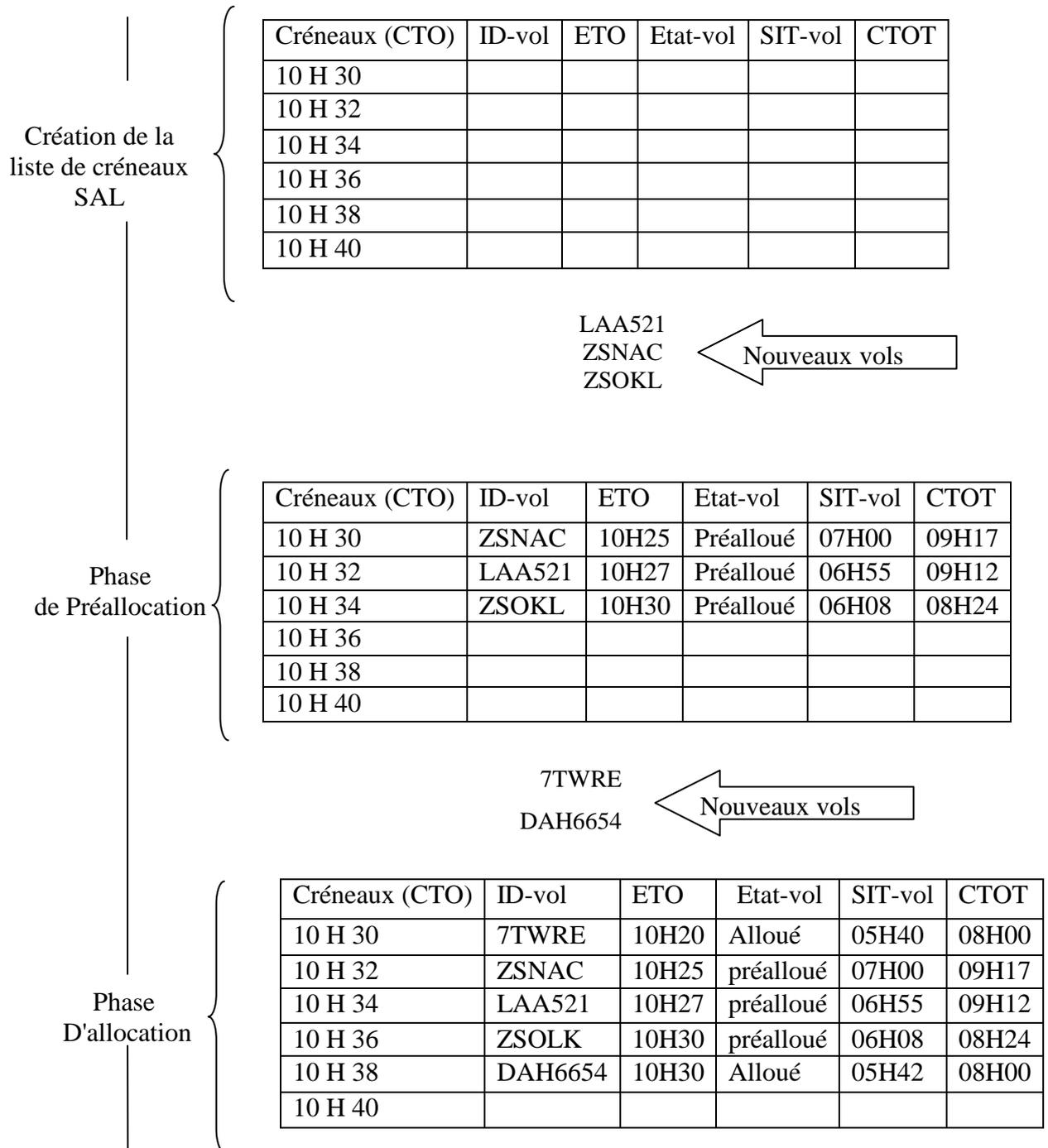


Figure.3.5. Le calcul de la CTOT d'un vol.

3.3.2.2.6. Résumé du fonctionnement du processus d'allocation de créneaux



CHAPITRE 4 DEVELOPPEMENT D'UNE APPLICATION -IMPLEMENTATION ET RESULTATS-

4.1. Objectif

Notre travail consiste à établir un programme qui permettra d'effectuer une régulation locale sur un secteur nominal choisi (secteur centre Alger AI/AS regroupés). Il devra attribuer des retards au sol aux vols IFR au départ de la FIR Alger impliqués dans le secteur surchargé en prenant en compte :

- La capacité horaire du secteur considéré;
- Le trafic prévu dans ce secteur ;
- La période de régulation (heure de début et de fin de régulation).

Le processus doit en outre permettre d'appliquer la solution choisie : « régulation des flux de trafic aérien par Allocation de Créneaux au Départ », et la valider du point de vue respect des capacités secteur de contrôle en route (protection des contrôleurs contre les surcharges), lissage de la charge de trafic (assurer un écoulement harmonieux) et minimisation du délai moyen par vol.

Etant destiné aux services du contrôle aérien, il sera installé sur PC. Le langage de "programmation "choisi est le delphi.7. Il dispose en effet d'un outil « de développement d'interfaces » qui permettra d'établir une interface home/machine facile à exploiter (boîtes de dialogue, menus, etc...).

4.2. Les spécifications

L'application doit permettre de réguler la demande de trafic aérien prévue pour un secteur donné en étalant celle-ci dans le temps. Elle devra être capable de fonctionner avec des densités de trafic plus importantes que celles observées actuellement (elle doit être compatible avec l'évolution du trafic aérien). Il n'est pas

prévu en effet ici de réguler la demande pour un groupe de secteurs mais cela reste facilement réalisable considérant une solution simple en affectant le retard le plus pénalisant calculé et imposer ce retard aux autres secteurs (vol combiné = vol régulé dans le secteur le plus pénalisant + vol imposé dans les autres secteur).

On désire travailler dans un environnement temps réel. Cette spécification va avoir une conséquence sur notre système :

- Le système doit être prédictif : la résolution de la surcharge du secteur doit s'effectuer avant la surcharge réelle (en amont).

4.3. Les contraintes opérationnelles

Le processus que nous proposons de mettre en oeuvre doit respecter les contraintes opérationnelles suivantes:

- Les opérations de régulations ne concerneront que les vols IFR évoluant en CAG au départ de la FIR Alger;
- Un vol non exempté en surcharge sera traité autant de fois que nécessaire, c'est à dire jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de surcharge ;
- Les compagnies doivent déposer leurs plans de vol trois heures avant l'EOBT (pour bénéficier d'un traitement équitable);
- Le créneau alloué est envoyé deux heures avant l'EOBT du vol considéré et mis a jour à chaque fois que c'est nécessaire;
- La régulation pour un ensemble d'aéronefs en surcharge se fera vol par vol ;
- La régulation par allocation de créneaux au départ devrait être appliquée lorsque la demande prévue est au dessus de la capacité secteur de 10% ou plus (un pic qui ne dépasse pas 10% ne nécessite pas de régulation).
- Si le retard dû à la régulation ne dépasse pas 5 minutes, il sera négligé mais un slot sera délivré pour fixer le créneau de départ;
- Les vols exemptés (vols : Hôpital, d'Etat, Recherche et Sauvetage ou à caractère Humanitaire) ne sont pas sujets aux mesures de régulation ;

- La sécurité est assurée par le respect des capacités déclarées des secteurs de contrôle;
- Le processus permet d'étaler la demande dans le temps avec un certain degré de lissage de la charge de trafic;
- Les vols, ayant déposé leurs plans de vol au moins trois heures avant l'EOBT, devraient subir, du fait de la régulation, des délais les pénalisent de manière équitable (Principe d'équité dans le traitement entre les différents vols) ;
- Les vols concernés par une régulation doivent être ordonnés en fonction de leurs ETO (Règle du « premier arrivé, premier servi ») ;
- Attribuer aux vols les créneaux les plus près possible de leurs ETO.

4.4. La base de données

Nous avons besoin d'une base de données qui contient les informations suivantes :

4.4.1. Les données ATFCM à introduire

L'ATFCM est en fait une série de procédures prenant en compte les deux facteurs (données) essentiels du trafic aérien suivant :

- Les vols : un vol décolle d'un aérodrome donné à une date et heure donnée, suit une route prédéfinie à une vitesse fixée et atterrit sur un (autre) aérodrome
- Les secteurs : l'espace aérien est divisé en secteurs de contrôle traversés par des routes aérienne suivies par les aéronefs. Un secteur est un polyèdre, doté d'une capacité exprimée par un nombre maximum de vols entrant dans le secteur pendant un intervalle de temps donné, en général, exprimé en nombre de vols par heure.

4.4.4.1. Les données de l'espace aérien

Toutes les données relatives à l'organisation ATS (Air Traffic Service): Le réseau de routes aériennes, les points significatifs, les moyens de radionavigation, la sectorisation, les aérodromes, les pistes, les temps

de roulage, les sorties standardisées SIDs, les procédures d'arrivées, les capacités, les restrictions de l'espace aérien, les zones à statut particulier...

➤ La sectorisation

Une description de la sectorisation est ainsi donnée. Elle nécessite d'introduire:

- Les points définissant les limites géographiques pour chaque secteur ATC ;
- Les limites inférieures et supérieures des secteurs.

Tableau 4.1 : Les limites latérales et verticales du secteur TMA Centre Alger [54]

Désignation	Limites latérales	Classification
TMA CENTRE ALGER Espace supérieur	Segments de droites joignant les points : 3729 N 00130 E – 3820 N 00345 E – 3900 N 00440 E – 3900 N 00500 E – 3540 N 00500 E – 3540 N 00130 E – 3729 N 00130 E	<u>FL 450</u> FL 245 A Espace RVSM
TMA CENTRE ALGER Espace inférieur	Segments de droites joignant les points : 3729 N 00130 E – 3820 N 00345 E – 3900 N 00440 E – 3900 N 00500 E – 3540 N 00500 E – 3540 N 00130 E – 3729 N 00130 E	<u>FL 245</u> 450 m D GND/MSL Espace non RVSM

➤ Les zones à statut particulier

Représentent une partie de l'espace où le trafic aérien général peut être restreint. Dans la plupart des cas quand les opérations militaires peuvent avoir lieu. Une description des limites horizontales et verticales de ces zones sera donnée.

Tableau 4.2 : Exemple des zones à statut particulier [54]

Identification, Nom, limites latérales	Type de la zone	<u>Limites supérieures</u> <u>Limites inférieures</u>	observation
DA – R54 ALGER /Houari BOUMEDIENE Cercle de 5 Nm de rayon centré sur : 364140N 0031304E	Zone Réglementée	<u>450M</u> GND ou Mer	Réservée aux aéronefs utilisant ALGER/H.BOUMEDIENE
DA - P51 AIN OUSSERA Cercle de 27 NM de rayon centré sur: 353100N 0025300E Limité au S/E par une droite joignant les points : 350500N 0030100E et 354100N 0032400E	Zone Interdite	<u>UNL</u> GND	H 24

➤ Points significatifs

Par définition, est un emplacement géographique spécifié utilisé pour définir une route ATS ou la trajectoire d'un aéronef, ainsi que pour les besoins de la navigation et des services de la circulation aérienne. [1].

Un point significatif peut correspondre, selon le cas, à l'emplacement d'une aide à la radionavigation ou d'un point fictif.

Tableau 4.3 : Exemple des points significatifs [54]

Code du point	Type du point	Coordonnées géographiques
ADR	VOR/DME ADRAR	274901,34 N 0001221,12 W
AMIRA	Point significatif	344800N 0065902E

➤ Les Aérodrômes

Pour chaque aéroport on introduit : son indicateur d'emplacement OACI, sa position géographique ainsi que le temps de roulage moyen « taxi time » (pour simplifier nous avons pris 10 minutes pour toutes les pistes).

Tableau 4.4 : Exemple de l'aéroport de SETIF [54]

Nom de l'Aéroport	Emplacement	Indicatif	Coordonnées géographiques	Temps de roulage
SETIF / 8 MAI 45	Sétif	DAAS	36 10 43 N 005 19 48 E	10 minutes

➤ Le réseau de routes ATS

Le réseau de route sera défini par des caractéristiques qui comprennent un indicatif de route ATS, la route à suivre définie par la succession des points significatifs et la distance qui les séparent.

Tableau 4.5 : Description de la route ATS «A 6» [54].

Indicatif de route Nom des points significatifs coordonnées	Route MAG RDL VOR DIST (NM)	<u>Limite supérieure</u> Limite inférieure Classification de l'espace aérien	Sens des niveaux de croisière	
			impair	pair
A6 ▲ LABRO 371700 N 0010700 E ▲ MOSTAGANEM VOR/DME 355355,13 N 0000810,57 E	211°/031° 96	<u>FL245</u> FL45 Classe D	↓	↑

➤ Les capacités des secteurs de contrôle:

La capacité d'un secteur ATC sera définie par le nombre maximal d'aéronefs qui puisse être acceptés dans une période d'une heure. Sa valeur dépend de la structure de routes ATS, de la précision de la navigation des aéronefs, des conditions météorologiques, du degré de qualification

des contrôleurs, du type et de la disponibilité des moyens de communication de navigation et de surveillance utilisés ...

La capacité peut être évaluée par plusieurs méthodes, en prenant en compte plusieurs facteurs comme :

- Complexité de conflits ;
- Nombre d'avions traités ;
- Type du Trafic (stable et évolutif) ;
- Trafic mixte (lent et rapide) ;
- Nombre et configurations des routes (notion de proximité);
- Nombre de points de conflits;
- Existence de zones militaires ou réglementées ;
- Taille du secteur considéré;
- Type de coordinations (manuels, automatiques, inter secteur, disponibilité des moyens de communication ...) ;
- Plage de préavis de coordination en sortie ;
- Délai de coordination en entrée ;
- Possibilité d'une limitations ou de refus de trafic en sortie ;
- Saturation de la fréquence ;
- Brouillage ou mauvaise réception ;
- Type de séparation et moyens de radio navigation disponible (séparation radar ou en procédure, présence de moyens au sol ...)
- Saturation de l'image radar ;
- Mauvaise détection radar ;
- Tenue des strips;
- Perturbations météorologiques ;
- Dégradations techniques ;
- Environnement sonore (travaux, visites ...) ;
- Contrôleur à l'instruction sur la position ;
- Autres paramètres ...

Le fait qu'aucune étude de capacité n'a été réalisée, nous avons pris comme valeur de capacité déduite des exercices de qualification.

Exemple : La capacité du secteur TMA Centre Alger est de 24 aéronefs/ heure (les exercices de qualification comporte 16 aéronefs pendant 40 minutes ce qui correspond à 24 aéronef par heure).

4.4.4.2. Les données du trafic aérien

❖ Types et performances d'Aéronefs

Les performances d'aéronefs sont utilisées pour permettre le calcul du profil de vol. Pour chaque type d'appareil les informations suivantes sont répertoriées:

- Type de l'aéronef ;
- Vitesses de croisière de montée et de descente en fonction du niveau de vol ;
- Taux de montée et de descente en fonction du niveau de vol ;
- Ainsi que d'autres paramètres comme les taux de virage, vitesse de décollage, distance de décollage, durée nécessaire pour le décollage ...

Tableau 4.6.Performances des aéronefs pour le B747/H et B742/H

F50	F100	F150	F200	F250	F280	F300	F340	F360	F420	performance values
1400	2000	2100	1900	1500	1100	0950	0750	0600	0500	climb rate ft/min
1000	1150	1300	2000	2300	2100	2000	1800	1700	1500	descent rate ft/min
N0250	N0260	N0310	N0325	M078	M083	M083	M084	M085	M085	cruising speed IAS
N0230	N0270	N0320	N0336	M076	M081	M082	M085	M085	M085	climbing speed IAS
N0175	N0235	N0280	N0315	M069	M075	M077	M082	M083	M085	descent speed IAS

Exemple d'illustration

- Pour le type d'aéronef B747/H
- H: étant la catégorie de turbulence du sillage.
- Les valeurs de performances: pour le niveau de vol 320
- Du tableau F300: c'est la plage de niveau de vol entre F300 et F340
- Vitesse de croisière (cruising speed IAS) : en nombre de mach = 0.83
- Vitesse de montée (climbing speed IAS) : en nombre de mach = 0.82
- Taux de montée (climb rate ft/min) : 950 pieds par minute
- Vitesse de descente (descent speed IAS): en nombre de mach = 0.77
- Taux de descente (descent rate ft/min) : 2000 pieds par minute

❖ Les plans de vols

Pour permettre un bon contrôle des vols, les compagnies déposent auprès des autorités compétentes un plan de vol pour chaque vol. Le jour même (parfois même avant), ces informations parviennent aux contrôleurs et leurs permettent d'anticiper l'entrée (à partir de calcul du profil de vol) des aéronefs dans les secteurs qu'ils contrôlent.

- Exemple d'illustration

(FPL – DAH6382 – IS
 –AT72 / M – S / C
 –DAOO1340
 –N0270F190 ORA GOMRI BAY SAKNA GHA BISSA HME
 –DAUH0150 DAUG DAOO
 –DOF/ 080218)

- Décodage

FPL: il s'agit d'un message plan de vol (Flight Plan) ;

DAH6382 – IS:identification de l'aéronef « Air Algerie 6382 »– règle et type de vol « vol IFR et régulier »;

AT72 / M – S / C: type d'aéronef « ATR72 »/ catégorie de turbulence de sillage « turbulence moyenne» – équipements « S pour équipement disponible selon la route et C pour le transpondeur en mode C »

DAOO1340:Aérodrome de départ « Oran » heure estimée de départ du poste de stationnement (EOBT) « à 13 h 40 min GMT»

N0270: vitesse de croisière en noeud de 270 Kt.

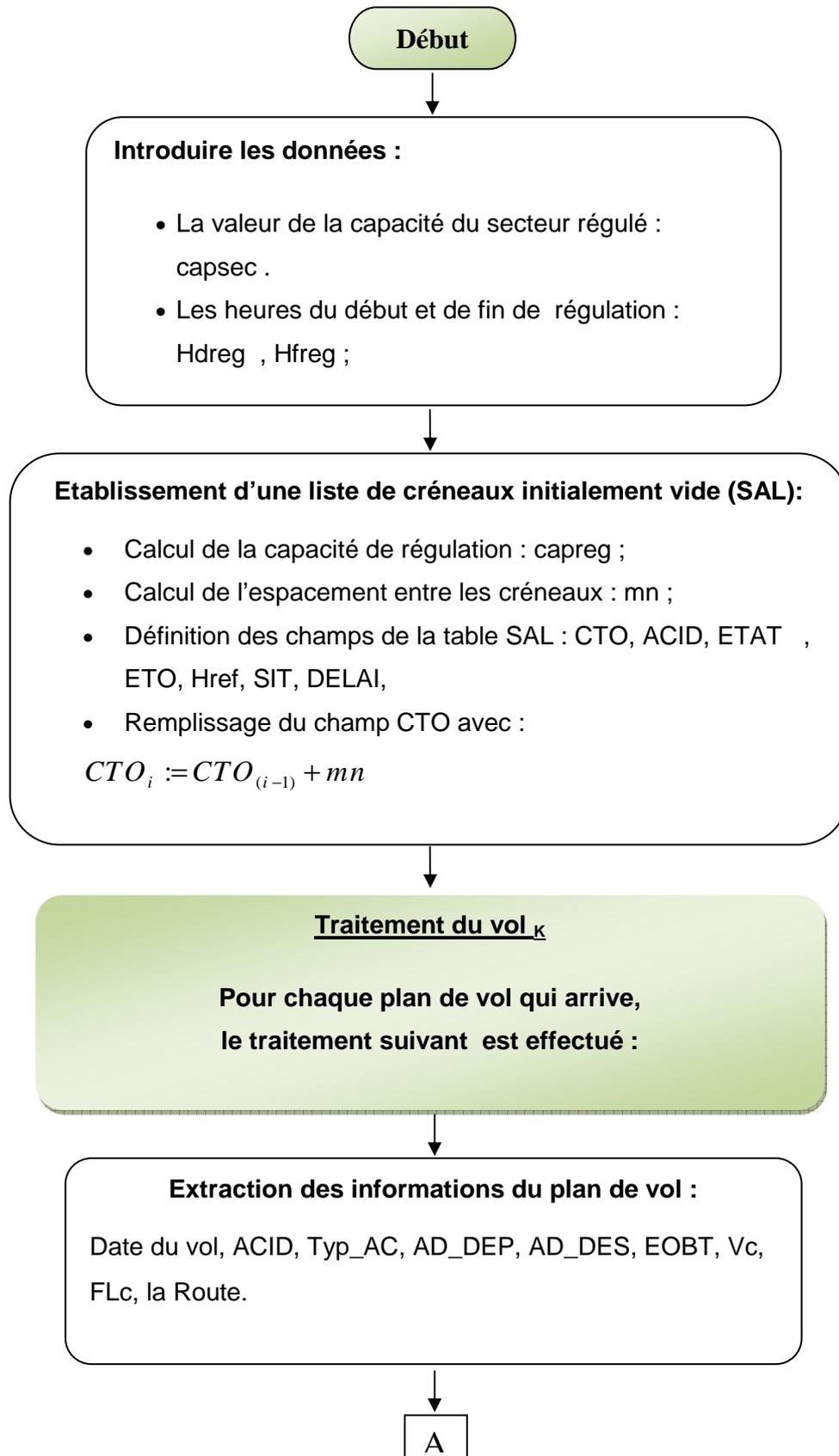
F190:le niveau de croisière demandé FL190.

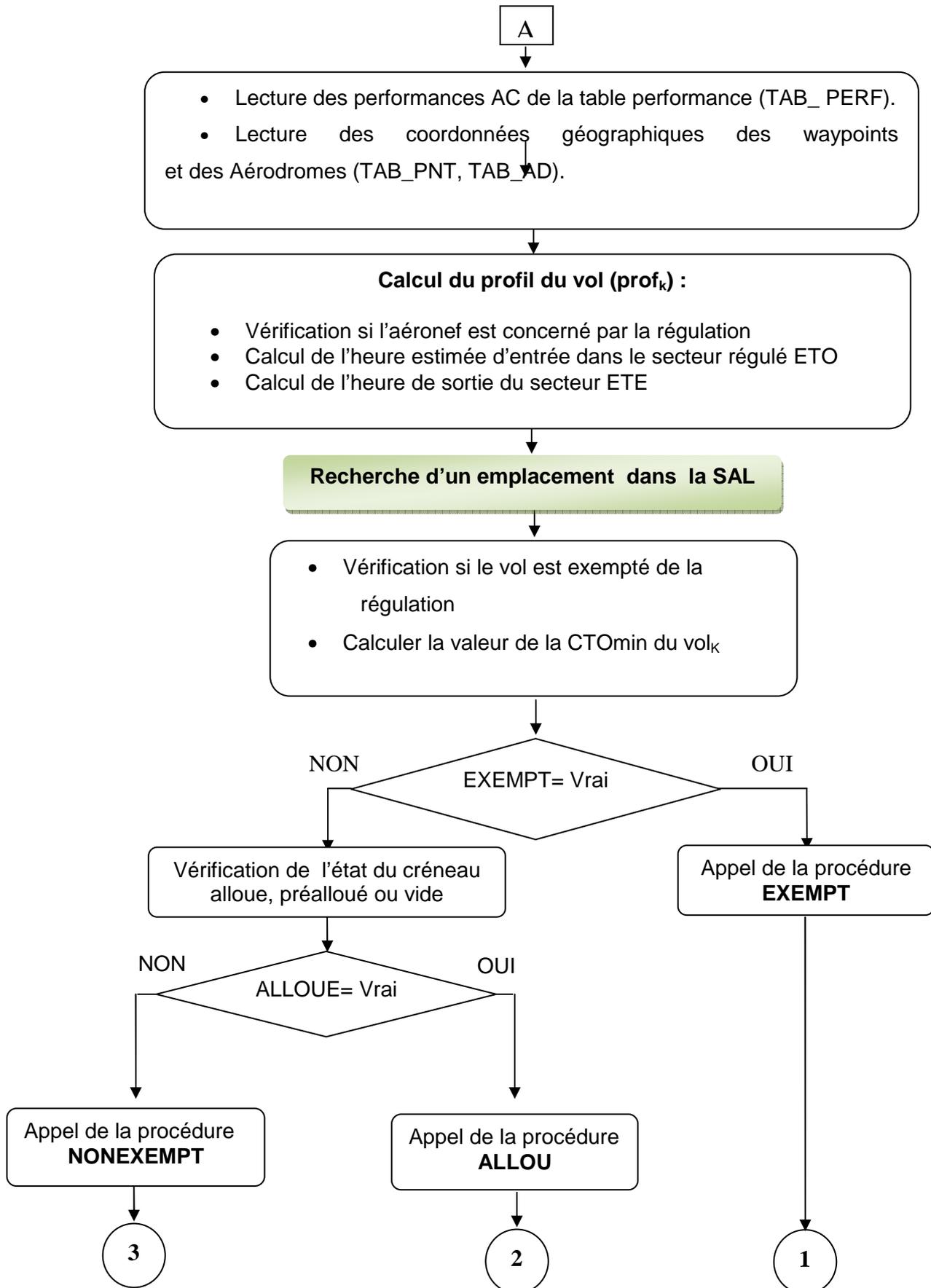
ORA GOMRI BAY SAKNA GHA BISSA HME:la route à suivre (succession de points significatifs)

DAUH0150:Aérodrome d'arrivée « Hassi Messaoud » la durée totale de vol estimée est 01 h 50 min.

DAUG DAOO:Aérodromes de dégagement « Ghardaia et Oran ».

4.5. L'Organigramme de calcul





1

Procédure EXEMPT

Vérification de l'état du créneau. Trois cas se présentent :

1. Créneau Alloué :

Appel de la procédure **EXEMPT** pour la recherche d'un emplacement (créneau) au vol_k dans un intervalle d'une heure.

2. Créneau Préalloué :

Le vol_k prend la place d'un vol en état préalloué, et appel de la procédure **NONEXEMPT** pour la recherche d'un créneau au vol_{k-1}

3. Créneau Libre :

Insertion du vol_k dans cet emplacement.

2

Procédure ALLOU

- Calcul de la borne inférieure avec :
 $B_i = CTO_{min} - 5mn.$
- Vérification de l'état du créneau. Trois cas se présentent :

1. Créneau Alloué :

Appel de la procédure **ALLOU** afin de rechercher un emplacement (créneau) pour le vol_k.

2. Créneau Préalloué :

Vérification des ETO pour les vols k et k-1. Le vol qui possède l'ETO la plus faible prend ce créneau. Pour le vol qui reste, appel de la procédure **NONEXEMPT** pour lui rechercher un créneau.

3. Créneau Libre :

Insertion du vol_k dans cet emplacement.

3

Procédure NONEXEMPT

Vérification de l'état du créneau. Trois cas se présentent :

1. Créneau Alloué :

Appel de la procédure **NONEXEMPT** pour la recherche d'un emplacement (créneau) au vol_k.

1. Créneau Préalloué :

Vérification des ETO des deux vols, le vol_k et le vol_{k-1}. Le vol qui possède l'ETO la plus faible prend ce créneau. Pour le vol qui reste, appel de la procédure **NONEXEMPT** pour la recherche d'un créneau.

2. Créneau Libre :

Insertion du vol_k dans cet emplacement.

4.6. Conception détaillée. Présentation de l'application

4.6.1. Modèle physique de données

Tableau 4.7 : Table Aéroport. TAB_AD

Champ	Type	Taille	Description
CODE_AD	A	4	Code OACI de l'aéroport
NOM_AD	A	30	Dénomination de l'aéroport
TT_AD	N		Temps moyen de roulage
TYPE_AD	A	15	National ou International

Tableau 4.8 : Table performances aéronefs. TAB_PERF

Champ	Type	Taille	Description
TYP_AC	A	7	Type d'aéronef
FLi	A	5	Niveau de vol
VMi	A	5	Vitesse de montée au FL considéré
VCi	A	5	Vitesse de croisière au FL considéré
VDi	A	5	Vitesse de descente au FL considéré
TMi	A	5	Taux de montée au FL considéré
TDi	A	5	Taux de descente au FL considéré

Remarque :

L'indice i représente le numéro du niveau, il va de 1 à 10

Tableau 4.9. Table des routes ATS. TAB_ATS

Champ	Type	Taille	Description
IND_ROUTE	A	5	Indicatif de la route ATS
COD_PNT	A	50	Les points constituant la route ATS

Tableau 4.10 : Table points significatifs. TAB_PNT

Champ	Type	Taille	Description
COD_PT	A	5	Le code du point significatif
LAT_DEG	N		La latitude du point en degrés
LAT_MIN	N		La latitude du point en minutes
LAT_SEC	N		La latitude du point en secondes
LAT_ORIENT	A	1	L'orientation
LONG_DEG	N		La longitude du point en degrés
LONG_MIN	N		La longitude du point en minutes
LONG_SEC	N		La latitude du point en secondes
LONG_ORIENT	A	1	L'orientation

Tableau 4.11 : Table profil de vol. TAB_PROF

Champ	Type	Taille	Description
ACID	A	7	Identification de l'aéronef
ADEP	A	4	Aérodrome de départ
ADES	A	4	Aérodrome de destination
EOBT	T		Heure estimée de départ du poste de stationnement
ETO	T		L'heure estimée d'entrée secteur régulé
EXEMPT	L	1	Si le vol est exempté de la régulation ou pas

Tableau 4.12 : Table liste des créneaux. TAB_SAL

Champ	Type	Taille	Description
CTO	T		L'heure calculée d'entrée secteur régulé
ACID	A	7	L'identification de l'aéronef
Href	T		L'heure de référence
ETAT	A	15	L'état du créneau
SIT	T		Slot issue time
CTOT	T		L'heure calculé du décollage
DELAI	N		La valeur du retard attribuée au vol

4.6.2. Les fonctions

Elles sont de deux types :

- Les fonctions liées à la base de données.
- Les fonctions de calcul et d'affichage des résultats.

4.6.2.1. Les fonctions liées à la base de données

On retrouve toutes les fonctions classiques de saisie, modification, suppression, consultation et impression des paramètres de mise à jour des données...etc

4.6.2.2. Les fonctions de calcul et d'affichage des résultats

- Le calcul du profil en 4 dimensions de tous les vols ;
- Le calcul des ETO pour le secteur régulé pour chaque vol ;
- Détermination des vols concernés ;
- Représentation graphique de la charge horaire ;
- Calcul de la CTOT pour chaque vol ;
- Calcul du délai pour chaque vol ;
- La fourniture d'une liste SAL donnant, pour le secteur et la période de régulation considérés, la liste des vols, les CTOT pour les vols régulés, ainsi que l'état de chaque vol (pré-alloué ou alloué).

4.6.3. Présentation de l'interface

Sur l'image ci-dessous, vous voyez la fenêtre principale. Cette fenêtre comprend deux menus : Fichier, et Traitement. Nous allons les détailler :

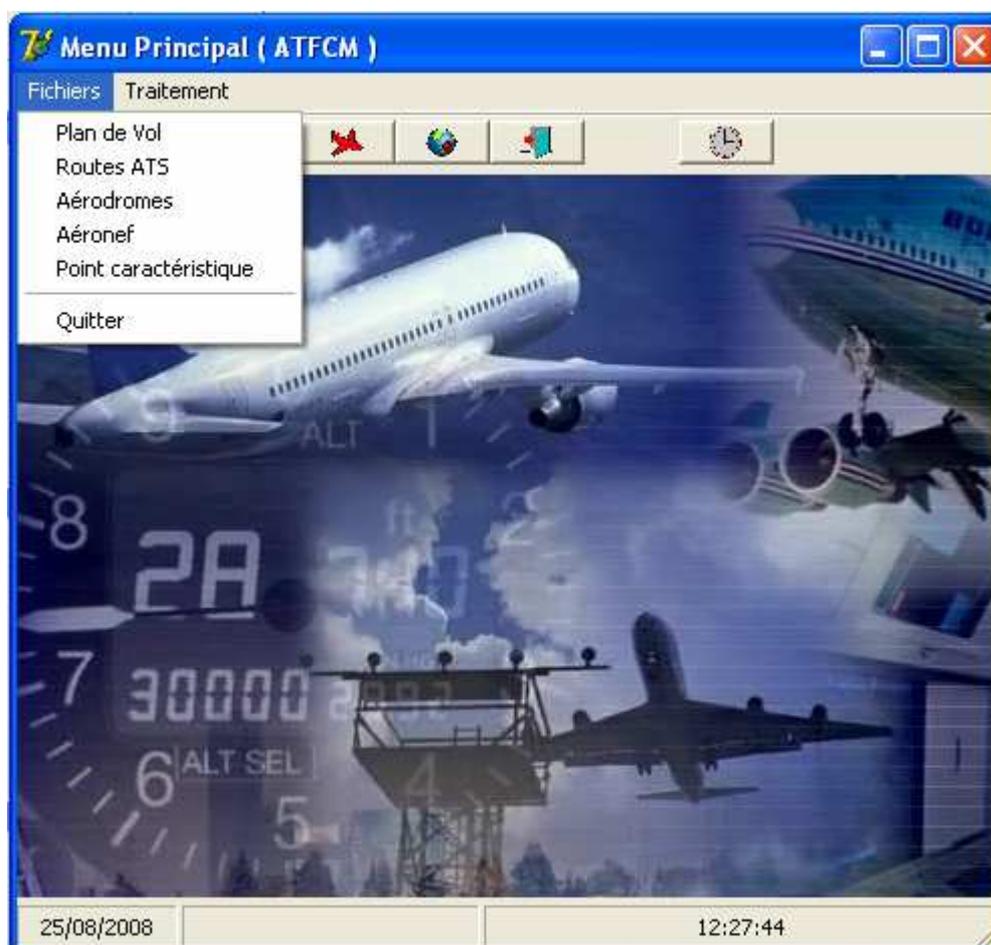


Figure 4.1. Présentation de la fenêtre principale.

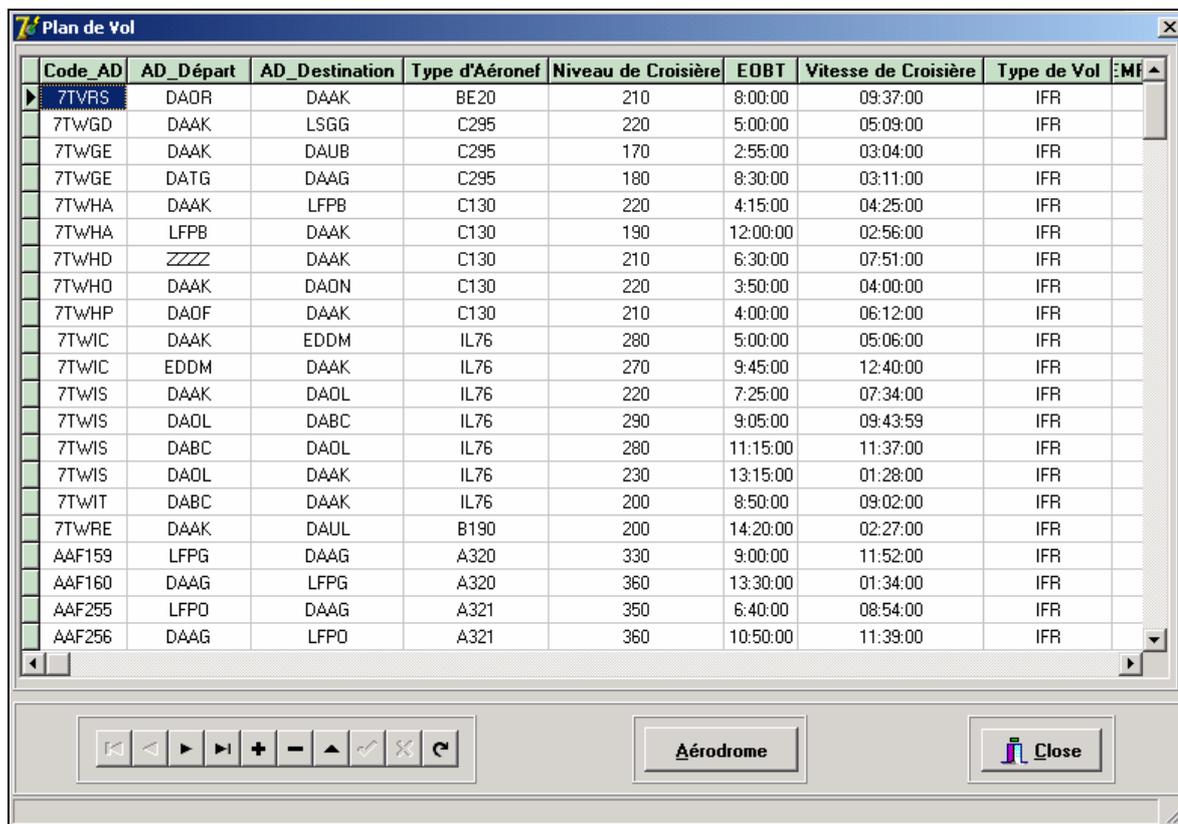
4.6.3.1. Fichier

Ce menu permet d'effectuer les opérations de mise à jour des données : Ajout, Suppression et Modification. L'utilisateur n'a plus qu'à saisir les données et enregistrer les changements. Avant l'insertion d'un nouvel enregistrement, une vérification est effectuée. S'il n'y a pas de correspondance, les informations seront ajoutées.

Prenons comme exemple d'illustration, la mise à jour des plans de vol :

4.6.3.1.1. Mise à jour « Plan de vol »

Pour l'ajout d'un enregistrement, une vérification est effectuée sur les données plans de vol afin d'éviter des doublons.



Code_AD	AD_Départ	AD_Destination	Type d'Aéronef	Niveau de Croisière	EOBT	Vitesse de Croisière	Type de Vol	MF
7TVRS	DAOR	DAAK	BE20	210	8:00:00	09:37:00	IFR	
7TWGD	DAAK	LSGG	C295	220	5:00:00	05:09:00	IFR	
7TWGE	DAAK	DAUB	C295	170	2:55:00	03:04:00	IFR	
7TWGE	DATG	DAAG	C295	180	8:30:00	03:11:00	IFR	
7TWHHA	DAAK	LFPB	C130	220	4:15:00	04:25:00	IFR	
7TWHHA	LFPB	DAAK	C130	190	12:00:00	02:56:00	IFR	
7TWHHD	ZZZZ	DAAK	C130	210	6:30:00	07:51:00	IFR	
7TWHO	DAAK	DAON	C130	220	3:50:00	04:00:00	IFR	
7TWHP	DAOF	DAAK	C130	210	4:00:00	06:12:00	IFR	
7TWIC	DAAK	EDDM	IL76	280	5:00:00	05:06:00	IFR	
7TWIC	EDDM	DAAK	IL76	270	9:45:00	12:40:00	IFR	
7TWIS	DAAK	DAOL	IL76	220	7:25:00	07:34:00	IFR	
7TWIS	DAOL	DABC	IL76	290	9:05:00	09:43:59	IFR	
7TWIS	DABC	DAOL	IL76	280	11:15:00	11:37:00	IFR	
7TWIS	DAOL	DAAK	IL76	230	13:15:00	01:28:00	IFR	
7TWIT	DABC	DAAK	IL76	200	8:50:00	09:02:00	IFR	
7TWRE	DAAK	DAUL	B190	200	14:20:00	02:27:00	IFR	
AAF159	LFPG	DAAG	A320	330	9:00:00	11:52:00	IFR	
AAF160	DAAG	LFPG	A320	360	13:30:00	01:34:00	IFR	
AAF255	LFPO	DAAG	A321	350	6:40:00	08:54:00	IFR	
AAF256	DAAG	LFPO	A321	360	10:50:00	11:39:00	IFR	

Figure 4.2. La Fenêtre de Mise à jour des Plans de Vols.

4.6.3.2. Traitement- Allocation de créneau

Cette fenêtre permet, selon le choix effectué : Recherche Automatique ou Recherche Manuelle, de régler, toute en respectant les critères présentés dans le chapitre 3, les vols sélectionnés de « la Table profil de vol » et de les insérer dans « la Table SAL ».

The screenshot shows the ATFCM 'Profil des vols' window. It features a table of flight profiles with columns: ACID, AD_DEP, AD_DEST, EOBT, ETO, EXEMPT, TYP_VOL, TYP_AC, LEVEL, PNT_ENT, PNT_EXT, and ETE. Below the table are search options: 'Recherche Automatique' (selected) and 'Recherche Manuelle', along with a 'Recherche Créneau' button. Other buttons include 'Données', 'Initialiser', 'Stat', and 'Graph'. A 'Close' button is at the top right.

ACID	AD_DEP	AD_DEST	EOBT	ETO	EXEMPT	TYP_VOL	TYP_AC	LEVEL	PNT_ENT	PNT_EXT	ETE
DAH1003	LFIG	DAAG	10:24:59	12:34:00	True	IFR	A332	370	BUYAH	ALR	12:47:00
RYR6436	LEVC	LMML	10:30:00	11:25:00	True	IFR	B738	370	LUXUR	PAGRE	11:37:00
DAH1044	DAAG	LFBO	10:35:00	11:39:00	False	IFR	B738	360	ALR	SADAF	10:54:00
AAF256	DAAG	LFPO	10:50:00	11:39:00	False	IFR	A321	360	ALR	PECES	11:13:50
DAH6649	DAUH	DAAG	10:50:00	11:39:59	False	IFR	B736	280	BSA	ALR	12:16:00
DAH6002	DAAG	DABB	11:00:00	11:39:00	False	IFR	A172	170	ALR	BJA	11:37:00
DAH6113	DA00	DAAG	11:05:00	11:36:00	False	IFR	A172	150	DAHRA	ALR	11:56:50

CTO	ACID	ETAT	ETO	SIT	Href	Delai	EOBT	CTOmin	CTOT	ETE	EXEMPT
11:40:00	DAH1044	Préalloué	11:39:00	8:35:00	11:40:00	0:00:00	10:35:00	11:40:00	10:45:00	10:54:00	False
11:42:00	DAH1137	Alloué	11:41:00	8:15:00	11:42:00	0:00:00	10:15:00	11:42:00	10:25:00	12:00:00	True
11:45:00	AAF256	Préalloué	11:39:00	8:50:00	11:45:00	0:00:00	10:50:00	11:40:00	11:00:00	11:13:59	False
11:47:00	DAH4007	Alloué	11:46:00	8:20:00	11:47:00	0:00:00	10:20:00	11:47:00	10:30:00	12:08:00	True
11:50:00	AFR878	Alloué	11:49:00	7:55:00	11:50:00	0:00:00	9:55:00	11:50:00	10:05:00	12:11:00	True
11:52:00	AAF159	Alloué	11:52:00	7:00:00	11:52:00	0:00:00	9:00:00	11:52:00	9:10:00	12:05:00	True
11:55:00	DAH6002	Préalloué	11:39:00	9:00:00	11:55:00	0:15:00	11:00:00	11:40:00	11:25:00	11:37:00	False
11:57:00	DAH6649	Préalloué	11:39:59	8:50:00	11:57:00	0:17:00	10:50:00	11:40:00	11:17:00	12:16:00	False

Figure 4.3. Présentation de la fenêtre de Régulation.

4.6.4. Présentation des résultats obtenus

Les données du trafic aérien utilisées sont les données de l'espace aérien Algérien. Nous avons pris un échantillon de 179 vols (entre 00h et 17h) de la journée du Mardi 13 Août 2008. Voici les résultats que nous avons obtenus après traitement :

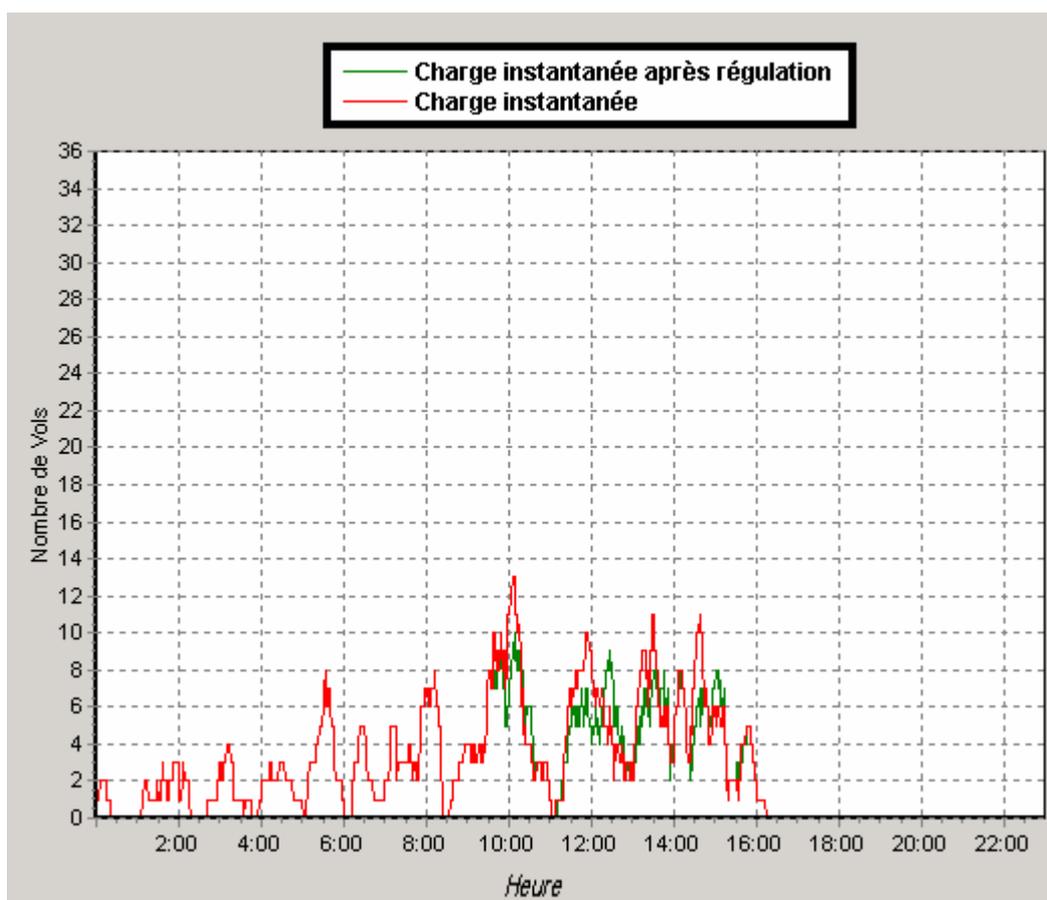


Figure 4.4. Graphe comparatif de la charge instantanée du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30).

« Trafic Réel », secteur TMA centre Alger

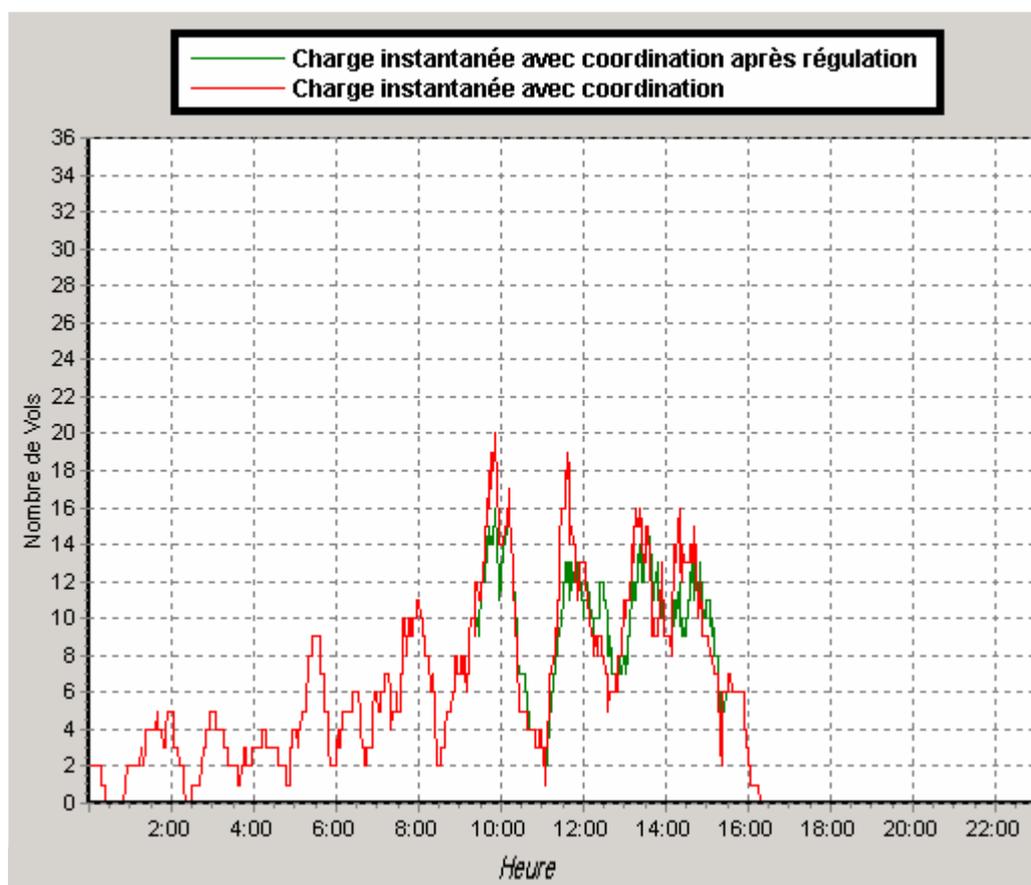


Figure 4.5. Graphe comparatif de la charge instantanée du trafic aérien avec coordination avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30).

« Trafic Réel », secteur TMA centre Alger

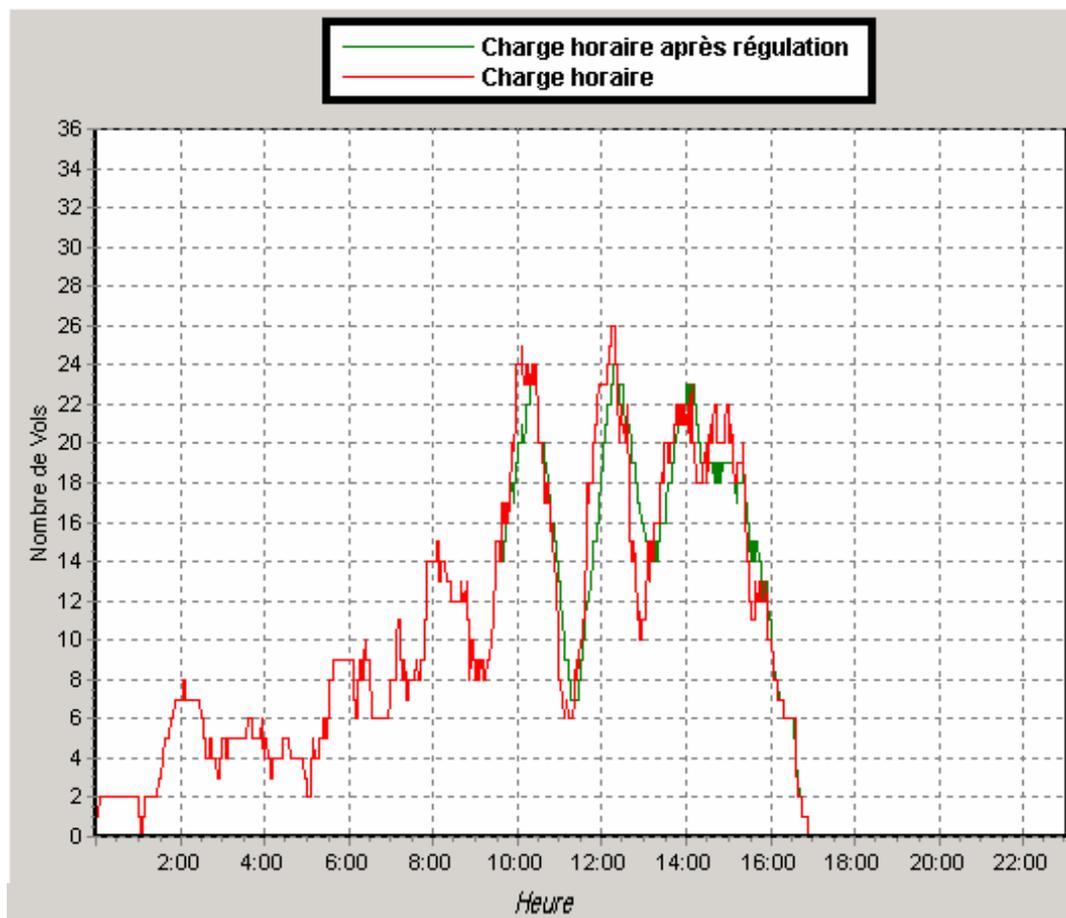


Figure 4.6. Graphe comparatif de la charge Horaire du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h30 et 15h30).

« Trafic Réel », secteur TMA centre Alger

4.6.5. Commentaires des résultats

Du fait que la charge instantanée du trafic ne peut représenter la charge que subit réellement le contrôleur, mais donne juste une idée sur le nombre de trafic réellement présent au même moment dans le secteur, nous avons représenté aussi la charge instantanée du trafic aérien avec coordination. Cette dernière prend en considération la charge de travail induite par la coordination en la matérialisant par un temps d'occupation fictif du secteur rendant compte de l'effort mental du contrôleur à intégrer un vol avant le franchissement des limites du secteur sous sa juridiction, et se termine après un certain moment du transfère de contrôle au secteur suivant. Ce temps de présence dans le secteur est donc la somme du temps de coordination et du temps de traversée (présence réelle dans le secteur).

Ainsi, la charge occasionnée par le trafic aérien est plus importante que si on ne considère pas la coordination, ce qui est bien représenté par les deux graphes 4.4 et 4.5 de la charge instantanée sans coordination et la charge instantanée avec coordination respectivement.

En comparant les courbes de la charge instantanée du trafic aérien avant et après régulation, on peut dire que la régulation permet de diminuer le nombre du trafic présent simultanément, et de réduire ainsi le niveau de stress occasionné.

Etant donné que la régulation se fait par rapport à la charge horaire, puisqu'elle prend en considération plusieurs facteurs en plus de la coordination, on remarque dans le graphe 4.6, 3 principales pointes de trafic (qui peuvent être représenté par deux sous périodes de régulation): la première entre 09h30 et 11h00, la deuxième entre 12h00 et 15h30. On considère que la capacité déclarée du secteur TMA centre est de 24 aéronefs par heure.

Avant la régulation, le nombre d'aéronefs prévus dans le secteur devrait atteindre un maximum de 25 aéronefs dans la première période, 26 aéronefs dans la deuxième période. Ainsi, l'Attribution des créneaux aux départs des aéronefs concernés permet d'étaler la demande du trafic prévu dans le temps et d'éliminer les surcharges ce qui est représentée par la deuxième courbe (charge horaire après régulation).

Remarque

Avec le volume de trafic actuel, les contrôleurs de la circulation aérienne au niveau du CCR Alger arrivent à bien gérer ces situations de surcharge, en appliquant plusieurs mesures pour éliminer les pointes de trafic: le contrôleur en charge du secteur lance par exemple une procédure qui précise l'intervalle entre deux décollages (par exemple un départ chaque 10 minutes) ou encore le nombre d'aéronefs admis par intervalle de temps « taux d'acceptation », décider des dégroupements des secteurs regroupés, renforcer le personnel en poste, faire espacer les aéronefs en demandant à certains de réduire leurs vitesses en vol ou de faire des attentes en route...etc.

Du fait que le volume du trafic n'est pas très important (délai moyen par vol régulé est de 02mn 41 s, délais par vol retardé est 11 mn 57 s, délais max est 22 mn, le pourcentage des vols retardés est de 22,5%), il n'existe pas de nécessité pour l'implémentation de mesures de régulations automatiques. Cependant, compte tenu de l'évolution de la demande de trafic (augmentation annuelle entre 3,5% et 4,5%) le système de contrôle en Algérie ne sera plus en mesure de prendre en charge tout le trafic aérien prévue au cours des prochaines années, sans avoir recours à une restructuration de l'espace aérien, l'introduction de nouveaux moyens et de nouvelles procédures de contrôle, ou la régulation automatique du trafic en surcharge. Une projection de croissance de 4% vers 2015 donne 31.59 % d'augmentation de trafic ce qui revient à avoir 236 vols (57 aéronefs supplémentaires) pendant la même période. En rajoutant les 57 vols supplémentaires selon une distribution proportionnelle on obtient les résultats suivants :

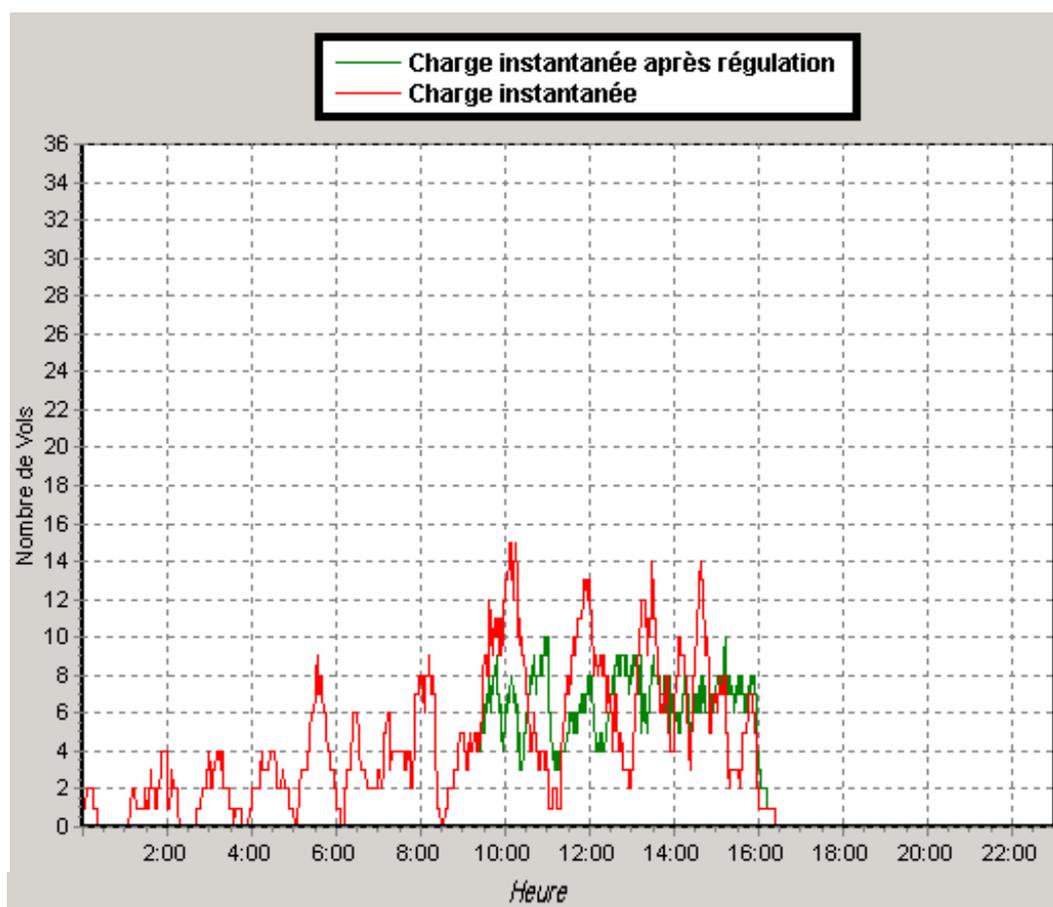


Figure 4.7. Graphe comparatif de la charge instantanée du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h00 et 16h00).

« Trafic Anticipé », secteur TMA centre Alger

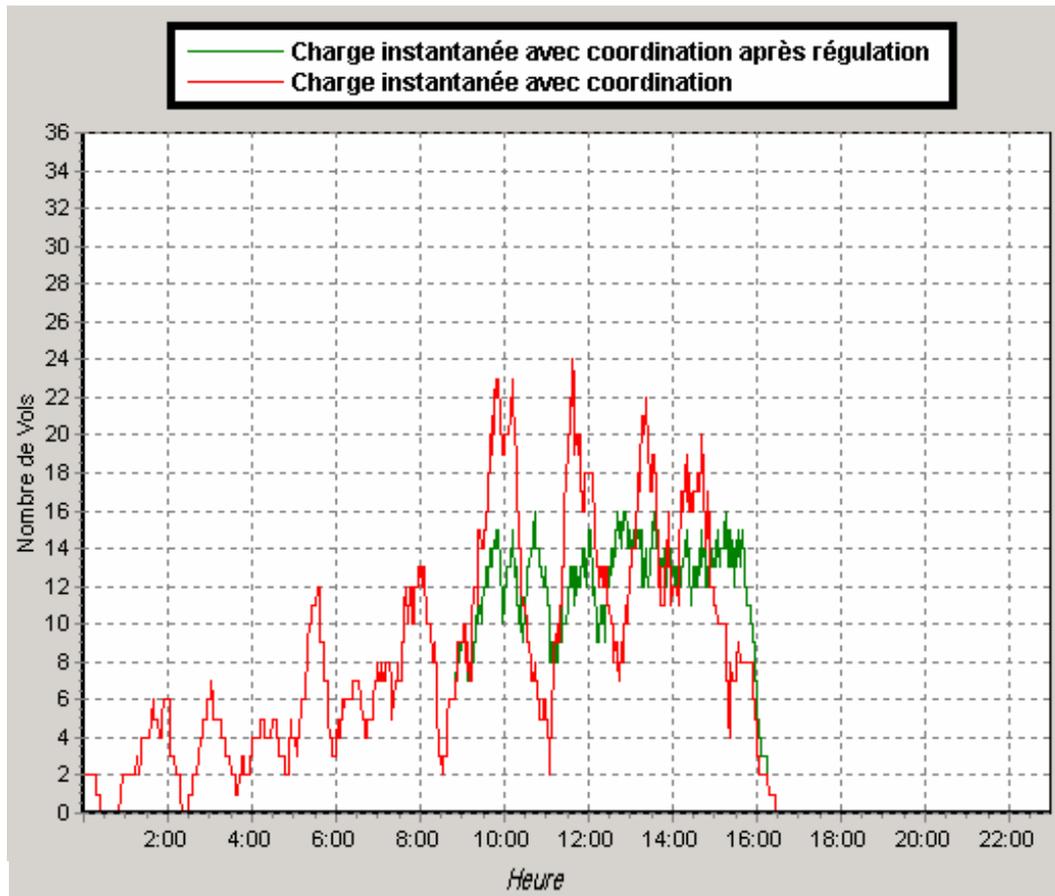


Figure 4.8. Graphe comparatif de la charge instantanée du trafic aérien avec coordination avant et après régulation (entre 09h00 et 16h00).

«Trafic Anticipé», secteur TMA centre Alger

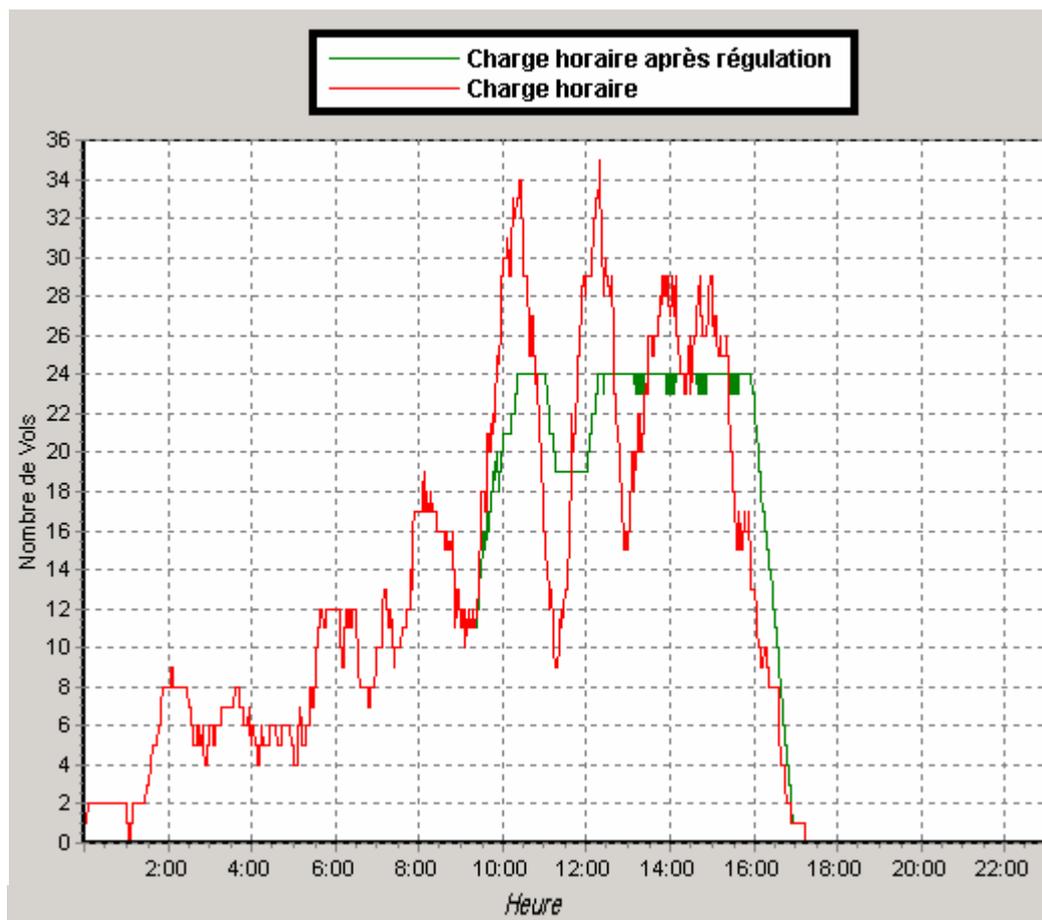


Figure 4.9. Graphe comparatif de la charge Horaire du trafic aérien avant et après régulation (entre 09h00 et 16h00).

« Trafic Anticipé », secteur TMA centre Alger

Il est clair qu'avec ce trafic (délai moyen par vol régulé est de 13 mn 39 s, délais par vol retardé est de 30 mn 22 s, délais max est 50 mn, pourcentage de vols retardés est 45%), l'espace aérien Algérien ne sera plus en mesure de satisfaire toute la demande de trafic. Aussi, à défaut de la restructuration de l'espace aérien Algérien, l'introduction de nouveaux moyens et de nouvelles procédures (ex : RADAR, coordinations automatiques ...), l'implémentation des mesures de régulation automatiques devrait être nécessaire, et à plus long terme (même avec les dernières technologies), elle est une issue obligatoire pour éliminer la congestion des secteurs de contrôle.

Remarques

- La régulation ATFCM au sol devrait être appliquée principalement lorsque la demande est bien au dessus de la capacité de 10% ou plus. Dans le cas contraire, l'utilisation de telles mesures ne permet pas de diminuer les surcharges et génère des retards superflus. Ainsi, lorsque la demande dépasse fortement la capacité, la politique de retard au sol devient plus efficace. Cela s'explique par le fait que le nombre de créneaux libre (non utilisés) dans la SAL est moins important, ce qui permet une utilisation optimale de l'espace aérien. A cet effet, un dépassement de capacité $< 10\%$ ne nécessite pas le déclenchement de la régulation.

- A noter que les valeurs utilisées dans les deux exemples (trafic réel et trafic anticipé), à savoir : l'échantillon de trafic aérien, la capacité du secteur régulé et la période de régulation (les heures de début et de fin de la régulation), ont été introduites juste pour test afin de montrer la complexité du phénomène de congestion. Ainsi, pour plus de précision il y a lieu d'introduire une valeur exacte de la capacité du secteur. de plus, la détermination de la période de régulation devrait se faire en phase pré-tactique d'exécution des opérations ATFCM en se basant sur des études statistiques de trafic aérien.

CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire nous a permis d'étudier la problématique de la congestion des secteurs de contrôle en route ainsi que la solution envisagée : « la régulation des flux de trafic aérien par l'Allocation des Créneaux au Départ ». Nous avons proposé un Algorithme de calcul qui permet de retarder les vols impliqués dans les secteurs surchargés (sauf vols exemptés) afin de respecter les capacités des secteurs de contrôle en route. Nous avons évalué la fiabilité de notre processus à travers des tests sur un trafic réel appliqué aux secteurs AI/AS du Centre de Contrôle Régional d'Alger, et nous avons démontré que cette approche permet bien d'étaler la demande de trafic dans le temps et éviter ainsi la surcharge des secteurs, ou du moins limiter l'ampleur de ce phénomène.

Bien qu'actuellement le système de contrôle en Algérie supporte assez bien la charge de trafic (les contrôleurs aériens arrive à gérer avec plus ou moins de difficulté l'espace aérien sous leur responsabilité) mais dans un avenir qui semble de plus en plus proche, la charge de trafic peut atteindre un point nécessitant des améliorations significatives dans le système de gestion des flux aériens : soit par la restructuration de l'espace aérien, l'utilisation de nouveaux moyens et de nouvelles procédures ou la Régulation du trafic aérien.

Il y a lieu de noter que durant la période (99/02) où la compagnie Khalifa Airways activait, la surcharge de l'aéroport d'Alger Houari Boumediene était telle qu'il a été décrété Aéroport coordonné et où a été appliqué une régulation des flux d'arrivé et départ de même qu'une optimisation de l'utilisation des espaces aux niveaux des parking a imposé une répartition des stationnements des aéronefs de nuit sur plusieurs aéroports nationaux. Ceci pour appuyer la thèse que l'Algérie aura dans un proche avenir a se penche sur la gestion de la capacité de l'espace aérien au niveau de centraux axes Nord/Sud pour le trafic de survol et même de certains aéroports particulièrement celui d'Alger Houari Boumediene.

PERSPECTIVES

L'utilisation de notre application au niveau du centre de contrôle régional d'Alger peut résoudre le problème de congestion des secteurs de contrôle en route. Cependant, la qualité de l'application est loin de rivaliser avec des systèmes comme ceux du CFMU, mais c'est une première approche et elle mérite d'être développée. Elle peut éventuellement être améliorée :

Les critères choisis pour le calcul des créneaux sont élémentaires et peuvent être développés pour minimiser les délais, on peut par exemple choisir d'autres critères d'optimisation : par rapport au type d'appareil, la distance à parcourir, le nombre de passagers, le délai par vol ou le délai moyen ... etc. La prise en considération de ces critères augmente sensiblement la complexité de l'algorithme et une grande technicité dans les domaines de la recherche opérationnelle et de l'informatique est requise.

Aussi les mesures de régulation devraient être transmises aux opérateurs aériens et leurs exécutions nécessitent un échange de messages et des traitements associés (trop complexe pour être implémenté dans notre application).

Par ailleurs, un vol peut passer par plusieurs secteurs régulés « vol combiné », dans ce cas, on calcule le créneau uniquement en fonction du secteur qui "induit le plus grand retard" et on impose ce retard dans les autres secteurs traversés par ce vol, cette technique ne garantit pas une optimisation globale, de plus, la gestion des régulations multiples est un problème complexe et les solutions doivent être recherchées de manière globale pour être optimales, l'utilisation de la programmation par contrainte semble très prometteuse dans ce domaine pour la recherche d'un optimum global. Le problème d'allocation des créneaux ne se fait pas plus en considérant les secteurs un à un mais en regardant l'ensemble du problème et les répercussions éventuelles sur tous

les secteurs (approches et aérodromes compris). Ainsi la régulation des flux de trafic entre dans la catégorie des problèmes combinatoires (domaine de la recherche opérationnelle), de ce fait, il peut y avoir une multitude de solutions.

La politique de retard au sol se heurte à des difficultés inséparables du problème et qui ne pourront pas être résolues par des gains de productivité ou par augmentation de la capacité mais qui nécessitent une évolution du mode de régulation, l'incertitude inhérente du système aérien est une limitation indépassable de la politique de retards au sol aussi la gestion des situations dynamiques d'exception (météo, défaillances techniques...) est peu compatible avec une régulation trop en amont. La solution à ces problèmes peut être l'ajout de nouveaux filtres de régulation agissant notamment sur les aéronefs en vol, avec un horizon de prévision très inférieur à ceux utilisés actuellement, ce qui permettrait de prendre des décisions avec des incertitudes plus réduites.

Enfin, la régulation des flux de trafic par allocation de créneaux au départ, reste qu'une seule facette de la décongestion des secteurs de contrôle, il est possible d'agir sur les vols en proposant des routes alternatives ou des blocs de niveaux pour éviter les secteurs surchargés, de ce fait, une solution globale prenant compte tous ces éléments aura un impacte meilleur sur la réduction des délais et l'augmentation du nombre de vols admissible au sein du système ATC.

Nous espérons que notre travail contribuera à l'amélioration du système ATC Algérien, et de ce fait réduira les surcharges des secteurs et améliorera la sécurité aérienne.

APPENDICE A

LISTE DES ABREVIATIONS

ACARS	: Airborne communication addressing and reporting system
ACC	: Centre de contrôle régional.
ADP	: Le plan journalier d'ATFCM.
ADS-B	: Système automatique dépendant de surveillance mode diffusion.
AIS	: Service d'Information Aéronautique.
AMAN	: Gestion des arrivées.
ANM	: Message de notification ATFCM.
AOs	: Les opérateurs aériens.
AR	: Route alternative.
ASM	: Gestion de l'espace aérien.
ASMGCS	: Systèmes de surveillance et de guidage au sol.
ATC	: Contrôle du trafic aérien.
ATFCM	: Gestion des flux de trafic aérien et de la capacité.
ATFMP	: Gestion des flux de trafic aérien.
ATS	: Services de la circulation aérienne.
CA	: Circulation aérienne.
CAG	: Circulation aérienne générale.
CASA	: Système Européen automatique d'allocation de créneau.
CDM	: La prise de décision en collaboration.
CEAC	: Conférence Européenne de l'aviation civile.
CEE	: Centre expérimental d'EUROCONTROL.
CENA	: Centre d'étude de la navigation aérienne.
CFMU	: Organisme centrale de gestion des flux de trafic aérien en Europe.
CNGE	: Cellule Nationale de Gestion de l'Espace aérien.
CNL	: Message d'annulation.
CPDLC	: Communication contrôleur pilote par liaison de donnée.

CTFMP	: Les problèmes de gestion centralisé et tactique des flux du trafic aérien.
CTMO	: Le concept de gestion centralisée de gestion du trafic aérien.
CTO	: Temps calculé d'entrée dans la zone régulée.
CTOT	: Temps calculé de décollage.
CVSM	: Minimums de séparation verticale conventionnelle.
DAAG	: Indicateur d'emplacement OACI pour l'aérodrome d'Alger Houari Boumediene.
DACM	: Direction de l'Aviation Civile et de la Météorologie.
D-GPS	: Système différentiel de positionnement globale par satellite.
DLA	: Message de retard.
DMAN	: Gestion des départs.
DME	: Equipement de mesure de distance.
EGSA	: Direction de gestion aéroportuaire.
ENAC	: Ecole Nationale de l'Aviation Civile.
EOBT	: Heure estimée de départ du poste de stationnement.
ETO	: Temps estimé d'entrée dans la zone régulée.
EUROCAE	: L'Organisation Européenne pour l'équipement.
FAA	: L'administration fédérale de l'aviation américaine.
FDR	: Centre de recherche des données de vol.
FIR	: Région d'information de vol.
FPFS	: Principe du Premier Arrivée Premier Servie.
FUA	: Concept d'utilisation flexible de l'espace aérien.
GHP	: Problèmes d'attente au sol.
GLONASS	: Système global de navigation par satellite russe.
GNSS	: Système global de navigation par satellite.
GPS	: Système global de positionnement par satellite.
HF	: Haute fréquence
IFR	: Vol aux instruments.
ISA	: Amélioration du modèle d'allocation de créneaux.
KHZ	: Kilo HertZ.
LC	: Changement de niveau de vol.
MAGHP	: Le problème d'attente au sol avec plusieurs aérodomes d'arrivée.

NDB	: Balise Non Directionnelle.
OACI	: Organisation de l'Aviation Civile Internationale.
ONM	: Office National de la Météorologie.
OPT	: OPTimale.
PLNE	: Programmation Linéaire en Nombre Entier.
RCO	: Réduction des surcharges cumulatives.
RNAV	: Navigation de surface.
RNP	: Qualité de navigation requise.
RR	: Reroutement
RSFTA	: Réseau du Service Fixe de Télécommunication Aéronautique
RVSM	: Réduction des Minimums de Séparation Verticale.
SAGHP	: Le problème d'attente au sol avec un seul aérodrome d'arrivée.
SAL	: Liste de créneaux.
SAM	: Message d'allocation de créneau.
SAP	: Problèmes d'allocation de créneaux.
SHAMAN	: Système pour l'aide, l'analyse et la surveillance des Ressources des centres de contrôle et du réseau aérien.
SID	: Départs normalisés aux instruments.
SSR	: Radar secondaire de surveillance.
STAR	: Arrivées standard aux instruments.
TACT	: Système TACTique.
TFMP	: Les problèmes de gestion de flux de trafic aérien.
TFMRP	: Les problèmes de gestion de flux de trafic aérien et de reroutement.
TMA	: Région terminale de contrôle.
TOT	: Temps de décollage.
TWR	: Tour de contrôle.
VDL	: Liaison de donnée VHF.
VFR	: Vol à vue.
VHF	: Très haute fréquence.
VOR	: Radiophare omnidirectionnel.

APPENDICE B

PRESENTATION GENERALE DU CONTROLE AERIEN

B.1. Introduction

Le contrôle de la circulation aérienne organise les flux de trafic afin d'assurer la sécurité des vols et d'améliorer la capacité du réseau de routes aériennes.

Pour permettre aux pilotes de se diriger dans l'espace, un certain nombre de balises radio (ADF, VOR, VOR-DME) ont été positionnées au sol. Ces balises émettent sur des fréquences répertoriées. Ainsi, le pilote est capable de connaître sa position relative par rapport au sol et de diriger l'aéronef de balise en balise jusqu'à sa destination finale.

D'autres moyens existent pour naviguer sans avoir recours aux aides à la navigation, comme l'utilisation du RADAR, du positionnement par centrales inertielles embarquées à bord de l'aéronef ou par GNSS dont le système le plus connu est le GPS.

B.2. Les régimes de vol [55]

Il existe deux sortes de régime de vol :

- Le vol à vue ou vol VFR (Visual Flight Rules) : il concerne les vols soumis à des conditions climatiques assez clémentes, ne nécessitant pas l'utilisation d'instruments considérables. Les aéronefs en VFR doivent assurer eux mêmes leur séparation les uns par rapport aux autres par des moyens visuels. Le vol à vue n'est soumis au contrôle que lorsqu'il évolue dans un espace aérien contrôlé de classe B ou C.
- Le vol aux instruments ou vol IFR (Instrument Flight Rules) : il concerne Les vols utilisent des instruments pour ce repérer dans l'espace et peuvent donc volés même si la visibilité est mauvaise (voir nulle).

De nos jours, les vols commerciaux constituant l'essentiel du trafic aérien et doivent obligatoirement évolués conformément aux règles de vol aux instruments. Ainsi, le vol à vue concerne un nombre limité de vols (souvent des vols de loisir) à de basses altitudes (même si la réglementation autorise des vols VFR jusqu'au niveau F195, ils évolues la plus part du temps au dessous du niveau F100).

B.3. Les routes aériennes

Les aéronefs ne relient pas, généralement, l'aérodromes d'arrivée en route directe, mais suivent des routes prédéfinies. Celles-ci sont constituées d'une succession de tronçons orientés différemment, dont les extrémités correspondent souvent à des balises (moyens radioélectriques), elles-mêmes matérialisant le croisement des routes. Ces itinéraires ont été établis pour faciliter l'acheminement sûr, ordonné et rapide de la circulation aérienne, et accélérer la description de la route et des procédures à suivre lors des autorisations toute en réduisant les communications et la charge induite pour le pilote et le contrôleur.

Lors de la préparation de son vol, le pilote définit les balises qui caractérisent sa route, et lors du vol, il passe à la verticale de ces balises afin de confirmer sa position. Toutefois, comme il existe dans la plupart des pays un assez grand nombre de zones réservées aux militaires, il n'est souvent pas possible aux aéronefs de suivre le chemin le plus court. De plus, même s'il n'existait aucune contrainte de ce type empêchant chaque aéronef d'aller directement de son point de départ à son point de destination, le contrôleur de la circulation aérienne ne pourrait pas assurer un écoulement sûr et ordonné du trafic, car il a besoin des points de référence pour situer son trafic et empêcher les collisions. [55]

Plusieurs aéronefs peuvent emprunter la même voie aérienne en volant les uns au dessus des autres, à condition d'être espacés de 2000 pieds lorsqu'ils sont à un niveau de vol supérieure au F290 (ou F410 dans les région ou l'RVSM est appliqué), et espacés de 1000 pieds ailleurs.

B.4. Le plan de vol [1]

Pour aider les contrôleurs dans leur travail, les aéronefs ne peuvent pas voler n'importe comment. Ils sont tenus de suivre certains itinéraires. Cela permet d'avoir un trafic organisé, ce qui facilite beaucoup le travail des contrôleurs.

Avant d'entreprendre son vol un aéronef doit communiquer des renseignements aux services de la circulation aérienne. Pour cela, il doit déposer un plan de vol. Le plan de vol contient diverses informations, nous citons:

Champ 7 : Identification de l'aéronef ;

Champ 8 : Type et Règles de vol ;

Champ 9 : Nombre et Type d'aéronefs et catégorie de turbulence de sillage ;

Champ 10 : Equipements à bord ;

Champ 13 : Aéroport de départ et Heure estimée de départ ;

Champ 15: Vitesse et Niveau de croisière, Route à suivre ainsi que tout changement de vitesse, de niveau ou de régime de vol prévues durant le vol projeté;

Champ 16: Aéroport de destination, durée totale estimée et aéroports de décollage prévus.

Champ 18: Renseignements divers ;

Champ 19: Renseignements complémentaires ayant trait au service d'Alerte.

Les destinataires du plan de vol sont tous les organismes de contrôle nationaux et étrangers concernés par le vol, de l'aéroport de départ à l'aéroport de destination. Le plan de vol contient tous les renseignements du vol utiles à ces organismes afin d'assurer l'information, le contrôle et l'alerte si nécessaire.

Service d'Information
Service du Contrôle

FLIGHT PLAN PLAN DE VOL			
1. PRIORITY Précédence ←≡ FF →	2. ADDRESSEE(S) DESTINATION(S)		
4. FILING TIME Heure de dépôt	5. ORIGINATOR Expéditeur		
3. MESSAGE TYPE Type de message ←≡ (FPL)			
9. NUMBER Nombre	7. AIRCRAFT IDENTIFICATION Identification de l'aéronef	6. FLIGHT RULES Règles de vol	TYPE OF FLIGHT Type de vol
13. DEPARTURE AERODROME Aérodrome de départ	TYPE OF AIRCRAFT Type d'aéronef	WAKE TURBULENCE CAT. Cat. de turbulence de sillage	10. EQUIPMENT Équipement
15. CRUISING SPEED Vitesse croisière	LEVEL Niveau	TIME Heure	
16. DESTINATION AERODROME Aérodrome de destination			
TOTAL EST. Somme totale estimée HR. MIN.		ALT. AERODROME Aérodrome de décollage	2 nd ALT. AERODROME 2 ^e aérodrome de décollage
18. OTHER INFORMATION Renseignements divers			
19. SUPPLEMENTARY INFORMATION (NOT TO BE TRANSMITTED IN FPL MESSAGES) Renseignements complémentaires (À NE PAS TRANSMETTRE DANS LES MESSAGES DE PLAN DE VOL USUÉS)			
20. ENDORSEMENT Autonomie			

Service d'Information
Service d'Alerte

PERSONS ON BOARD Personnes à bord		EMERGENCY RADIO Radio de secours	
- E /	P /	U	V
SURVIVAL EQUIPMENT Équipement de survie		JACKETS/GILETS Gilets de sauvetage	
S / P	D	J	L
POLAR Polaire		LIGHT Lampes	
DESERT Désert		FLUORS Fluores	
MARITIME Maritime		U	
JUNGLE Jungle		V	
D	C		
NUMBER Nombre		COLOUR Couleur	
CAPACITY Capacité			
COVER Couverture			
AIRCRAFT COLOUR AND MARKINGS Couleur et marquages de l'aéronef			
REMARKS Remarques			
PILOT-IN-COMMAND Pilot(e) en commandement de bord			
FILED BY / Déposé par			
SPACE RESERVED FOR ADDITIONAL REQUIREMENTS Espace réservé à des fins supplémentaires			

Figure B.1. Formulaire plan de vol OACI.[1]

APPENDICE C

QUELQUES METHODES D'ESTIMATION DE LA CAPACITE

C.1. Méthode DORA [4]

C'est une méthode anglaise développée par le « Directorate of Operational Research and Analysis » de la CAA (Civil Aviation Authority). Elle se déroule en deux phases :

- 1). Caractérisation d'un secteur.
- 2). Calcul de chiffre de capacité.

C.1.1. Caractérisation d'un secteur

Chaque secteur possède ses propres caractéristiques. On mesure toutes les deux minutes la situation de la position du contrôleur. Cette mesure doit fournir un niveau de charge de la position complète choisi parmi quatre :

- A+ : saturé, aucun autre aéronef ne peut être accepté,
- A : Très chargé,
- A- : Occupé, sans difficulté particulière.
- B : Tous ce qui est en dessous de A-

Le niveau mesuré dépend donc d'une part de la complexité et de l'intensité du trafic, mais aussi de l'état du contrôleur.

C.1.2. Calcul de la capacité

Si on désigne par :

- X : le % du temps passé au niveau B.
- Y : le % du temps passé au niveau A-.
- Z : le % du temps passé au niveau A ou A+.

On peut relever le nombre de fois où chaque niveau a été observé ainsi que le nombre moyen d'aéronefs sous contrôle correspondant à ce niveau de charge. On se fixe un pourcentage de temps passé à une charge supérieure à un niveau donné et on cherche le taux horaire probable avec ce pourcentage : c'est le chiffre de capacité.

Initialement, cette recherche était basée sur une distribution statistique du type hypergéométrique (loi qui mesure la probabilité d'avoir une charge donnée, par exemple B, lorsqu'on examine un échantillon, en fonction des proportions X, Y et Z constatées et du temps moyen passé en fréquence). On lui préfère aujourd'hui une approche issue de la recherche opérationnelle, la théorie des files d'attente, qui permet de calculer la probabilité d'avoir n aéronefs dans le secteur en fonction d'une durée de service égale au temps moyen passé dans le secteur.

Les avantages de la méthode DORA sont multiples ; elle est la seule méthode qui se préoccupe de la charge supportée par le contrôleur et de sa répartition dans le temps. Elle est très bien acceptée par les contrôleurs du fait de leur participation active à l'élaboration d'un chiffre de capacité. En revanche, elle est très lourde et très coûteuse à mettre en œuvre car il faut mobiliser des contrôleurs pour relever l'état de la situation de l'unité de contrôle.

C.2. Méthode MBB [4]

Tout aéronef qui pénètre dans un espace contrôlé en IFR génère une certaine charge de travail pour le contrôleur qui s'occupe de cet espace. Cette charge peut être mesurée en unité de travail (**Units of Work**) selon le principe suivant : des aéronefs de performances comparables, ayant les mêmes intentions induisent en moyenne une quantité de travail identique.

Une échelle de ces quantités de travail a été établie dans les années 60, effectuant une recherche sur la mesure des charges de contrôle. Elle a ensuite été complétée et modifiée par MBB (Messerschmitt Bölkow Blohm).

C.2.1. Calcul de la capacité

De manière plus générale, si t est le temps de fréquence pour un aéronef, et r la proportion du temps passé à la fréquence, une UW nécessite t secondes.

Pendant une heure, un contrôleur peut traiter (à 100%)

$$\frac{3600.r}{t} \text{ UW/h} \quad (\text{D.1})$$

Si C_i est le coefficient de complexité relevé pour n_i aéronefs de même catégorie, le nombre d'UW est pour n aéronefs :

$$\frac{\sum n_j . c_j}{N} = \sum_i P_i . C_i \quad (\text{D.2})$$

Avec P_i la proportion d'aéronefs de complexité C_i .

La capacité d'un secteur est donc (à 100%) :

$$\frac{3600.r}{t . \sum_i P_i . C_i} \quad (\text{D.3.})$$

C.3. Méthode MBB simplifiée [34]

Si on appelle :

Q : la quantité de trafic pondérée, c'est-à-dire le nombre de minutes de contrôle cumulées pour tous les aéronefs traversant le secteur, mesurée heure,

C_i : le coefficient de complexité de la classe de trafic i ,

P_i : la proportion du trafic de classe i qui traverse le secteur,

T_i : le temps moyen de vol de ce trafic

Alors la capacité N se calcule ainsi :

$$N = \frac{Q}{\sum_i C_i . P_i T_i} \quad (\text{D.4})$$

Avec :

$Q=600$ mns ce qui est l'équivalent de 60 aéronefs stables traversant le secteur en 10 mns, et trois classes de trafic :

- Stable : $C1=1$,
- évolutif dans la même tranche d'espace : $C2=1.24$,
- Evolutif entre deux tranches d'espace : $C=1.62$,

La méthode MBB simplifiée induit une limitation supplémentaire qui concerne la saturation du contrôleur organique : le nombre de strips actifs ne doit pas excéder 15. Les résultats de calcul sont rassemblés sur des abaques qui sont des courbes paramétrées du type hyperbole. Cette méthode qui apparaît simple et cependant assez lourde à mettre en œuvre. En effet, il est très difficile de mesurer des temps de vol pour chaque classe de trafic.

Les coefficients dits de complexité ne tiennent pas compte des conflits de convergence mais uniquement du type d'évolution. Il n'existe pas dans cette méthode de lien entre la charge et la capacité.

C.4. Méthode MBB simplifiée affinée [34]

Cette méthode tient compte des situations de conflit, ce qui manquait à la MBB simplifiée. Les classes initiales (stable évolutifs dans la même couche et évolutifs inter-couches) sont conservées mais on y adjoint 3 sous classes qui correspondent aux cas de conflits, assorties des coefficients suivant :

- $C1=1$; avec conflit $Ck1=2.4$
- $C2=1.24$; avec conflit $Ck2=2.64$
- $C1=1.62$; avec conflit $Ck3=3.02$

On détermine ensuite les pourcentages $P1$, $P2$, $P3$, $Pk1$, $Pk2$, $Pk3$ et les temps moyens de vol $T1$, $T2$, $T3$, $Tk1$, $Tk2$, $Tk3$ pour chaque catégorie.

La capacité est donnée par la formule suivante :

$$N = \frac{600}{\sum_i C_i . P_i T_i + \sum_i C_{ki} . P_{ki} T_{ki}} \quad (D.5)$$

Cette méthode qui répond au vœu d'intégrer la complexité induite par les conflits n'est facilement applicable que sur une simulation. En effet, l'étude d'un secteur en temps réel ou avec des archives pour déterminer les pourcentages et les temps de chaque catégorie, serait très lourde et très coûteuse en temps et en personnel.

C.5. Méthode du débit moyen [34]

Elle se base sur la connaissance de deux facteurs moyens :

- la charge moyenne de trafic instantané acceptable sur une unité de contrôle (vols en contact + vols coordonnés).
- Le temps moyen de présence sur une unité de contrôle.

Elle se détermine ainsi :

$$capacité = \frac{\text{nombre d'aéronefs en compte}}{\text{Temps moyen de présence}} \quad (D.6)$$

Le nombre moyen d'aéronefs en compte a été fixé forfaitairement à 12, sachant que la distribution des arrivées dans un secteur occasionnera inévitablement des pointes de charge, malgré les efforts de régulation. C'est un nombre moyen qui doit pouvoir s'appliquer à tous les secteurs, il relève d'un consensus au sein du centre et semble donner satisfaction pour des calculs à priori qui seront ensuite validés sur des configurations et des flux réels par des calculs de fréquence et de durée de dépassement.

La difficulté principale de l'application de cette formule reste la connaissance du temps moyen de présence de l'aéronef dans le secteur. En fonction des statistiques de trafic qui fournissent des pourcentages des principaux flux et des longueurs des axes correspondant, on peut évaluer un temps moyen de traversée qui est ensuite corrigé en fonction des pourcentages estimés d'évolutifs dans la couche et entre deux couches. On lui ajoute enfin une estimation du temps moyen de coordination.

Bien que cette méthode offre l'énorme avantage de tenir compte de la nature du trafic en se basant sur des statistiques de fréquentation par axe, elle présente l'inconvénient de ne pas considérer la distribution des arrivées d'aéronefs dans le secteur, même si elle prévoit des marges pour les pointes de charge. La prise en compte d'un nombre moyen d'aéronefs qui restent en charge pendant un temps moyen, revient à dire qu'un secteur est alimenté par un flux constant d'aéronefs, sa capacité étant son débit. On ne sait donc pas quel niveau de charge sera induit sur le secteur, ni le temps pendant lequel il faut prévoir cette charge.

C.6 Les méthodes d'ajustement [34]

La validation statistique ne permet pas un calcul théorique à priori de la capacité d'un secteur, mais trouve son utilité dans le fait même qu'elle tient compte des conditions opérationnelles d'écoulement du trafic.

Les insuffisances de la méthode précédente (débit moyen), ont conduit à réfléchir à une méthode qui permettrait de valider un chiffre de capacité pour une configuration donnée. L'objet de cette méthode est donc une corrélation entre le trafic réel observé et le nombre d'unité de contrôles ouverts correspondants. Elle se fait sur une période et une configuration pour lesquelles on dispose de suffisamment d'observation. On en déduit, pour un nombre d'unité de contrôle ouverte, un coefficient d'utilisation en fonction des flux constaté.

On obtient ensuite un ensemble des courbes qui permettent des recherches des flux correspondant à un coefficient d'utilisation optimale. La démarche logique est de rechercher pour chaque configuration le flux qui offre à la fois un coefficient d'utilisation acceptable pour n unité de contrôle ouverte et faible pour $n+1$ unité de contrôle ouverte. Le coefficient d'utilisation est actuellement fixé à 40% (soit un dépassement de 60%). En fait pour réévaluer une capacité, on examine les dépassements des valeurs de flux. Si pour un flux donné on lit la valeur du coefficient d'utilisation 40%, cela signifie que ce flux a été dépassé pendant 60% du temps. On peut donc admettre cette valeur comme nouvelle valeur de capacité pour n unité de contrôle.

C.7. Méthode à posteriori [34]

Elle fonctionne par encadrement. Des mesures sur les périodes les plus chargées doivent permettre de dégager deux nombres :

- une borne supérieure pour une capacité secteurs groupés.
- Une borne inférieure pour une capacité secteurs dégroupés.

La borne sup : c'est la moyenne des nombres d'aéronefs passés pendant l'heure où le secteur a dégroupé. C'est donc le flux correspondant à un seuil de charge insupportable.

La borne inf: on relève l'heure où on a observé le plus de trafic sans dégroupé; la moyenne du nombre d'aéronefs passés est la borne inf. Ce chiffre correspond à une charge encor supportable, sinon, le secteur aurait été dégroupé.

Un groupe de travail au CRNA a appliqué cette méthode. Les écarts type ont été calculés pour mesurer la distribution des différentes moyennes. Dans la plupart des cas, les deux valeurs étaient très proches l'une de l'autre, et on a pu constaté que, en cas des régulations le dégroupement s'effectuait à un débit horaire plus important. il faut toutefois noter que dans certains cas, les dégroupements étaient liés on pas à une augmentation du trafic mais à l'activation des zones militaires.

L'avantage de cette méthode est qu'elle reflète bien ce que ressentent les contrôleurs. Hélas elle n'est applicable que pour des secteurs dégroupables, ce qui limite très vite on utilisation.

C.8. Méthode empirique [34]

C'est une application très simplifiée de la précédente (méthode à posteriori) utilisé en parallèle avec la MBB simplifiée. On recherche le flux passé dans l'heure précédent le dégroupement (ou la saturation). La capacité est ce nombre moins environ 5%.

REFERENCES

1. Doc OACI 4444 « Procédures pour les services de navigation aérienne. Gestion du trafic aérien » Quatorzième édition (2001).
2. Marianne Raffarain, « Le contrôle aérien en France : congestion et mécanismes de prix », Thèse d'Etat, Université de Paris-I – Panthéon-Sorbonne (Décembre 2002).
3. B. Rulleau & E. Montagne « Evaluation de l'intégration du concepts ATFM dans le travail des FMP », (septembre 2004).
4. Doc OACI 9426 « Manuel de planification des services de la circulation aérienne », (Décembre 1992).
5. Olivier RICHARD, « Régulation court terme du trafic aérien et optimisation Combinatoire- Application de la méthode de génération de colonnes », Thèse d'Etat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (Janvier 2007).
6. A.R. Odoni, «The flow management problem in air traffic control », volume F38 of ASI Series, p.269-288, (1987).
7. G. Andreatta, A.R. Odoni, and O. « Richetta, Models for the ground holding problem », In Scale Computation and Information Processing in Air Traffic Control, Transportation Analysis, (1993).
8. R. Hoffman, M.O. Ball, « A comparison of formulations for the single-airport ground holding problem with banking constraints », Technical Research Report, (Octobre 1997).

9. B. Kotnyek, O. Richetta, « Equitable models for the stochastic ground-holding problem under collaborative decision making », *Transportation Science*, Vol. 40, (Mai 2006).
10. V. Tasic, O. Babic, M. Cangalovic and D. Hohlacov, « Some models for en route air traffic flow Management », *Transportation Planning and Technology*, (1995).
11. V. Tasic, O. Babic, M. Cangalovic and D. Hohlacov, « A Model to Solve En Route Air Traffic Flow Management Problem: A Temporal and Spatial Case », *rapports du séminaire ATFM 1997, France*, (Juin 1997).
12. L. Maugis, « Mathematical programming for the air traffic flow management problem with en-route capacities », (1996).
13. D. Bertsimas, S. Stock, « The air traffic flow Management problem with en route capacities », *Operations Research*, (1998).
14. D. Bertsimas, S. Stock Patterson, « The traffic flow management rerouting Problem in air traffic control: a dynamic network Flow Approach », *Transportation Science*, vol. 34, (Août 2000).
15. P. Vranas, « Optimal Slot Allocation for European Air Traffic Flow Management », *Air Traffic control Quarterly*, Vol 4, (1997).
16. J.M. van den AKKER, K. Nachtigall, « Slot Allocation by column generation » *NLR Technical Publication 97286*, (1997).
17. A. Alonso, L.F. Escudero, M.T. Ortuno, « A stochastic 0-1 program based approach for the air traffic flow management problem », *European Journal of Operational Research*, (2000).

18. N. Barnier, P. Brisset, T. Rivière, « Slot allocation with constraint programming: Models and result », 4th USA/EUROPE ATM R&D, (Décembre 2001).
19. Sofiane Oussedik, « Application de l'évolution artificielle aux problèmes de congestion du trafic aérien », Thèse d'Etat, (2002).
20. Nicolas Barnier, « Application de la programmation par contraintes à des problèmes de gestion du trafic aérien », Thèse d'Etat de l'I.N.P.T (Décembre 2002).
21. Eurocontrol CFMU, « Basic CFMU Handbook, general and CFMU systems 6.0 », Edition, Février 2000.
22. BERNASCONI Justine, LAUTRETTE Jérôme, TRAGNIER Arnaud, Rapport d'ICNA, «Parameters involved in the Slot Allocation Process », (2001).
23. Eurocontrol, «Innovative Slot Allocation ISA », Rapport du Centre Expérimental d'Eurocontrol EEC, 2001.
24. Cristine Plusquellec et Serge Manchon. « Description du module d'allocation de créneaux Utilisant la Programmation Par Contrainte implanté dans SHAMAN ». Rapport Technique CENA, (1998).
25. Jianyang Zhou. « A constraint program for solving the job Shop problem ». Principles and practice of Constraint Programming, (1996).
26. Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI). « Mesures d'accroissement de la capacité », Onzième conférence de navigation aérienne, (22 septembre -3 octobre 2003).
27. Paul Cobb. « Regard sur le transport aérien Européen ». Etude et documents ITA, Vol 34, 2000

28. « points clés du développement du transport aérien. Réflexion sur cinq thèmes sensibles », rapport du BIPE, (Novembre 2004).
29. J. Mostra, « Commission Européenne, direction générale de l'énergie et des transports », (2002).
30. Craig Wanke, Stephen Zobell, and Lixia Song. « Probabilistic Airspace Congestion Management ». Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, (28 September 2005).
31. Leonard A. Wojcik « Airline Personalities and Air Traffic Flow Management: A Simple Agent-Based Model ». Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, (22 September 2004).
32. R. ARNOTT, A. DE PALMA et R. LINDSEY. « A structural model of peak-period congestion: A traffic bottleneck with elastic demand ». American Economic Review (mars 2003).
33. EUROCONTROL. « Stratégie de gestion de la circulation aérienne ». Volume 2, Edition (2003).
34. Romain SZPAK, « Recherche d'une méthode générale de détermination de capacité secteur ». Mémoire d'ingénieur ENAC, (Juin 1992).
35. David GIANAZZA, « Optimisation des Flux de Trafic Aérien », Thèse d'Etat, Institut National Polytechnique de Toulouse (Novembre 2004).
36. « Effets de la privatisation d'aérodromes. Aéroport Saturé: Comment gérer la capacité ». OACI. (décembre 2001).
37. « European Airports: Getting to the hub of the problem or the problem of getting to the hub », AEA, (April 1995).

38. J.I. DANIEL. « Congestion pricing and capacity of large hub airports: A bottleneck model with stochastic queues », (1995).
39. Doc OACI 9854. « Concept opérationnel d'ATM mondiale », Edition (2005).
40. P. BARLA. « Demand uncertainty, capacity constraints and airline network morphology ». Working Paper, (1999).
41. Dominique Colin de Verdière. « Adaptation of demand to available runway and airspace capacity ». Symposium on Airports of the Future ,PARIS (November 2005).
42. LIU Xiaoming. LIU Yan. MAYi. « Congestion ». Séminaire de méthode, (23 février 2006).
43. Performance Review Commission. « Performance review report (covering calendar year 1999) ». Technical report Eurocontrol (2000).
44. Isabelle Rondé-oustau, « coût et productivité de la navigation aérienne en France », thèse d'état, (2000).
45. Marianne Raffarin. « Tarification de pointe aéroportuaire. Laboratoire d'Economie et d'Econométrie de l'Aérien ». Laboratoire d'Economie et d'Econométrie de l'Aérien (Mai -novembre 2003).
46. G. DE CLERCQ, « Enhancing Airside Capacity », EUROCONTROL, (septembre 2003).
47. W. COOPER, S. LANG, A. MUNDRA, C. LUNSFORD et J. TITTSWORTH, « A phased approach to increase airport capacity through safe reduction of existing wake turbulence constraints », The Air Traffic Management R&D Seminar, (2003).

48. « Effets de la privatisation d'aéroports « Aéroport Saturé: Comment gérer la capacité », OACI (décembre 2001).
49. K. Platz & U. Brokof: « Optimizing Air Traffic Flow at Airports - Advanced Technologies for ATFM », (April 2004).
50. EUROCONTROL. « Navigation Aids Transition Roadmap. One sky global ATM », (May 2006).
51. OACI. « Manuel pour un minimum de séparation vertical réduit (RVSM) en région AFI », (18 mars 2004).
52. Victor M. Aguado, « inauguration d'un nouveau système de double communication appelé à accroître la sécurité et la capacité des systèmes de navigation aérienne en EUROPE », (18 juin 2003).
53. Cris Ramamoorthy, Matt Blake, Alex Huang. « Evaluation of Future National Airspace System Architectures », Published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, (18 August 2005).
54. AIP Algérie. 15 mars 2007.
55. Thomas Rivière. Thèse DEA « Robustesse des solutions du problème d'allocation de créneaux ». Institut Nationale Polytechnique de Toulouse, Juillet 2001.