

1/94

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

Génie Industriel

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Nouvelle approche du problème d'affectation de la
capacité aux avions, aux routes et aux horaires
simultanément
"Cas Pratique : Air-Algérie."*

Proposé par

Air-Algérie

Etudié par :

*F. BENNIKOUS
S. BOUMGHAR*

Dirigé par :

M. SARI

PROMOTION

03 JUL 1994

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

Génie Industriel

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Nouvelle approche du problème d'affectation de la
capacité aux avions, aux routes et aux horaires
simultanément
"Cas Pratique : Air-Algérie."*

Proposé par

Air-Algérie

Etudié par :

*F. BENNIKOUS
S. BOUMGHAR*

Dirigé par :

M. SARI

PROMOTION

03 JUL. 1994

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Dédicaces

A nos familles,
et à tous nos amis

Sabrina et Fella

إن تسيير شركة الخطوط الجوية "تتحدى" إلى عادة
هستاكل. في هذه المذكرة سوف نجمع ثلاثت
هستاكل مسترابطت فيما بعضها في نموذج رياضي
يسمح حله برنامج الطيران.

Résumé

The management of an airline company poses a number of problems. In the present work, we integrate three strongly interactive sub-problems in a same model (construction of routes, assignment of aircrafts to routes and to timetables, and treatment of the demand).

The integration of these sub-problems in a same procedure, will allow the elaboration of an optimal flight program for an airline company, in our case Air-Algerie.

Abstract

The management of an airline company supposes to manage with a lot of problems. In this document, we elaborate a mathematical model which integrates three interactive problems which are:

- * Routing construction*
- * Fleet assignment and scheduling*
- * Demand satisfaction.*

The integration of those problems in a same program will give to an airline company the flight scheduling particularly to Air-Algerie.

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait jamais pu se concrétiser sans le concours de l'Ecole Nationale Polytechnique, de la Compagnie Aérienne Air Algérie et enfin du Laboratoire Productique Logistique de l'Ecole Centrale de Paris. Que tous les acteurs de ces établissements trouvent ici nos remerciements les plus sincères.

*Lorsque la liste des personnes à remercier est longue, le risque d'en oublier est fatalement important. Mais, parce que cette liste n'a pas la prétention d'être exhaustive, les personnes omises ne nous en voudront pas trop. Nos remerciements s'adressent en particulier à notre responsable de mémoire, Monsieur **SARI Hamid**, à notre chef du département Génie Industriel, Mademoiselle **ABOUN Nacéra**, ainsi qu'à notre responsable au niveau d'Air Algérie, Monsieur **ABID**, et Monsieur **BAKIRI**, Directeur Général du **BEDAT**, pour leur disponibilité à nous fournir toute l'aide nécessaire à l'aboutissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici le témoignage de notre sincère gratitude.*

Nos remerciements s'adressent aussi :

*à Monsieur **Pierre DEJAX**, directeur du Laboratoire Productique Logistique de l'Ecole Centrale de Paris (département de Génie Industriel), pour nous avoir ouvert les portes de son laboratoire et mis à notre disposition ses équipements informatiques,*

*à Monsieur **HAKAN C.** du même laboratoire, pour la précieuse aide ainsi que pour la documentation qu'il a mise à notre disposition,*

*à Madame **BENMOUKHTAR**, à Monsieur **LAMRAOUI** et Monsieur **MEKARNIA** du département Génie Industriel de l'Ecole Nationale Polytechnique, à toute l'équipe de la Direction des Opérations d'Air Algérie pour l'assistance et l'intérêt qu'ils ont porté à cette étude, ainsi qu'à Madame **KHALIHA** et Monsieur **SEKFALI** de la D.G.A. de **SONATRACH**,*

à nos parents, pour toute l'aide et le soutien que nous avons trouvé auprès d'eux,

Qu'ils trouvent ici le témoignage de notre parfaite considération.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail et que nous n'avons pas cités, qu'ils trouvent aussi l'expression de nos remerciements les plus sincères.

PLAN

Préambule	1
Première partie: Problème et diagnostic	2
1. Proposition d'Air algérie	3
2. Problème	3
3. Diagnostic	4
3.1. Air Algérie	5
3.1.1. Mission et organisation	5
3.1.2. Analyse du trafic passagers	5
3.1.2.1. Trafic international	6
3.1.2.2. Trafic intérieur	6
3.1.3. Caractéristiques des réseaux	7
3.1.3.1. Réseau international	7
3.1.3.2. Réseau national	7
3.1.4. Composition de la flotte	7
3.1.5. Personnel et formation	8
3.1.6. Travail aérien	9
3.2. Aéroports et espace aérien	10
3.2.1. Infrastructure et équipements	10
3.2.1.1. Infrastructures	10
3.2.1.2. Aéroports de passagers	11
3.2.1.3. Blocs techniques	11
3.2.1.4. Aides à la navigation	11
3.2.1.5. Service de Sécurité Incendie et de Sauvetage	12
3.2.1.6. Autres activités	12
3.2.2. Espace aérien	12
3.2.2.1. Introduction	12
3.2.2.2. Situation actuelle	12
3.2.2.3. Contraintes recensées	13
3.2.2.4. Plan d'action envisagé	13
3.3. Les autres compagnies aériennes	14
3.3.1. Activités des compagnies étrangères	14
3.3.2. Evolution des flux de trafic et parts de marché	14
3.4. Performances financières d'Air Algérie	15
3.4.1. Analyse des coûts et des recettes	15
3.4.2. Politique des tarifs	15
3.4.2.1. Marché domestique	15
3.4.2.2. Marché international	16
4. Classification des problèmes rencontrés	16
5. Conclusion	17
Deuxième partie: Etat de l'art	19
1. Planification dans le transport aérien	20
1.1. Planification de la flotte	20
1.2. Planification de la fréquence	20
1.3. Planification des routes	20
1.4. Planification de la capacité	20

1.5. Planification horaire	20
2. Types de modélisation	21
2.1. Classification structurelle	23
2.1.1. Modèles séquentiels	23
2.1.2. Modèles intégraux	23
2.2. Classification selon le niveau de la précision	23
2.2.1. Modèles agrégés	23
2.2.2. Modèles désagrégés	23
3. Analyse dimensionnelle	24
3.1. Grandeur du système de transport	24
3.2. Dimension temporelle	24
3.2.1. Planification à très long terme	25
3.2.2. Planification à long terme	25
3.2.3. Planification à moyen terme	25
3.2.4. Planification à court terme	25
3.2.5. Planification à très court terme	25
3.2.6. Planification en temps réel	25
3.3. Dimension géographique	26
3.3.1. Réseau très long courrier	26
3.3.2. Réseau long courrier	26
3.3.3. Réseau moyen courrier	26
3.3.4. Réseau court courrier	27
4. Décomposition du problème général	27
4.1. La production de services	27
4.1.1. Management de la flotte	28
4.1.2. Management de la fréquence	29
4.1.3. Management de la capacité	30
4.1.3.1. Nombre total de sièges affectés pour chaque O&D taux de remplissage	30
4.1.3.2. Répartition de la capacité affectée entre plusieurs routes	30
4.1.3.3. Gestion des recettes	31
4.1.4. Management des routes	31
4.1.5. Planification horaire	31
4.2. Soutien logistique	33
4.2.1. Maintenance	33
4.2.2. Management de l'équipage	33
4.2.3. Management du carburant	34
4.2.4. Contrôle du trafic aérien	34
4.2.5. Flux d'information	35
4.2.6. Management des services au sol	35
4.3. Commercialisation des services	35
4.3.1. Prévision de la demande	36
4.3.2. Répartition de la demande	37
4.3.3. Paramètres de qualification de l'offre	37
5. Modélisation mathématique	38
5.1. Approches qualitatives	38
5.2. Approches quantitatives	38
6. Conclusion	38

- 2.2. Développement de solvers spécifiques
2.3. Adaptation aux autres modèles

64
65

Références bibliographiques

66

Annexes

Annexe A

- A.1. Réseau domestique d'Air Algérie
- A.2. Réseau international d'Air algérie
- A.3. Carte des aérodomes
- A.4. Trafic des secteurs - FIR d'Alger
- A.5. Organigramme type des EGSA
- A.6. Organigramme de la DACM
- A.7. Les statistiques de trafic de passagers d'Air Algérie (1989 à 1992)
- A.8. Les résultats du marché global d'Air Algérie (1989 à 1992)
- A.9. Résultats analytiques d'Air Algérie pour l'année 1992
- A.10. Carte d'atterrissage GHARDAIA
- A.11. Carte d'atterrissage TAMANRASSET
- A.12. Carte d'atterrissage ANNABA
- A.13. Carte d'atterrissage CONSTANTINE
- A.14. Carte d'atterrissage ORAN

Annexe B

Listing du programme et des résultats obtenus sur GAMS

LISTE DES FIGURES

- Figure A.1. Evolution du trafic passagers domestique d'Air algérie
- Figure A.2. Evolution du trafic passagers international d'Air Algérie
- Figure A.3. Organigramme d'Air Algérie
- Figure C.1. Evolution du trafic passagers sur les compagnies étrangères
- Figure D.1. Evolution des coûts internationaux d'Air Algérie
- Figure D.2. Evolution des coûts domestiques d'Air Algérie
- Figure D.3. Evolution des recettes internationales d'Air Algérie
- Figure D.4. Evolution des recettes domestiques d'Air Algérie
- Figure 2.1. Modèles séquentiels et modèles intégraux
- Figure 2.2. Décomposition du problème général

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Evolution du trafic passagers internationaux (1978-1988)
- Tableau 2. Composition de la flotte d'Air Algérie
- Tableau 3. Répartition des effectifs
- Tableau 4. Profil de carrière des PNT
- Tableau 5. Utilisation journalière par type d'avion en 1993
- Tableau 6. Trafic sur le réseau international 1992
- Tableau 7. Distributeurs, prix et informations hardware
- Tableau 8. Les caractéristiques de programmation mathématique
- Tableau 9. Capacité des langages de modélisation

PREAMBULE

L'objectif de notre travail est de considérer le problème de gestion de la compagnie aérienne Air Algérie sous une nouvelle forme et mettre en oeuvre un modèle d'aide à la décision intégrant le processus stratégique et opérationnel.

Le management scientifique d'une compagnie de transport aérien impose la gestion d'une série de problèmes étroitement liés. Actuellement, chaque compagnie utilise diverses méthodes spécifiques à ses problèmes pour les résoudre d'une manière optimale et individuelle.

L'objectif principal est donc de comprendre les mécanismes de modélisation dans les systèmes de grande taille et de haute complexité. C'est le cas du processus de décision pour la planification intégrale des vols d'une compagnie de transport aérien. Ce processus intégral consiste à générer simultanément les routes et les horaires pour les différents services d'une manière optimale pour chaque avion d'une flotte donnée.

Il s'agit de l'intégration, dans un même modèle, des variables suivantes :

- la génération des tournées,
- l'affectation des avions aux vols,
- l'affectation de la capacité commerciale à ces vols,
- les horaires de ces vols.

Dans le premier chapitre de notre mémoire, nous faisons une présentation générale du système :

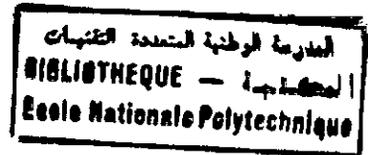
- la proposition d'Air Algérie et le problème,
- l'environnement : le diagnostic de la situation actuelle d'Air Algérie,
- les problèmes rencontrés ainsi que la conclusion qui s'impose.

Le deuxième chapitre est consacré à l'état de l'art du domaine dont nous parcourons les divers éléments scientifiques en vue d'appuyer notre approche de modélisation. L'objectif d'intégrer plusieurs sous-problèmes (modules), jadis traités individuellement, nécessite la connaissance de la particularité de chacun d'entre eux.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des techniques et des éléments de modélisation que nous allons utiliser dans le cadre de l'élaboration du modèle stratégique.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons des exemples numériques pour les versions du modèle choisi. Ces exemples, décrivant différents cas de figure, y sont analysés afin de valider le modèle, d'une part, et d'illustrer le comportement de l'outil de résolution utilisé, d'autre part.

Enfin, le cinquième chapitre concerne notre conclusion. Nous y présentons les aspects pratiques et théoriques de nos résultats et discutons des axes de recherches futurs.



PREMIERE PARTIE

Problème et diagnostic

La description du système, nécessaire à la compréhension de son fonctionnement, est abordée dans cette partie. Le problème posé par la compagnie Air-Algerie y est présenté, puis analysé objectivement. Un diagnostic de ce système permet de situer les domaines susceptibles de faire l'objet de mesures correctives, d'améliorations, ou simplement d'une attention particulière.

1. PROPOSITION D'AIR ALGERIE

La compagnie nationale Air Algérie opère en exclusivité sur un réseau domestique d'une longueur d'environ 13000 km, et sur un réseau international dominé par des flux de la région France.

Dans l'organisation actuelle d'Air Algérie, la gestion des services commerciaux des deux réseaux (domestique et international) est assurée par une même direction. En raison de la spécificité des deux marchés, plusieurs problèmes sont rencontrés dans la gestion de la compagnie selon certains responsables d'Air Algérie. Les deux réseaux utilisent la même flotte presque dans les mêmes proportions. Or en matière de recettes, le réseau domestique ne représente que 12% du chiffre d'affaire total.

Afin de démontrer la réalité ainsi que l'ampleur de ce problème, la Direction Commerciale nous a proposé d'optimiser le réseau domestique en l'absence de contraintes d'infrastructures aéroportuaires et de navigation.

L'objectif principal de ce projet est l'élaboration optimale du programme de vol ou en d'autres termes la planification du transport aérien de la compagnie aérienne Air Algérie, ce qui, comme nous le montrerons plus loin, passe par l'identification et la résolution d'une vaste collection de problèmes.

2. LE PROBLEME

En premier lieu se pose la question suivante: quelles sont les liaisons commerciales que l'on va assurer ? La deuxième question qui pourrait venir à l'esprit est de savoir avec quels avions on va effectuer les vols pour établir ces liaisons. En dernier lieu, on pourrait se pencher sur la question des horaires. A la base du problème de management d'une compagnie aérienne, et en particulier Air Algérie, se pose cette triple question.

Aujourd'hui, le problème est considéré comme une immense série de décisions à prendre concernant une centaine de liaisons commerciales, d'une flotte de plusieurs dizaines d'avions et d'une centaine de vols quotidiens. Le problème général, du fait de son importance, comme nous le verrons dans la partie II, est décomposé en plusieurs sous-problèmes supposés indépendants. Hélas, ce n'est pas le cas : le management minutieux d'une compagnie aérienne ne peut pas considérer le problème de l'organisation des tournées des avions, la gestion commerciale de capacité, l'affectation des personnels navigants, la maintenance et toute l'infrastructure logistique comme des problèmes distincts.

Dans notre cas, le problème à modéliser est défini par une compagnie de transport aérien (Air Algérie, en l'occurrence) et un réseau aéroportuaire. La question est: "Comment cette compagnie peut exploiter ce réseau de la meilleure manière?". Celle-ci est synthétisée par le meilleur service plausible en vue de minimiser les coûts opérationnels dans un premier temps, et de maximiser le profit de la compagnie dans un second temps.

La principale variable de décision est l'emploi du temps des avions de la compagnie. Celle-ci est définie par l'affectation des avions de la compagnie aux routes du réseau et

aux horaires sur un horizon de temps donné. L'affectation est réalisée simultanément dans un même processus d'optimisation.

Un tel problème est étudié et résolu en tenant compte de l'environnement dans lequel il évolue et des différents problèmes qui le composent. Nous supposons que les paramètres de la flotte d'avions, du réseau de transport ainsi que les réactions et comportements des voyageurs face aux différentes conditions de voyage sont connus.

Notre problème est en fait une composition de sous-problèmes qui sont connus dans la littérature en tant que: **gestion des horaires**, **gestion des routes** et **gestion de capacité**. Ceux-ci seront étudiés d'une manière détaillée dans le chapitre suivant.

3. DIAGNOSTIC DE LA SITUATION ACTUELLE DU TRANSPORT AERIEN EN ALGERIE

Introduction

Le transport aérien joue un rôle important dans le système de transport algérien en raison de l'étendue du pays (2,4 millions Km² environ) et de la grande dispersion de la population qui est évaluée globalement à 26 millions d'habitants. En effet, 70% de la population est concentrée, dans une bande côtière dont la superficie ne représente que 4% de la superficie totale, alors que le sud qui constitue 89% de la superficie totale n'est occupée que par 8% de la population globale. La bande intermédiaire des hauts plateaux représente quant à elle 7% de la superficie totale, mais elle est occupée par 22% de la population totale.

La configuration des flux de transport est actuellement soumise à de sensibles mutations induites par les politiques de développement régional, mais dans cet ensemble elle reflète le caractère prédominant des trafics d'importation qui s'articulent autour des grandes villes côtières.

Les infrastructures de transport aérien héritées à l'indépendance répondaient en général à la demande existante jusqu'à la fin des années 70, période à partir de laquelle les volumes de trafic avaient commencé à enregistrer des taux de croissance très élevés. Pour pouvoir répondre à cette nouvelle demande et remédier au vieillissement de certaines infrastructures, d'importantes opérations de développement et de consolidation du réseau de transport aérien ont été engagées, notamment dans le cadre des plans quinquennaux de développement. Néanmoins, cet élan a été sérieusement ralenti à partir de l'année 1986, suite aux effets de l'effondrement des prix du pétrole. En effet, à partir de l'apparition de cette crise, les priorités d'investissement ont été pratiquement limitées à la finition des projets déjà entamés, à l'entretien des plateformes existantes et surtout à l'amélioration de l'efficacité et de la productivité dans ce secteur.

3.1. AIR ALGERIE

3.1.1. Mission et Organisation

La mission principale de la compagnie aérienne nationale Air Algérie est le transport aérien des passagers, bagages, fret et poste. A ce titre, Air Algérie est chargée dans le cadre national de développement économique et social d'assurer :

- l'exploitation des lignes aériennes internationales selon les conventions et accords internationaux ;
- l'exploitation des lignes intérieures en vue de garantir les transports publics réguliers et non réguliers ;
- l'offre de prestations de services à des fins commerciales, éducatives et scientifiques, ainsi que pour les besoins de travail aérien.

L'entreprise est dirigée par un Directeur Général qui est à la tête d'un conseil d'orientation et de contrôle. Ce conseil est composé de 17 membres désignés comme suit :

- 2 représentants du Ministère de tutelle ;
- 2 représentants du Directeur Général d'Air Algérie ;
- 3 représentants des travailleurs ;
- 10 représentants d'autres Ministères.

Au niveau de l'organisation interne, les activités sont regroupées au sein de quatre branches principales :

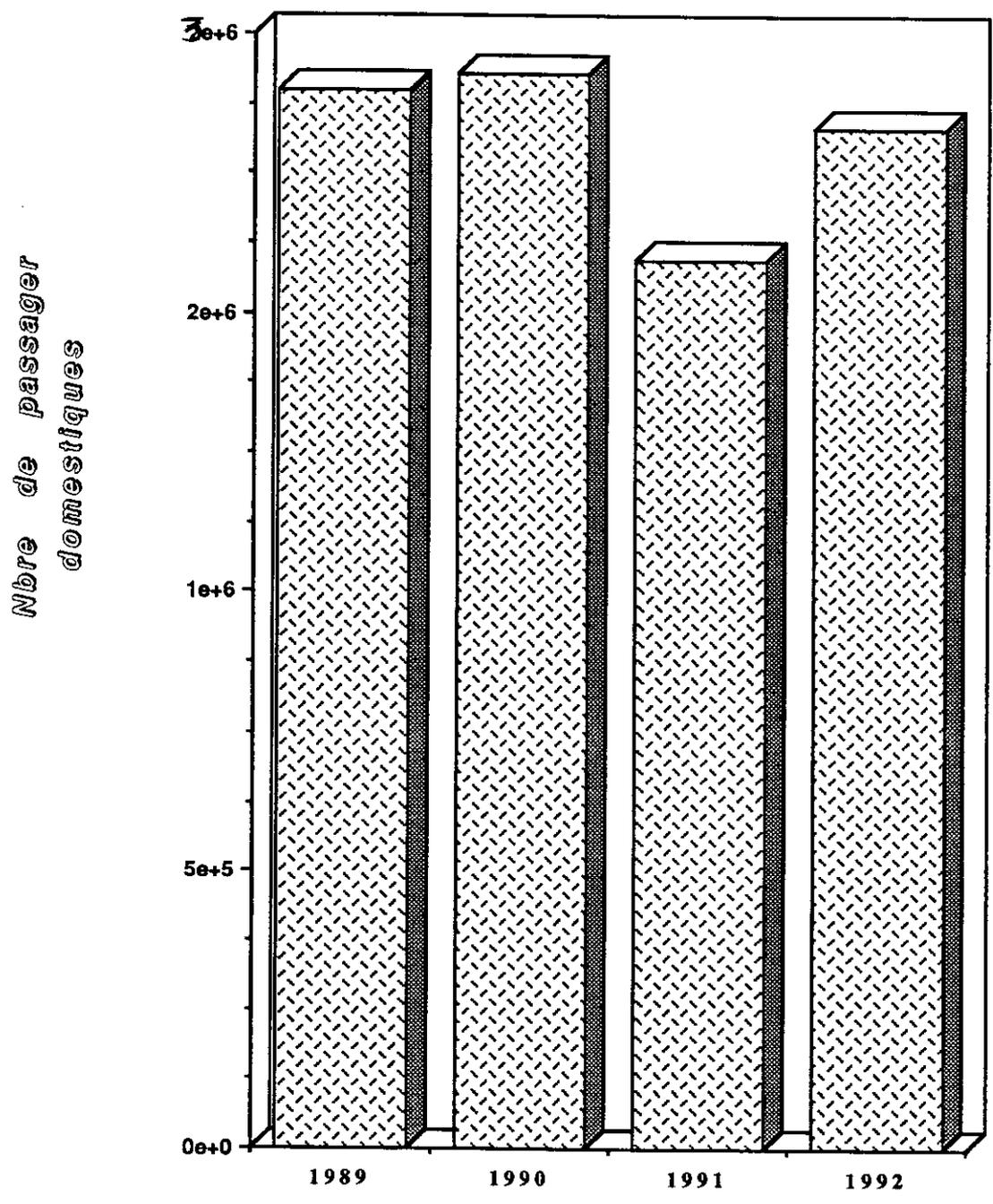
- Les activités techniques et opérationnelles incluant les directions techniques, opérationnelles, du transport et de la logistique ;
- Les activités financières et commerciales comprenant les directions financière, commerciale, régionale et du fret ;
- Les activités administratives incluant les directions des ressources humaines et des oeuvres sociales ;
- Les activités spécifiques au travail aérien.

Une direction générale assure les missions de coordination, de planification et de contrôle relatifs à ces branches d'activités. L'organigramme (Fig. A.3) précise les relations existantes entre les différentes structures de la compagnie.

3.1.2. Analyse du trafic passagers

Les statistiques de trafic passagers de la compagnie nationale Air Algérie sont données en Annexe A. Les figures A.1 et A.3 montrent l'évolution du trafic passagers pour la période 1989-1992.

Fig.A.1. Evolution du trafic passagers domestique d'Air Algérie.



Années

Fig.A.2. Evolution du trafic passagers international d'Air Algérie

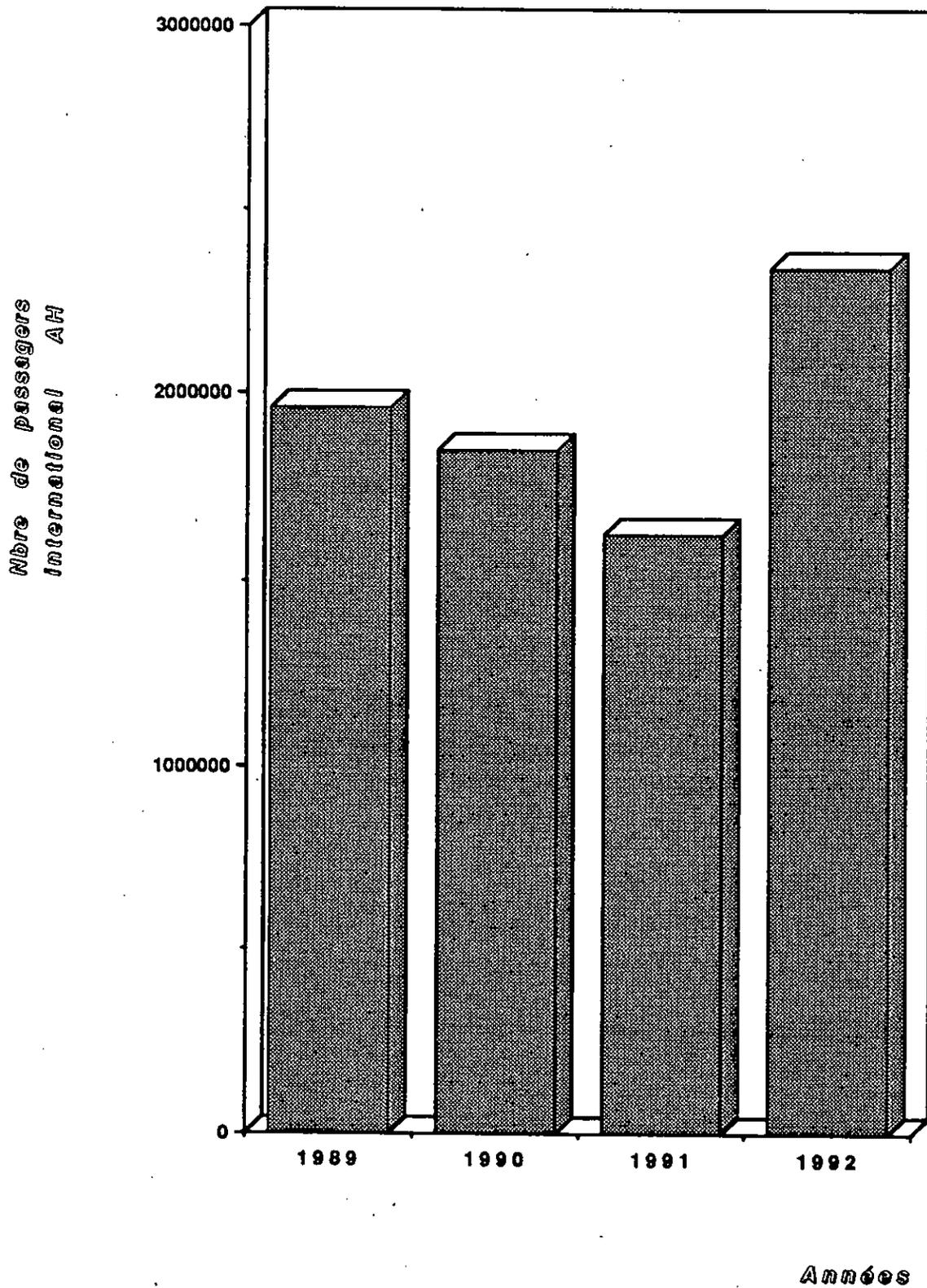
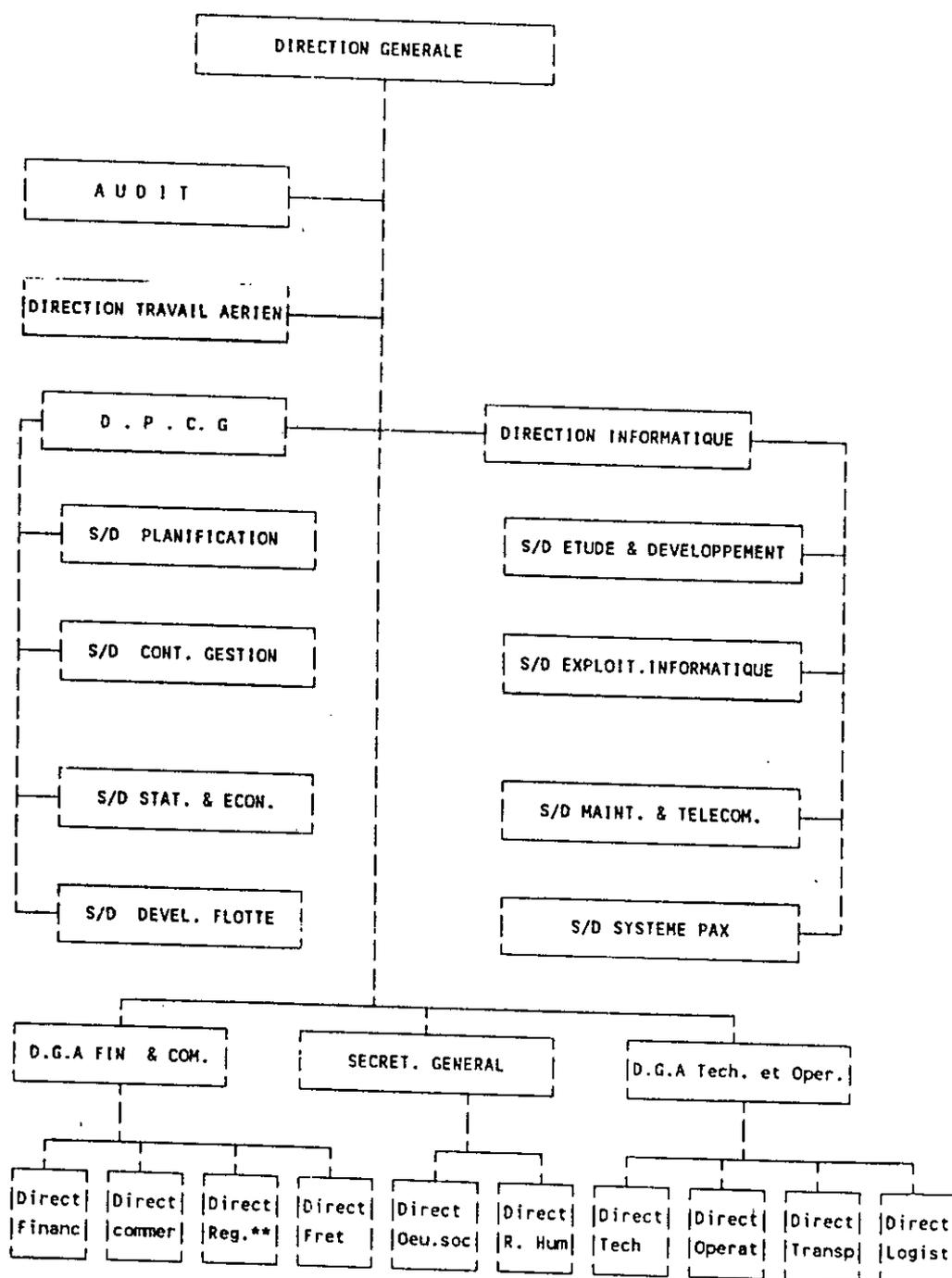


Fig. A.3. Organigramme d'Air Algérie



- ** - D.R ALGER
- D.R ORAN
- D.R CONSTANTINE
- D.R OUARGLA

3.1.2.1. Trafic international

Le trafic international (tableau 1) en terme de passagers-km traité par la compagnie Air Algérie a connu entre 1975 et 1988 une augmentation moyenne de 7% par an en comparaison avec un taux mondial OACI pour la même période de 8%. La réduction des taux d'accroissement a commencé en 1986 avec la baisse des prix pétroliers. En outre, en 1985 le Gouvernement avait introduit des mesures pour limiter les pertes en devises, ce qui avait provoqué un effet immédiat sur le trafic international. Après avoir atteint son maximum en 1989, ce trafic a connu une baisse continue de 1989 à 1992 (voir fig. A.1). Il a chuté rapidement jusqu'à l'année 1991 avec un taux de 18%, mais a repris en 1992 en montrant une augmentation de 15%.

Les causes de la chute rapide du trafic passagers international enregistrée entre 1989 et 1991 seraient les suivantes:

- La crise économique que connaît l'Algérie depuis 1986;
- L'introduction par les pays européens tels que la France, l'Italie et la Suisse, de visas pour les algériens désirant se rendre dans ces pays.

La région France est prépondérante, mais sa part a diminué sensiblement de 1978 à 1988. Air Algérie a diversifié ses activités vers les marchés Maghrébins et du Moyent-Orient qui ont connu un accroissement plus fort que ceux des autres régions comme le montre le tableau 1 ci-après :

Tab. 1: EVOLUTION DU TRAFIC PASSAGERS INTERNATIONAUX (10³)

Région	Passagers 1978	% 1978	Passagers 1988	% 1988
FRANCE	893	78	1280	70
EUROPE 1	163	14	249	14
MAGHREB/MOYEN ORIENT	58	05	212	12
EUROPE 2	19	02	47	03
AFRIQUE	13	01	36	02
TOTAL	1147	100	1824	100

Source: Direction Commerciale

3.1.2.2. Trafic intérieur

Le trafic intérieur a connu une forte augmentation entre 1975 et 1984. Le taux d'accroissement moyen (passagers-km) a été de 11% environ par an entre 1975 et 1988 alors que la tendance OACI sur les réseaux intérieurs a été de 7%.

A partir de 1984, le trafic intérieur d'Air Algérie est devenu pratiquement stagnant. Mais il a connu une évolution de 1,76 % en 1990 par rapport à l'année 1989, par la suite il a baissé en 1991 de 17,4 %.

3.1.3. Caractéristiques des réseaux

3.1.3.1. Réseau international

Le réseau international d'Air Algérie est constitué des secteurs et escales suivants :

- Secteur France : Paris, Marseille, Nice, Toulouse, Lille, Lyon, Mulhouse (saisonnier) ;
- Secteur Europe 1 : Frankfurt, Genève, Zurich, Londres, Madrid, Palma, Rome, Barcelone, Bruxelles, Berlin;
- Secteur Europe 2 : Prague, Varsovie, Moscou, Sofia;
- Secteur Maghreb/Moyent-Orient : Casablanca, Tunis, Tripoli, Le Caire, Djeddah, Damas, Athènes, Beyrouth;
- Secteur Afrique : Dakar, Nouakchott, Bamako, Niamey, Ouagadougou.

3.1.3.2. Réseau national

Concentré sur Alger où toute la flotte est basée, le réseau national s'étend aujourd'hui sur une longueur de 13.000 km reliant 25 villes du pays. Il se compose de trois zones dont les délimitations correspondent grossièrement à un découpage géographique, à savoir : Le Nord où se situe la majorité de la population et du trafic aérien, les Hauts Plateaux et le Sud. Les flux de trafic du réseau domestique sont classés selon trois types de relations :

- Relations Nord - Nord : trafic entre les villes situées dans le Nord.
- Relations Nord - Sud : trafic entre les villes situées dans les régions Nord et les Hauts Plateaux d'une part et les régions du Sud d'autre part.
- Relations Sud - Sud : trafic entre les villes situées dans la région Sud.

3.1.4. Composition de la flotte

La flotte d'Air Algérie se composait en 1989 de 37 avions à réaction et de 10 avions turbo-propulseurs. Les avions Boeing (B737 et B727) ont remplacé les caravelles au début des années 70, ayant ainsi donné des moyens de développement à la compagnie. Deux avions gros-porteurs Airbus A 310-200 arrivaient à la fin de 1984 pour opérer sur les lignes de haute densité.

Depuis 1990, date à laquelle Air Algérie a réceptionné 3 Boeing 767-300, il n'y a aucun programme concernant le renouvellement de la flotte pour la décennie à venir.

La composition actuelle de la flotte d'Air Algérie pour l'année 1994 est donnée dans le tableau 2.

Tab. 2 : COMPOSITION DE LA FLOTTE D'AIR ALGERIE

TYPE D'APPAREIL	NOMBRE
AIRBUS 310/200 (GE)	04
BOEING- 727/200-200 Adv	11
BOEING - 737/200 Adv	13
BOEING- 737/200 C.Adv	03
BOEING- 767/300 (GE)	03
FOKKER- 27/400 M	07
HERCULES- L 100/30	02
TOTAL	43

Source: Direction Commerciale

3.1.5. Personnel et formation

Durant ces dernières années, les effectifs d'Air Algérie ont connu une nette augmentation. Ils sont passés de 7522 agents en 1989 à 8858 agents en début d'année 1992. Pourtant, il y a eu dans cette période le transfert d'une partie des effectifs vers les E.G.S.A.¹ Le tableau 3 donne la répartition des effectifs au sein des structures en janvier 1992.

Tab. 3 : REPARTITION DES EFFECTIFS

SERVICES	EFFECTIFS	%	
Direction Générale	42	00.5	
Secrétariat Général	443	05	
Opérations aériennes			
	PNT	456	05.2
	PNC	707	08
Personnel au sol	327	03.7	
Direction Technique	1617	18.5	
Direction du Frêt	246	02.8	
Direction Financière	338	04	
Direction Commerciale	167	01.8	
Directions Régionales	1821	20	
Directions Informatique et Télécommunications	184	02	
Direction Logistique	753	08.5	
Direction Planification	33	00.4	
Travail Aérien	183	03	
Direction Transport	1196	13.5	
Personnel à l'étranger			
	Expatriés	79	0.09
	Locaux	266	03
TOTAL	8858	100	

Source : Direction du personnel

¹ Entreprise de Gestion et Services Aéroportuaires

La masse salariale pour l'année 1992 a été de l'ordre de 866,5 millions DA, ce qui signifie un salaire annuel moyen par employé de l'ordre de 96800 DA.

Les dépenses de formation cumulées en fin décembre 1991 se sont élevées à 9,1 millions DA dont 6,9 millions DA en devises. Elles n'ont représenté ainsi qu'environ 1% de la masse salariale.

La formation des pilotes en instruments se déroule principalement à Alger à l'aide de deux simulateurs que la compagnie possède (Boeing 737 et Boeing 727). Des actions de formation sont également réalisées sur simulateur Airbus A310 à Toulouse (France) et sur simulateur Lockheed L100 aux Etats Unis. Certaines formations de pilotes se font également avec la collaboration de la Royal Air Maroc.

On notera que depuis 1987/1988, les PNT² d'Air Algérie sont à 100% algériens. Concernant leur profil de carrière, Air Algérie adopte l'échelle de promotion donnée dans le tableau 4.

Tab. 4 : PROFIL DE CARRIERE DES PNT

GRADE-FONCTION	TYPE D'APPAREIL
1. Co-pilote	F27
2. Co-pilote	B737
3. Co-pilote	B727
4. Co-pilote	A310
5. Commandant de bord	F27
6. Commandant de bord	B737
7. Commandant de bord	B727
8. Commandant de bord	A310

Source : Direction des Opérations

On signale enfin l'existence de certaines déperditions (touchant les techniciens et personnel spécialisés) vers les pays étrangers, notamment vers les compagnies aériennes du Golf.

3.1.6. Travail Aérien

Les activités de travail aérien sont organisées dans une structure distincte au sein de la compagnie Air Algérie. La flotte qui est affectée à cette fonction en 1990 se compose de cinq King Air 80, deux King Air 100, 14 Grumman et d'un hélicoptère.

Les activités principales de cette structure se résument à l'aviation agricole, aux évacuations sanitaires, au transport à la demande, ainsi qu'à la surveillance. Le développement de ces fonctions spécifiques a permis à la structure de se doter de ses propres moyens d'entretien et révisions.

² Personnel Navigant Technique

On notera enfin qu'il est envisagé de permettre à la flotte de travail aérien de se développer afin de pouvoir assurer le transport du type régulier pour les liaisons qui ne seront pas desservies par la compagnie Air Algérie sur le réseau domestique.

3.2. AEROPORTS ET ESPACE AERIEN

3.2.1. Infrastructure et équipements aéroportuaires

3.2.1.1. Infrastructure

L'infrastructure aéroportuaire comprend toutes les aires de mouvements incluant les pistes, voies de circulation et aires de stationnement d'avions; sont également comprises les routes d'accès du côté ville et les autres routes périphériques situées à l'intérieur du périmètre de l'aéroport.

La responsabilité en matière d'entretien de l'infrastructure aéroportuaire, qu'elle concerne les renforcements, les réfections totales, ou les réalisations nouvelles, est du ressort de la Direction des Travaux Publics du Ministère de l'Equipement.

La capacité des infrastructures satisfait en général à la demande, et on remarque même qu'en certains aéroports, des investissements en sur-dimension ont été consentis en matière d'infrastructure surtout l'on tient compte du type d'appareils utilisés et du nombre de mouvements enregistrés.(Voir tab.1).

Tab. 5 : UTILISATION JOURNALIERE PAR TYPE D'APPAREIL EN 1993

TYPE D'APPAREIL	UTILISATION (Heures/Jour)
B767-300	5,28
B727-200	5,35
B737-200	5,68
A310	6,33
F27/28	4,40
Hercules L 100-30	4,81

Source: Direction Technique

On remarque que l'utilisation journalière de la flotte d'Air Algérie est très en deça de la moyenne (voir annexe A: comparaison avec la RAM et Tunis Air), et le taux d'immobilisation est très élevé. Notons par ailleurs que :

- L'état des pistes à Tamanrasset et In Salah exige des interventions correctives.
- Des restrictions de charge maximum au décollage sont imposées à Constantine et Tamanrasset.

On notera également que le financement des travaux d'infrastructure de base est assuré par l'Etat.

3.2.1.2. Aéro-gares de passagers

L'entretien et la réfection des aéro-gares de passagers relèvent de la responsabilité des EGSA concernées qui sont implantées à Alger, Oran, Constantine et Annaba. Contrairement aux infrastructures aéroportuaires de base, les aéro-gares passagers se trouvent en plusieurs endroits confrontés à des problèmes de capacité. C'est, entre autres, le cas des aéroports d'Alger, de Constantine, de Ghardaïa, de Tamanrasset, de In Salah et même d'Oran à certaines périodes de pointe.

Le développement de la capacité des aéro-gares de passagers n'a pas évolué en adéquation avec l'accroissement de la demande en raison des contraintes de financement, les crédits étant dans ce domaine fournis par l'état. Lorsque les crédits sont disponibles, ils sont en général consommés dans des travaux d'extension qui sont conçus pour répondre à des besoins immédiats, au lieu de les utiliser dans le contexte de plans directeurs qui auraient permis une stratégie globale par aéroport. On devrait veiller à bien prendre en considération cet aspect du système de transport aérien afin d'assurer le maintien d'un équilibre entre l'infrastructure aéroportuaire et le développement des aéro-gares de passagers.

3.2.1.3. Blocs techniques

Les blocs techniques tels que les tours de contrôle, les blocs SSIS et les centrales électriques relèvent de la responsabilité de l'ENESA. Les installations techniques sont, au même titre que les infrastructures, financées par l'état.

3.2.1.4. Aides à la navigation

Les aides à la navigation et les télécommunications constituent des moyens par lesquels les aéronefs arrivent à localiser leur position exacte à tout moment. Aussi, pour des raisons de sécurité, il est absolument indispensable de maintenir les diverses installations en état de bon fonctionnement avec l'objectif d'atteindre une disponibilité de 100%.

La disponibilité ne dépend pas uniquement de la fiabilité de l'équipement proprement dit, mais également de la qualité de l'alimentation électrique, du degré d'isolement de la station et de l'efficacité des opérations de maintenance. Il semble que dans plusieurs cas, ce sont ces dernières causes et non celles liées à l'équipement même, qui sont à l'origine des écarts de niveau de disponibilité enregistrés (en général < 97/98%).

Par ailleurs, dans ce domaine, la disponibilité de la pièce de rechange est primordiale, et il est impératif de responsabiliser le personnel opérationnel et le personnel de maintenance dans la détermination des lots de rechange dont il faut disposer. Il est préférable de se baser plus sur leur expérience que sur les recommandations des constructeurs ou fournisseurs.

Il a été recensé un total de 103 stations d'aides à la navigation et de télécommunications. Le réseau d'aides a bénéficié de plusieurs investissements durant les années antérieures, ce qui a permis sa modernisation.

3.2.1.5. Service de Sécurité Incendie et de Sauvetage (SSIS)

Le service SSIS dispose d'un parc de 65 véhicules spécialisés équipant au total 25 aéroports. Les aéroports restants bénéficient d'une couverture assurée par l'autorité locale de la région d'implantation de l'aéroport concerné. Dans ce cas, l'autorité locale est avisée à l'avance de tout mouvement d'aéronef prévu.

Le problème fondamental qui se pose au niveau de la maintenance des véhicules est dû au manque de pièces de rechanges adéquates, phénomène dû lui-même à plusieurs facteurs dont celui des difficultés d'importation.

3.2.1.6. Autres activités

Les activités de traitement de fret, catering et ravitaillement en carburant appellent, elles aussi, certaines remarques :

- Au niveau de tous les aéroports, le traitement des passagers est pris en charge par la compagnie Air Algérie; au même titre que celui du fret aérien.
- Les repas de bord (catering) sont fournis par Air Algérie à l'aéroport d'Alger, et par les EGSA à Constantine et Annaba. A l'aéroport d'Oran, l'EGSA procède à la mise sur plateaux des repas qui sont ramenés par certaines compagnies aériennes.
- Les systèmes de ravitaillement en carburant par conduite ont été installés et mis en service par Naftal à Ghardaïa, Hassi-Messaoud, In Salah, In-Aménas et Tamanrasset.

3.2.2. Espace aérien

3.2.2.1. Introduction

La navigation aérienne a fait l'objet d'une étude réalisée par la "Direction de l'Aviation Civile et de la Météorologie" (DACM), et ayant abouti à l'élaboration d'un plan national de la navigation aérienne (PNNA) [DAH89]. Cette étude identifie les problèmes rencontrés et propose des solutions concrètes et à long terme. Le schéma directeur est élaboré pour une perspective de 15 ans et se base sur un plan d'investissements concernant des secteurs vitaux tels que la réorganisation de l'espace aérien; le développement et la modernisation des équipements, ainsi que le renforcement de la maintenance technique.

3.2.2.2. Situation actuelle

L'Algérie est devenue un état contractant de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) dès 1963. Un des rôles de cette institution spécialisée de l'Organisation des Nations Unies (ONU) est la détermination des moyens et services à mettre en oeuvre au bénéfice de l'aviation civile internationale. En exerçant ce rôle, l'OACI a confié à l'Algérie la gestion d'un espace qui, au delà du territoire national, s'étend au dessus d'une zone maritime, de sorte qu'il se trouve adjacent aux espaces gérés par la France et l'Espagne.

La sécurité de la navigation aérienne et la gestion des espaces aériens confiés sont assurées par l'ENESA³. L'espace aérien, dont la gestion est assurée par l'administration algérienne - La FIR⁴ d'Alger est subdivisé actuellement en 7 secteurs: Nord-Centre, Nord-Ouest, Nord-Est, Sud-Centre, Sud-Ouest, Sud-Est et Sud-Sud.

La totalité de la FIR est actuellement gérée par un centre unique, le Centre de Contrôle Régional (CCR) d'Alger. Le service du contrôle de la circulation aérienne est rendu dans les trois secteurs de la partie nord de la FIR. Ailleurs, seule l'information de vol est assurée, ainsi qu'un service consultatif. Au niveau de la navigation en "route", la position d'un aéronef est estimée ou constatée par le pilote qui la communique au contrôleur. Au niveau local, sur les trente aérodromes ouverts à la circulation aérienne publique (dont 11 sont ouverts au trafic international) seulement cinq sont dotés d'espaces spécifiques pour protéger les mouvements locaux (Alger, Oran, Constantine, Ghardaïa et Annaba). Les quatre premiers aéroports cités sont équipés de stations radar.

3.2.2.3. Contraintes recensées

Parmi les principales contraintes identifiées dans le cadre du plan de la navigation aérienne, on peut citer:

- La saturation de certains secteurs, notamment les secteurs Nord-Centre (80% du trafic), Nord-Est (arrivées, départs et survols) et Sud-Sud (trafic de transit).
- La limitation dans le système actuel de traitement du trafic, notamment dans la partie nord de la FIR, surtout en comparaison avec les techniques utilisées par les FIR voisines (Espagnole et Française). La coordination entre les centres lors des transferts des vols, d'un centre à l'autre ne se trouve pas facilitée.
- La nécessité de renouveler certains équipements vétustes, et d'introduire une modernisation des moyens pour s'aligner aux FIR européennes.
- La nécessité de prévoir les moyens humains et matériels pour assurer les activités indispensables de maintenance des équipements et systèmes de navigation aérienne qui connaîtront de profondes mutations. On doit donc envisager des mesures de recrutement/formation de personnel technique. Par ailleurs, en raison de l'introduction de technologies plus complexes, il serait également impératif d'opérer une refonte générale des méthodes et procédures de maintenance appliquées à ce jour.

3.2.2.4. Plan d'actions envisagées

Les actions retenues dans le PNNA seraient réalisées en plusieurs étapes selon les priorités et la croissance du trafic aérien. Dans cette optique, les mesures se résumeraient comme suit:

- Réorganisation des secteurs;
- Développement et modernisation du CCR d'Alger;

³ Entreprise Nationale d'Exploitation des Services Aéroportuaires

⁴ Flight Information Region

- Création du nouveau CCR Sud;
- Renouvellement des équipements;
- Formation de techniciens et renforcement de la maintenance technique.
- Automatisation de certaines fonctions du contrôle aérien.

3.3. LES AUTRES COMPAGNIES AERIENNES

3.3.1. Activités des compagnies étrangères

Les activités des compagnies aériennes étrangères sont régies par les accords de transport aérien conclus par le gouvernement et selon les accords de POOL et de coopération commerciale engagés par Air Algérie. Actuellement, les statistiques relatives à ces activités sont tenues en partie par Air Algérie et en partie par les EGSA et l'ENESA. Air Algérie (en première position) et Air France (en seconde position) restent les principales compagnies assurant près de 77% des vols et près de 88% du trafic de passagers.

3.3.2. Evolution des flux de trafic et part de marché

La répartition des flux de trafic entre Air Algérie et ses partenaires de l'année 1992 est résumée dans le tableau 6.

Tab. 6: TRAFIC SUR LE RESEAU INTERNATIONAL EN 1992

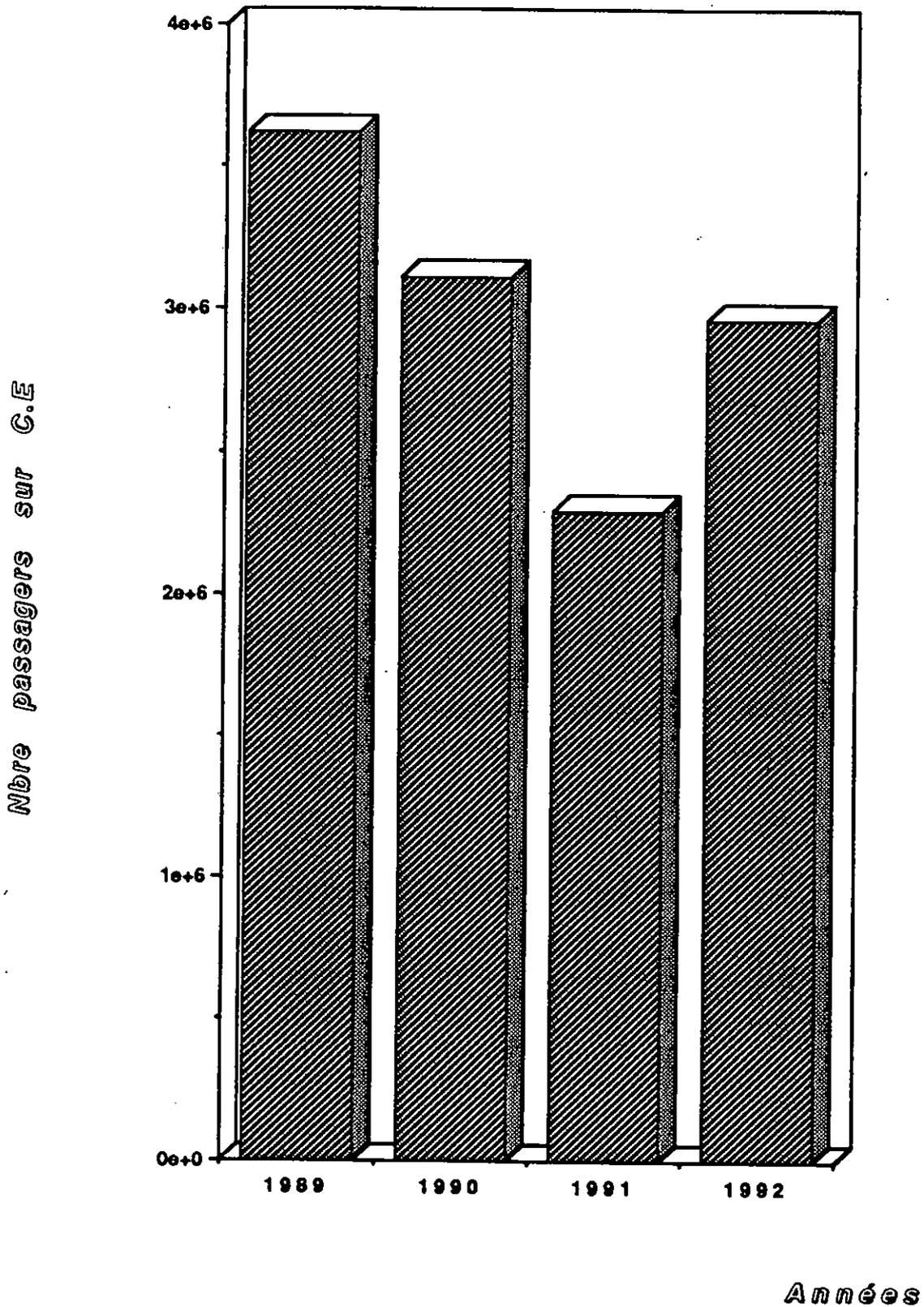
RESEAU	SENS	TRAFIC			PART DE MARCHÉ (%)
		AH	C.E ⁵	TOTAL	
AFRIQUE	Aller	15706	0	15706	100
	Retour	18941	0	18941	100
	Total	34647	0	34647	100
EUROPE 1	Aller	103805	56384	160189	64.80
	Retour	92200	49536	141736	65.05
	Total	196005	105920	301925	64.92
EUROPE 2	Aller	16618	5358	21978	75.72
	Retour	15111	4335	19446	77.71
	Total	31725	9693	41422	76.60
FRANCE	Aller	673535	211481	885016	76.10
	Retour	576954	183242	760196	75.90
	Total	1250489	394723	1645212	76.00
M.M.O	Aller	106476	56841	163317	65.20
	Retour	103644	53101	156745	66.12
	Total	210120	109942	320062	65.66
Système	Aller	916140	330064	1246204	73.51
	Retour	806850	290214	1097064	73.53
	Total	1722990	620278	2343265	73.52

Source : Direction Commerciale

Le marché total sur le réseau international desservi par la compagnie Air Algérie durant l'année 1992 a été d'environ 2,4 millions de passagers dont plus de 70% sont transportés par Air Algérie.

⁵Compagnies étrangères

Fig.C.1. Evolution du trafic passagers sur les C.E



Les parts de marché d'Air Algérie par rapport à celles des compagnies étrangères ont connu une évolution croissante entre 60 et 75% pour les années 1989-1992 (voir Fig.C.1). Ceci s'explique par la réduction du trafic des compagnies aériennes étrangères due à des mesures prises par le gouvernement destinées en particulier à limiter les déplacements des algériens vers l'étranger. Elles ont été renforcées par une série de décrets qui ont en particulier sensiblement réduit la prépondérance de la position occupée par Air France.

Parmi ces décisions, on retiendra l'élimination de l'allocation touristique de devises, le prélèvement d'une taxe sur les prix des billets des compagnies étrangères, la prise en charge par Air Algérie de l'assistance au sol aux compagnies étrangères en Algérie et enfin l'établissement par Air Algérie de l'obligation d'endos sur les billets pour les passagers désirant voyager sur une autre compagnie.

Devant ces faits, Air France avait appliqué le principe de réciprocité et également réduit son offre. Elle a même supprimé certaines lignes (Nice - Alger - Marseilles, Tlemcen, Lyon - Annaba).

3.4. PERFORMANCES FINANCIERES D'AIR ALGERIE

3.4.1. Analyse des coûts et recettes

L'évolution des coûts directs d'exploitation et des recettes d'Air Algérie (pour le réseau international et domestique) est présentée sur les figures D.1, D.2, D.3 et D.4.

L'analyse des résultats analytiques par ligne présentés par la Direction Financière, montre qu'en matière de dépenses engagées par la compagnie, le carburant représente à lui seul 12.5 % des coûts directs d'exploitation en 1992. La maintenance représente quant à elle 20 % de ces coûts pour la même année.

En matière de recettes, la rubrique la plus rentable en ce qui concerne le réseau international concerne les recettes passagers qui représentaient 88% du chiffre d'affaire de l'année comptable 1992, contre 80% pour le réseau domestique. Le transport de fret sur le réseau international est insignifiant.

3.4.2. Politique des tarifs

La politique des tarifs appliquée par Air Algérie dénote deux particularités essentielles: elle reflète la prépondérance de la notion de service public sur la notion commerciale notamment pour les vols domestiques et elle met en évidence une volonté d'atteindre un équilibre dans la balance des devises pour les vols internationaux. Partant de ces principes, le niveau des tarifs intérieurs est supposé compensé par le niveau des tarifs des lignes extérieures.

3.4.2.1. Marché domestique

Les propositions de fixation des tarifs sur le réseau intérieur sont préparées par Air Algérie, visées par la tutelle et soumises au comité interministériel des prix qui est convoqué par le ministère du commerce. La tarification des transports aériens de

Fig.D.1. Evolution des coûts internationaux

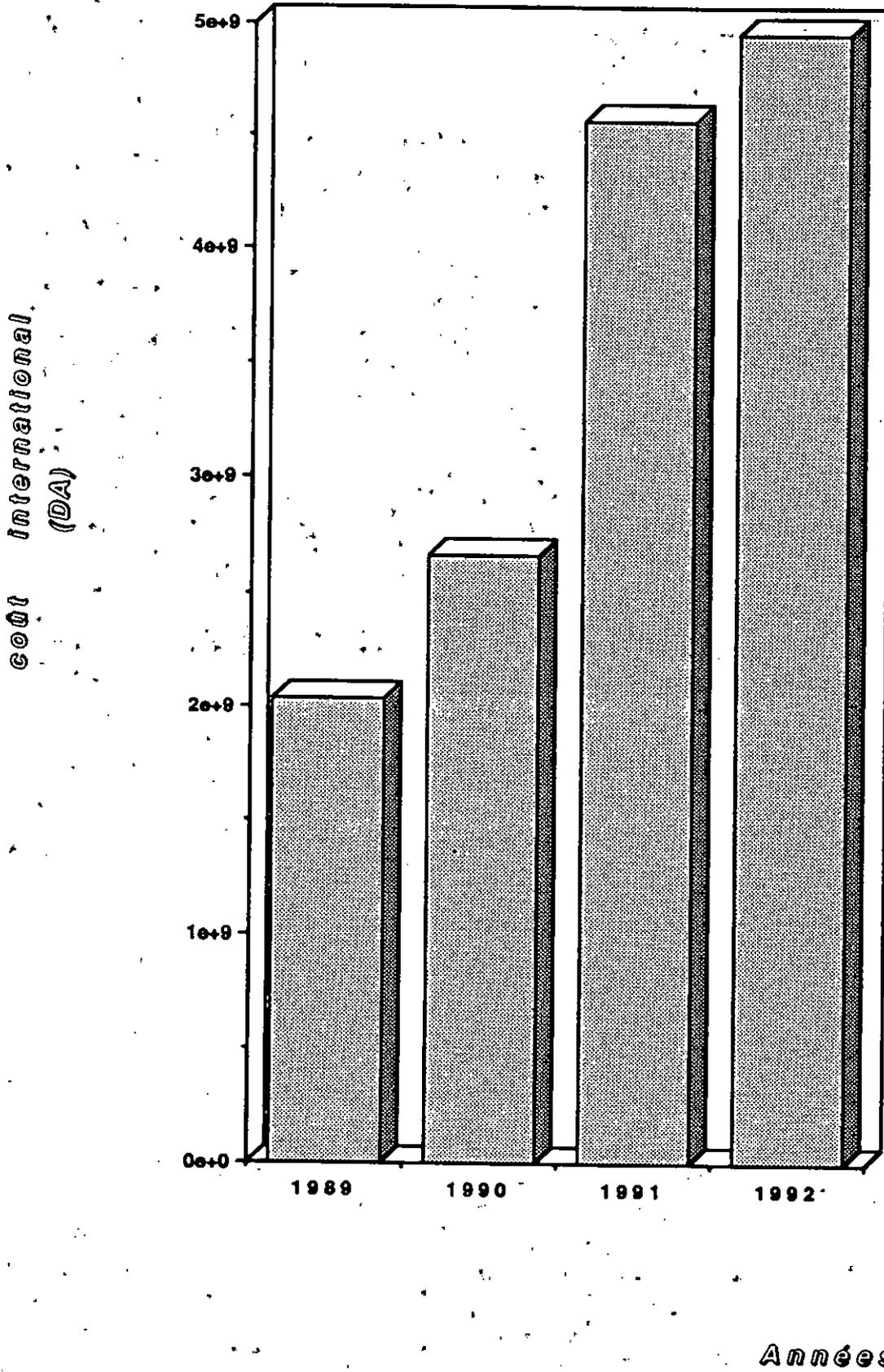


Fig.D.2. Evolution des coûts domestiques

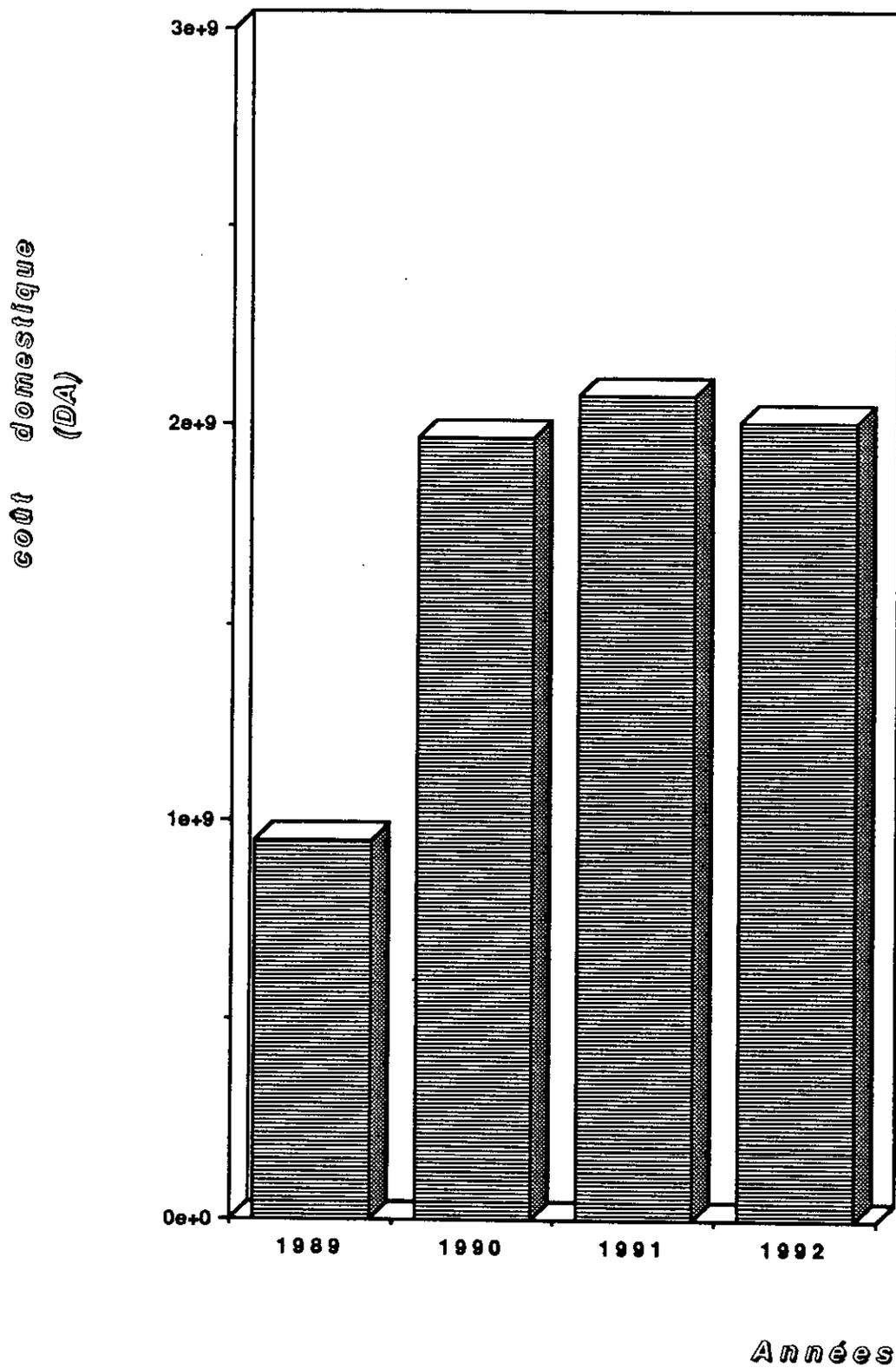


Fig.D.3. Evolution des recettes internationales

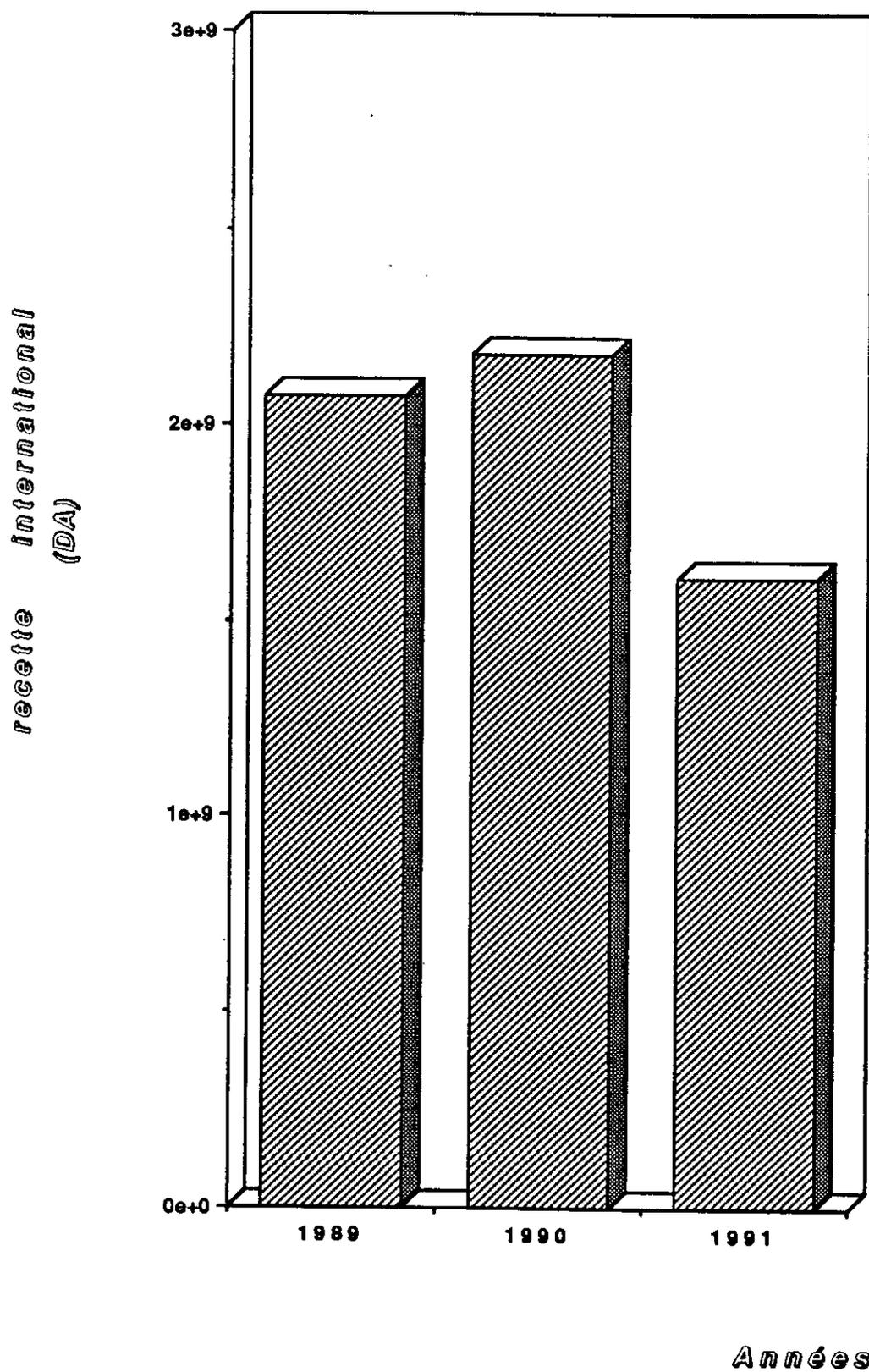
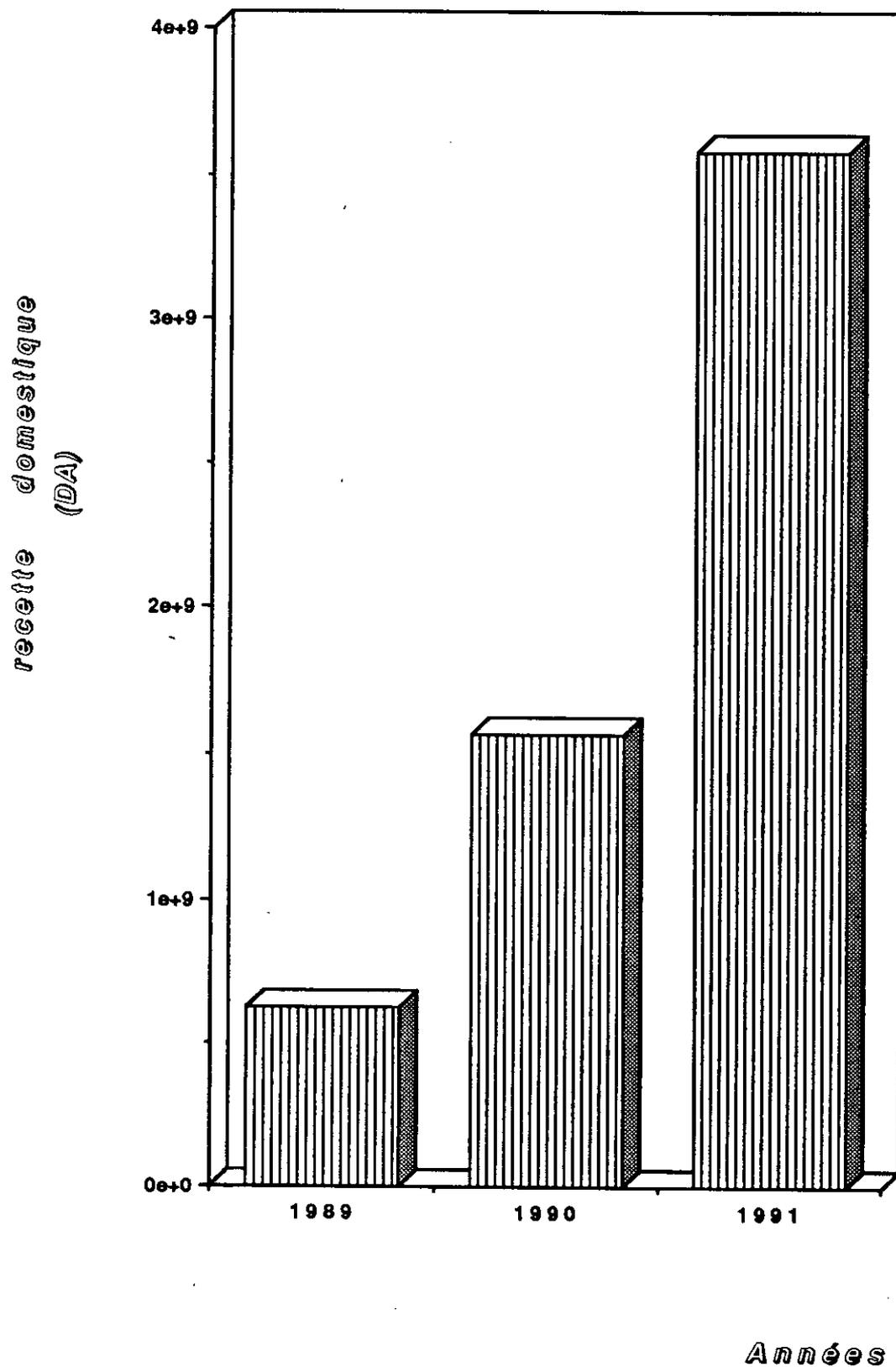


Fig.D.4. Evolution des recettes domestiques



passagers sur les lignes intérieures est finalement fixée par un arrêté conjoint (Ministère du Commerce, Ministère des Transports).

L'arrêté du 30 Avril 1988, précise la formule de détermination des tarifs qui se présente comme suit :

$$T = T_{bk} * d$$

où :

T: est le tarif par passager en aller simple,
T_{bk} : dénote le tarif de base kilométrique de la zone géographique considérée, et enfin
d : est la distance orthodromique entre l'aéroport de départ et l'aérodrome de destination.

Trois zones géographiques sont définies pour le calcul des tarifs des lignes intérieures:

Zone I : de la côte jusqu'au 34^{ème} degré de latitude Nord.
Zone II : du 34^{ème} degré au 30^{ème} degré de latitude Nord
Zone III : du 30^{ème} degré de latitude Nord à la frontière Sud.

Ce découpage correspond approximativement à la définition d'une zone nord, dotée d'une infrastructure terrestre et ferroviaire développée, d'une zone Hauts Plateaux où le train est inexistant et le seul autre mode de transport disponible est celui de la route (autocar, véhicules privés), et enfin d'une zone Sud, entièrement enclavée, où l'avion est en situation de monopole pour les grands déplacements.

Les taux de base kilométriques ont été fixés, en date du 15 Avril 1989, comme suit :

Zone I : 0,708
Zone II : 0,537
Zone III : 0,344

Lorsque l'aéroport d'origine et celui de destination ne sont pas situés dans la même zone, le tarif le plus bas est appliqué sur chaque relation.

3.4.2.2. *Marché International*

Pour le marché international, les tarifs sont soumis aux modalités de consultation bilatérale ou multilatérale au sein des conférences de tarifs des services aériens, notamment celle de l'IATA.

4. CLASSIFICATION DES PROBLEMES RENCONTRES

Le secteur du transport ayant connu un développement considérable, les responsables des compagnies aériennes se sont intéressés aux facteurs exerçant une influence sur les coûts et les taux de profits dans cette industrie. Dans le but d'atteindre cet objectif, la réflexion dans ce domaine s'est axée essentiellement sur l'énumération et la classification des problèmes que pourrait rencontrer une compagnie aérienne, ayant un impact sur son développement et sa croissance.

A partir du diagnostic de la situation actuelle de la compagnie aérienne Air Algérie, nous avons relevé de nombreux problèmes. Le grand nombre ainsi que la diversité de ceux-ci nous ont amenés à procéder à un groupage par famille, en tenant compte des ressources utilisées, des objectifs ainsi que des contraintes inhérentes aux sous-systèmes étudiés.

La classification des principaux problèmes est donnée comme suit:

- les problèmes du management de la flotte,
- les problèmes du management des routes,
- les problèmes de planification des horaires (fréquence comprise),
- les problèmes de management de la capacité,
- les problèmes de management de l'équipage,
- les problèmes de management de la maintenance,
- les problèmes de management des services au sol,
- les problèmes de contrôle du trafic aérien,
- les problèmes de management des services au vol.

5. CONCLUSION

Le caractère international du transport aérien qui vend ses services à l'étranger est significatif de son importance pour l'importation des masses monétaires en devises. Pour cette raison, des pays qui ont grand besoin de devises, tels que l'Algérie, doivent baisser leurs tarifs pour augmenter leur part de marché international et apporter les devises nécessaires à leur économie, quitte à perdre en rentabilité. Les projets et les créneaux de développement et de relance des activités de la compagnie sont très nombreux et variés. Ainsi nous enregistrons:

* La réalisation d'une base de maintenance moteurs pouvant recevoir dès cette année les moteurs des B727 et B737. Ceci implique non seulement une diminution dans les charges de la compagnie, mais également une source de produits intéressants.

* Le lancement de trois projets concernant la réalisation d'un hangar pour la maintenance des cellules d'avions, la réalisation d'un banc d'essai et d'un hangar d'équipements avioniques.

Il est à rappeler que la compagnie est l'une des plus importantes en Afrique, sinon la première, en terme du nombre de passagers transportés et du nombre d'appareils, mais sa gestion souffre de plusieurs problèmes objectifs.

Pour améliorer davantage son coefficient de remplissage, la compagnie doit adopter une stratégie qui aurait pour ultime but de rompre l'isolement en faisant de l'aéroport d'Alger Houari Boumédiène International, la plaque tournante, le centre de transit" du trafic entre l'Europe et l'Afrique et de bénéficier ainsi par cette position dominante, d'un effet de levier susceptible d'intéresser un partenaire moins bien placé.

De même, Air Algérie pourrait appliquer des tarifs concurrentiels, par exemple sur les lignes:

Paris - Alger - Dakar
Londres - Alger - Beyrouth
Frankfurt - Alger - Le Caire

et ces itinéraires seront moins chers qu'un:

Paris - Dakar
Londres - Beyrouth
Frankfurt - Le Caire.

Il faudrait ainsi redéfinir la politique tarifaire appliquée. Il faut toutefois noter que chaque période apporte son "cheval de bataille" pour pouvoir concurrencer les principaux partenaires. Depuis plus d'une dizaine d'années, partout dans le monde, on insiste principalement sur la rentabilité, la qualité de service, et l'image de marque. Toutes ces notions ont pris de plus en plus d'importance dans le transport aérien. Pour qu'il y ait une bonne qualité de produit ou une bonne rentabilité, l'exploitation doit être contrôlée de manière stricte

A l'heure des mutations que connaît le transport aérien, avec une Europe qui s'unit, un Maghreb qu'il faut préparer et des compagnies commercialement très agressives, Air Algérie se doit d'opérer un changement radical dans sa stratégie.

La ponctualité est une donnée essentielle de la réussite ; mais la ponctualité accompagnée d'excellentes prestations à bord, sont les garants de la réussite. Il ne faut pas oublier non plus que la structure d'accueil au sol est déterminante. Il n'y a pas d'autre voie à suivre. Pour y parvenir, le service technique doit être performant. Dans cet état d'esprit, il faut organiser des cours de formation et de recyclage pour tous les services et il faudra continuer à le faire en permanence.

Dans un contexte strictement opérationnel, nous devons souligner l'extrême importance d'un bon service d'accueil, d'une bonne programmation, d'une bonne coordination pour la sécurité dans le transport, pour une meilleure rentabilité et pour améliorer l'image de marque de la compagnie, tant au niveau individuel, c'est-à-dire du passager, qu'au niveau des autres compagnies internationales. Il faudra rentabiliser au mieux l'argent de l'actionnaire unique de la compagnie.

DEUXIEME PARTIE

Etat de l'art

L'objectif fixé est la formulation mathématique du problème d'affectation des avions et de la génération de leurs tournées. Le modèle doit permettre de calculer les valeurs optimales des variables opérationnelles (affectation des avions, horaires, routes) pour une compagnie aérienne telle que Air Algérie. L'ensemble de ces variables représente la stratégie commerciale de la compagnie sur un réseau défini et pour une période de temps donnée. L'état de l'art que nous présentons dans cette partie est une synthèse des éléments ayant contribué à l'aboutissement de cette recherche.

1. PLANIFICATION DANS LE TRANSPORT AERIEN

Le modèle qui fait l'objet de ce travail est un outil d'aide à la décision pour la planification stratégique des activités d'une compagnie de transport aérien. La planification dans le domaine du transport aérien est une activité fondamentale. Elle est aussi importante que la production et la vente de service. Le terme "**planification**", tel qu'il est considéré dans le modèle, correspond à cinq principaux axes dans la littérature. Ces derniers sont brièvement présentés ci-dessous.

1.1. Planification de la flotte

Sa principale variable est la quantité des divers types d'avions disponibles dans la flotte durant une période donnée. En conséquence, il s'agit de définir le plan temporel d'acquisition des avions de divers types et/ou le retrait des avions se trouvant déjà en service afin de constituer une flotte optimale.

1.2. Planification de la fréquence

Sa principale variable est le nombre de vols (fréquence de service) à effectuer entre deux aéroports, d'un réseau préalablement défini, pendant une période de temps donnée. Le problème devient plus compliqué dans le cas où la flotte comprend plusieurs types d'appareils.

1.3. Planification des routes

Sa principale variable est la séquence des vols des avions sur le réseau étudié. Celle-ci détermine d'une part la qualité des services par la forme de l'offre et de l'autre le plan de vol des avions [SOU81].

1.4. Planification de la capacité

Sa principale variable est le nombre des sièges alloués à un service défini pour une période de temps, pour un couple origine-destination et pour une route donnée.

1.5. Planification horaire

Sa principale variable est la séquence temporelle accordée au plan de vol défini par la planification des routes. Celle-ci est l'étape ultime du processus de la planification du service aérien d'une compagnie.

Ces cinq problèmes de planification ne se trouvent pratiquement jamais regroupés dans un seul modèle, essentiellement pour des raisons de complexité. Nous développons ces cinq axes dans les paragraphes suivants: Nous étudions également les autres sous-problèmes qui sont les suivants:

- la maintenance
- l'équipage
- le carburant
- la navigation aérienne
- les services au sol
- le système de l'information
- la commercialisation.

2.TYPES DE MODELISATION

Dans le domaine du transport aérien, il existe plusieurs méthodes de modélisation. Ces approches ont été classées selon deux typologies :

- * selon la structure
 - les modèles séquentiels,
 - les modèles intégraux.

- * selon le niveau du détail
 - les modèles agrégés,
 - les modèles désagrégés.

Les approches de modélisation sont ainsi classées entre deux bornes extrêmes, selon ces deux typologies. Donc, les modèles ne font pas partie d'un groupe précis mais on peut les niveler relativement comme plus ou moins désagrégés et plus ou moins intégrés.

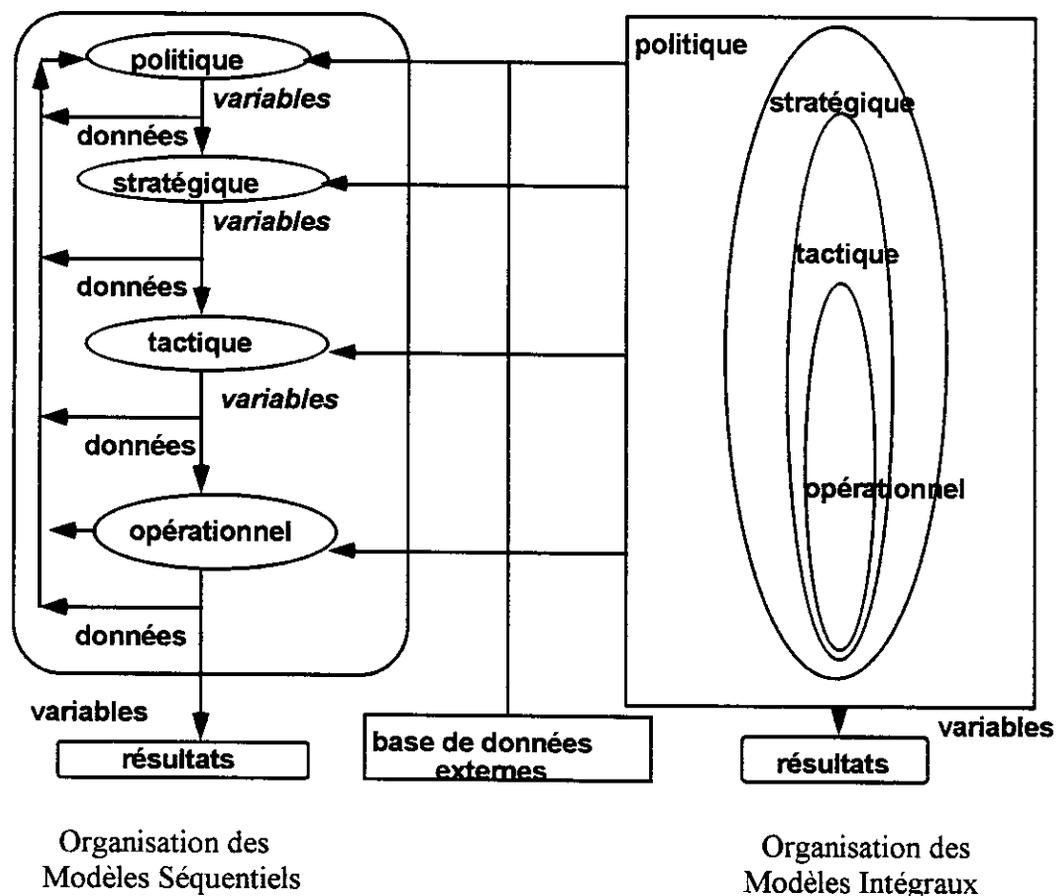


Figure 2.1. Modèles séquentiels et modèles intégraux

La figure 2.1. représente la comparaison schématique des modèles séquentiels et intégraux. Dans le cadre des modèles séquentiels, le modèle général est subdivisé en plusieurs sous-problèmes. La raison de ce découpage est liée notamment au souci d'économiser le temps de calcul ou tout simplement pour la raison du manque d'outils d'optimisation adéquats (ordinateurs, algorithmes de résolution). Dans cette figure, on remarque que dans le cas de modèles séquentiels, le problème principal prend la forme de plusieurs sous-problèmes de taille réduite (politique, stratégique, tactique et opérationnel). Dans chaque étape, on optimise un petit nombre de variables par rapport au problème général. Les variables optimisées d'une étape en amont deviennent les données internes du modèle pour l'étape en aval avec les données externes.

Les hypothèses de connexion de deux étapes nécessitent le retour en arrière dans le cas d'insatisfaction de contraintes de liaison. Ceci explique la présence d'un bus de données internes dans les modèles séquentiels. Ce bus, en plus du transfert de données vers l'amont, sert d'adaptateur et transformateur des données, car les étapes n'utilisent pas forcément les mêmes formes de variables. Chaque itération et chaque conversion dégrade la précision d'optimisation. En revanche, dans le cadre des modèles intégraux, toutes les étapes citées auparavant sont incorporées. Toutes les variables et les contraintes intervenant sont prises en compte dans un même processus d'optimisation. Cette approche a l'avantage d'éliminer les erreurs parasites dues aux conversions et aux opérations de combinaison des différentes étapes. Son inconvénient réside en son besoin énorme et peut-être même insatisfaisable de puissance en calcul nominal et en capacité de mémoire.

2.1. Classification structurelle

La structure d'un modèle peut prendre deux formes principales : séquentielle, ou intégrale.

2.1.1. Modèles séquentiels

On considère qu'un modèle est séquentiel si la planification est une suite hiérarchique de plusieurs étapes. Dans le cadre de ce type de modèles, par le biais de techniques diverses, on isole un groupe de variables de décision comme centre d'intérêt sur l'hypothèse que les autres variables sont des paramètres indépendants du problème. A titre d'exemple [HAK94] a considéré le problème comme séquentiel. Il a suivi deux étapes principales:

- la construction de la planification
- l'évaluation de la planification.

2.1.2. Modèles intégraux

On considère que les modèles qui optimisent plusieurs variables de décision, appartenant aux différents niveaux hiérarchiques, au cours d'une même procédure d'optimisation et sans passer par les moyens d'itération définis précédemment, sont des modèles intégraux. Le niveau d'intégration d'un modèle varie en fonction de la marge de ces niveaux hiérarchiques intégrés dans le modèle. Cette approche de la présentation d'un modèle n'existe pas, selon [HAK94], dans la littérature concernée.

2.2. Classification selon la précision

Les modèles sont également classés selon les paramètres utilisés et les résultats, en modèles agrégés, ou modèles désagrégés.

2.2.1. Modèles agrégés

Selon la typologie de [HAK94], l'agrégation d'un modèle affecte la finesse et la qualité opérationnelles de ses résultats à l'aval et la pertinence des hypothèses concernant les paramètres du problème à l'amont. Il est évident que les données agrégées sont plus faciles à collecter et à manipuler. D'autre part, on peut réduire le besoin des moyens de calcul d'optimisation grâce à la diminution du nombre de variables. En revanche, les résultats agrégés sont difficiles à utiliser et souvent imprécis.

2.2.2. Modèles désagrégés

Les modèles dont les résultats sont immédiatement opérationnels en aval et les données individuelles, réelles et sans approximation en amont, sont des modèles désagrégés. Un modèle basé sur un ensemble de paramètres réels sans approximation et dont la totalité des variables de décision traitées débouche sur des résultats opérationnels sans avoir besoin d'un traitement ultérieur, est considéré désagrégé à 100%. Ceci est pratiquement infaisable dans le cas des problèmes de grande taille comme celui de la planification optimale du transport aérien.

3. ANALYSE DIMENSIONNELLE

Le problème d'optimisation à modéliser est défini par une série de dimensions. Ces dimensions sont elles aussi présentées par une typologie:

- système de transport étudié,
- dimension temporelle,
- dimension géographique.

3.1. Grandeur du système de transport

Pour commencer l'étude d'un problème, on se doit de définir la taille du système concerné. Les études pour l'optimisation d'une ligne ou pour une flotte d'un type d'avion (d'une compagnie) représentent un sous-problème du réseau d'exploitation de cette compagnie et de sa flotte. Un système comprenant uniquement l'intérêt d'une compagnie est un sous-système du système regroupant les intérêts collectifs d'un pays, d'une région et celui des usagers. Un problème est concrétisé par ses variables de "consommation" (entrées) et de "production" (sorties) par rapport à son environnement [DNK73].

Toutes les variables internes d'un système ne participent pas au processus d'optimisation. *Exemple: le prix d'un billet payé par les passagers aux compagnies est une variable interne qui ne représente ni la consommation ni la production du système comprenant les usagers et les compagnies.*

Le choix de la dimension du système étudié nous permet d'isoler certaines variables de décision. Ainsi, il est possible de bâtir des modèles en tenant compte seulement d'une partie du problème et en ignorant l'autre quelle que soit la taille à l'origine.

3.2. Dimension temporelle

A l'exception de l'ordre hiérarchique de la suite de prises de décisions (provenant de l'économie d'échelle, de la réglementation, etc.), il existe des contraintes liées à l'horizon de temps sur lequel la planification est considérée comme effective. Les modèles de planification sont influencés par la profondeur de l'intervalle du temps durant lequel ces paramètres sont considérés fixes. Le modèle qui a une validité dans un plus grand intervalle de temps est hiérarchiquement situé à un niveau supérieur par rapport aux autres modèles ayant un intervalle plus court.

La prise en considération de plusieurs horizons, simultanément, dans un modèle de planification, augmente la précision et la qualité de l'optimisation globale. En revanche, le nombre élevé d'itérations nécessaires pour ces modèles rend le processus de l'interaction entre ces multiples sous-problèmes beaucoup plus complexe.

Les horizons de planification sont liés aux hypothèses émises pour la modélisation. On peut limiter l'influence des diverses variables grâce à ces horizons. On peut ainsi fixer une variable comme paramètre constant pendant une période de temps donnée. Cette technique est souvent utilisée pour éliminer les variables encombrantes dans le modèle.

Une typologie de la dimension temporelle, qui résume l'étude faite dans les revues spécialisées sur les transports généraux, le transport aérien, l'économie et les statistiques, a été proposée par [HAK94]. Cette typologie prend la forme suivante:

3.2.1. Planification à très long terme

Cette approche concerne souvent une période de plus de vingt ans. Par exemple, l'investissement dans une technologie par les états ou une décision concernant l'infrastructure de réseau de transport général. Ces approches traitent souvent les systèmes généraux de transports.

3.2.2. Planification à long terme

La planification envisageant une période de dix à vingt ans est considérée comme long terme. Les exemples de ce type de planification sont l'achat des avions par une compagnie, l'investissement sur le réseau commercial, le financement des systèmes logistiques, etc. Les compagnies sont souvent concernées à ce niveau spécialement, pour la planification financière.

3.2.3. Planification à moyen terme

Les variables de cette planification ont une influence sur une période de cinq à dix ans. Par exemple l'embauche de personnel se justifie pour une période de cinq ans.

3.2.4. Planification à court terme

On entend par planification à court terme une période d'un à cinq ans. Dans la hiérarchie de la prise de décision, elle se situe au niveau tactique. Les investissements doivent être récupérés avant la prise d'une autre décision. Les activités concernant la location des avions, accords techniques et commerciaux, marketing, embauche de personnel commercial ainsi que l'organisation de la plupart des soutiens logistiques, font partie de ce groupe.

3.2.5. Planification à très court terme

La période concernée est d'une heure à un an. On considère que le processus de prise de décision à ce niveau est opérationnel. Dans le cadre des bornes définies par les autres niveaux, les gestionnaires ont la liberté de conduire le système en fonction du retour des données et de l'observation instantannée. Par exemple, la planification de la fréquence, de la capacité, des routes, des horaires, de l'affrètement des avions, de l'émission des billets, de la tarification, de l'entretien et de la maintenance en ligne est réalisée dans le cadre de la planification à très court terme.

3.2.6. Planification en temps réel

Celle-ci correspond aux nouveaux axes de recherche qui doivent beaucoup au développement des systèmes interactifs d'aide à la décision. On peut citer dans le cadre de cette planification, l'allocation des portes aux avions atterrissants, ainsi que la gestion de flux à la phase d'approche ou la gestion des recettes incorporée aux systèmes de réservation informatisés (SRI).

3.3. Dimension géographique

Le réseau du transport aérien avec sa taille géographique a une influence déterminante sur la modélisation. Outre la classification administrative des réseaux en réseaux nationaux, internationaux et régionaux, il existe une autre classification en fonction des contraintes spécifiques de taille des réseaux (la distance de vol) étudiés. Chaque réseau est défini par ses caractéristiques spécifiques. Les contraintes techniques sont accentuées par l'augmentation de la distance à parcourir. Le caractère de la fonction de demande varie selon la distance du réseau. Par exemple, selon [GUN64], l'importance de l'impact de la fréquence des services est moins grande sur les distances plus longues. Les méthodes gravitationnelles pour la prévision de la demande traitent ces hypothèses d'une façon très détaillée [TAN78]. Les réseaux géographiques à leur tour peuvent être classés comme suit:

3.3.1. Réseau très long courrier

Citons à titre d'exemple le réseau entre l'Europe et des pays de l'Océan Pacifique. Les distances sont très longues et la durée de vol dépasse la durée de service de l'équipage. Les vols sont très souvent effectués avec des escales car les rayons d'action technique des appareils sont dépassés. Dans ce cas, les principaux problèmes de gestion sont la planification de la flotte, la gestion de l'équipage et des routes. Par exemple, le problème intitulé "Port Linkage" traité par [WAP70] et [RIC76], fait partie des études concernant ce type de réseau.

Les contraintes techniques comme le rayon d'action (qui varie en fonction de la charge payante) représentent les autres aspects du problème. La gestion de la capacité sous la contrainte de la limitation des appareils due à la distance est donc un problème de réseau très long courrier [WAN82].

3.3.2. Réseau long courrier

Le réseau transatlantique appartient à cette catégorie. Les vols sont plus fréquents et leurs durées sont toujours longues mais peuvent se réaliser sans escales. Le vol peut être effectué avec un même équipage mais celui-ci ne peut pas effectuer le retour. Par ailleurs, il n'y a toujours pas de mode de transport concurrent ou alors il est négligeable. En outre, il faut respecter les contraintes des fuseaux horaires, d'où l'importance commerciale des heures de départ pour ces vols. Dans ce cas, les problèmes de gestion à traiter sont souvent les problèmes de l'équipage et la satisfaction de l'offre avec une flotte minimale. Les contraintes commerciales et réglementaires empêchent de raffiner les autres variables de décision, supposées absurdes par les dirigeants des compagnies (sauf aux Etats-unis d'Amérique à la suite de l'acte de déréglementation de 1978).

3.3.3. Réseau moyen courrier

Le réseau intra-européen est l'exemple type de cette catégorie. Le réseau moyen courrier connaît un développement spectaculaire depuis les années 1980. L'amélioration de la qualité de la vie a beaucoup aidé à la croissance du trafic de ce type de réseau. Ces réseaux présentent des différences très importantes selon les régions, même si les distances et les types d'avions utilisés sont équivalents. Les chercheurs américains se sont intéressés beaucoup plus à ce sujet que leurs homologues européens.

3.3.4. Réseau court courrier

Il s'agit du réseau interrégional, concernant généralement un même pays.

4. DECOMPOSITION DU PROBLEME GENERAL

Le problème général de planification d'une compagnie de transport aérien est un ensemble de plusieurs sous-problèmes spécifiques. Nous avons décomposé ce problème dans les paragraphes suivants et nous analysons le contenu de chacun de ces composants. Nous avons défini 12 sous-problèmes faisant partie de la typologie présentée dans la figure 2.2.

La plupart de ces sous-problèmes sont déjà traités et cités sous diverses formes et dans différentes conditions [RAP83], [ETM85]. Le problème général selon notre typologie se subdivise d'abord en trois grands axes:

- production,
- soutien logistique,
- commercialisation.

4.1. La production des services

La production dans le transport aérien consiste en des activités définissant la qualité et la quantité de l'offre. Nous analysons la production en la décomposant en cinq sous-problèmes de management:

**Problème Général
de Management
dans le domaine
du Transport Aérien**

Production

- flotte
- fréquence,
- capacité,
- routes,
- horaires.

Commercialiation

- Prévission de la demande
- Comportement de la demande

Soutien Logistique

- Maintenance,
- Equipage,
- Carburant,
- Contrôle du trafic Aérien,
- Services au sol,
- Flux d'information

Figure 2.2. Décomposition du problème général

4.1.1. Management de la flotte

L'outil principal de la production de service d'une compagnie de transport aérien est sa flotte. Quelles que soient les conditions de la propriété, une compagnie régulière doit posséder un certain nombre d'appareils sous contrôle afin d'assurer ses services de transport. La principale variable de décision de ce sous-problème est le nombre optimal de chaque type d'avion dans la flotte à un moment donné. L'objectif est donc de former la meilleure flotte correspondant aux besoins de la compagnie en fonction du temps. Le besoin de la compagnie en matière de flotte dépend de paramètres "technologie aéronautique" et "environnement socio-économique", qui eux-même varient en fonction du temps [FIA84]. Le problème de management d'une flotte est combinatoire [MAG81].

La variation des délais de livraison et le coût de revient des appareils en fonction du type d'acquisition représentent les principaux enjeux. Par exemple le coût de revient est plus faible si la compagnie participe au projet d'un nouvel avion et passe la commande longtemps à l'avance de la mise en service. Ainsi, les différents modes d'acquittement comme, par exemple, la location, le leasing, l'affrètement etc... varient selon la durée du délai d'acquisition et la durée d'utilisation de l'appareil (la planification dynamique de la flotte).

L'état de la flotte est une donnée constante pour toute planification à court terme, mais elle est une variable pour la planification à long terme. Le dilemme est de savoir si nous formons une flotte selon le service aérien envisagé ou si nous formons toute la flotte d'abord et l'optimisons avec un service adéquat ensuite. [ETM84] traitent la deuxième proposition car le service optimal est basé sur la prévision à court terme et sur le comportement des passagers. Mais les variables micro-économiques intervenant dans la prévision à court terme ne sont pas suffisamment stables pour une projection à long terme. En bref, les contraintes financières étant très importantes et les prévisions à long terme ayant une marge d'erreur insatisfaisante, la planification de la flotte par la projection du service actuel n'est pas jugée efficace. En revanche, la formation d'une flotte dépend largement des variables macro-économiques, de l'état financier de la compagnie et des constructeurs d'avions [AIR90], [BOE92], [MDD89]. La méthode de prévision classique dans ce domaine était la méthode "Delphi" (intuition des experts du domaine) [ENK76]. Celle-ci est aujourd'hui encore largement utilisée pour la prévision à très long terme.

Le management d'une flotte à court terme dans l'objectif de maximiser le profit de la compagnie considère les variables représentant la flotte (nombre et types d'avions) sous deux formes:

- Le nombre d'avions dans une flotte est une donnée constante. Dans ce cas, le problème de management de flotte est résolu par les méthodes de simulation.

- Le nombre d'avions d'un type donné fait partie des variables de décisions d'un modèle d'optimisation. La minimisation du nombre d'avions devient l'objectif d'un système où le revenu est défini comme une constante. [SAB74] présente des modèles de flotte minimale pour le transport. Cette forme est évidemment l'axe de recherche le plus utilisé dans le cadre de ce sous-problème [HOO88a,c], [POK77]. La programmation Non Linéaire et Mixte Entière est utilisée par [WOT89] pour résoudre ce problème, lorsque sa taille le permet.

Une flotte peut présenter deux formes:

- composée d'un seul type d'avions (homogène),
- composée de plusieurs types d'avions (hétérogène).

En réalité, une flotte est composée souvent de plusieurs types d'appareils. L'optimisation d'une flotte hétérogène étant plus compliquée, les modèles actuels se simplifient soit par la séparation de la flotte en sous-groupes, soit par l'assimilation de plusieurs types à un type d'avions représentatif en supposant que tous les avions de la flotte considérée peuvent être remplacés par celui-ci.

4.1.2. Management de la fréquence de service

La fréquence de service aérien est le nombre de liaisons entre deux centres pendant une période donnée. La fréquence influence la qualité et la quantité de l'offre du produit de transport aérien de deux manières:

- Le décalage entre les heures de départ reliant deux centres est appelé le retard programmé. Les passagers désirant partir pendant la période entre deux départs doivent changer leur plan et prendre le service précédent ou suivant l'heure envisagée de départ. Cette attente ou cette avance a une influence négative sur la demande et la satisfaction des clients. Cet impact sur la demande est pris en considération dans le cadre des travaux de [VOI69], [BOI74], [SOU78], [POK77], [SWA77], [ERT80], [SFR80], [SFR81], [KAN81], [DOL93], [TEO83], [TEO84], [TEO89] et [TEK89] qui considèrent le problème principal autour de la "fréquence de service".

- L'autre influence de la fréquence de service de transport aérien est la variation de la capacité totale de sièges offerts pendant la période. Pour un type d'avion donné, le nombre de sièges disponibles entre deux centres est une fonction de la fréquence de vols [DAI76]. Cet axe (le management de la capacité) est aussi l'objet d'un autre sous-problème. Nous considérons que l'influence de la fréquence sur la capacité permet aux modèles de relier la fonction de coût (nombre de vols pour un type d'avion donné) et la fonction du revenu (nombre de sièges mis en vente).

Outre son influence sur la qualité et la quantité de l'offre, la fréquence est le générateur principal des coûts opérationnels de la compagnie. On considère la "fréquence de service" comme une variable de décision interagissante avec la gestion de la flotte, car l'augmentation de la fréquence du système nécessite davantage d'avions disponibles dans la flotte [MAT83a].

Dans le cas de modèles séquentiels, la planification de la fréquence est suivie par l'attribution des avions selon un horaire défini. Une fréquence élevée rend le modèle plus praticable pour l'ajustement approximatif des horaires avec moins d'erreurs. Dans le cas du marché concurrentiel, la fréquence a également une influence déterminante sur la part de marché de la compagnie [GUN64]. La planification de la fréquence dépend largement de la forme du réseau qui est défini de façon stratégique.

4.1.3. Management de la capacité de service

Il s'agit de définir le nombre optimal de sièges offerts sur une Origine-Destination (O&D) d'un réseau pour une période donnée. La planification de la capacité est souvent confondue avec le "Yield Management" [TRE82]. Certes, le "Yield Management", ou la gestion des recettes est basée largement sur le management de la capacité. Mais en pratique, ceci est un problème plus vaste. Si on procède de la manière séquentielle, on peut calculer la fréquence indépendamment de la capacité, en se basant uniquement sur l'influence de la fréquence sur la demande. Puis, d'une façon dynamique, on affecte une capacité suffisante à la demande, qui est attirée par la fréquence affichée [NAK86]. Si la contrainte de la "flotte" pouvait être négligée, on peut définir la capacité moyenne des avions attribués aux vols en divisant le nombre de passagers prévus par la fréquence. Ensuite, en partant de la durée de vol, on pourra déduire le nombre d'avions nécessaires pour les opérations. On peut considérer le sous-problème "management de la capacité" sous trois angles de vue:

- *le nombre total de sièges affectés pour chaque O&D et le taux de remplissage,*
- *la répartition de la capacité affectée entre plusieurs routes,*
- *la gestion des recettes ou la répartition de la capacité entre plusieurs classes de produits ou Yield Management.*

4.1.3.1. Nombre total de sièges affectés pour chaque O&D et taux de remplissage

La demande est convertie en passagers transportés par l'affectation d'une capacité adéquate. Cette capacité physique doit évidemment être supérieure ou égale au nombre de passagers transportés. Le problème est relativement simple si la compagnie ne sert qu'une seule classe tarifaire et si le service ne constitue que des vols directs. Dans le cas où la compagnie offre un service avec des escales, nous ne tenons plus compte des avions mais du flux des sièges quelle que soit la combinaison des routes. Dans la phase de construction de la planification, l'essentiel est de définir une capacité en fonction de l'élasticité de la demande vis-à-vis de la probabilité de la disponibilité du service. Cette valeur est définie par le taux de remplissage pour un avion entier aussi bien que pour les quotas réservés aux passagers pour différents passagers pour différents marchés. En somme, ce point de vue étudie l'influence du taux de remplissage d'une capacité réservée pour un service. Le taux de remplissage est le rapport moyen du nombre de sièges réservés et du nombre de sièges occupés. La variation du nombre de passagers embarqués en fonction de la capacité affectée donne au problème un caractère non linéaire. Le nombre de passagers transportés et le nombre de passagers refusés faute de capacité disponible varient selon le taux de remplissage et en fonction de la demande. La variation de la demande en conséquence de son insatisfaction faute de place disponible fait partie des études commerciales pointues.

4.1.3.2. Répartition de la capacité affectée entre plusieurs routes

La capacité totale des sièges disponibles pour une O&D est la somme de tous les sièges réservés pendant une période donnée, quelle que soit la combinaison des routes. Lorsque tous les vols sur un couple d'O&D sont directs et la flotte est homogène, la capacité totale est égale à la fréquence multipliée par la capacité unitaire de l'avion. Ceci est le cas le plus simple. Mais quand il s'agit de vols indirects (avec correspondance ou escale), le transport des passagers voyageant sur différentes O&D se fait dans un même avion sur un segment de la route. Dans le cas où la demande ne justifie pas économiquement un

service en vol direct à cause de la contrainte de la fréquence minimale, la stratégie de transport avec escale ou correspondance devient intéressante. Nous pouvons citer l'exemple de [HAL89] appliqué au transport de fret.

Outre les contraintes sur la demande, la capacité de sièges est limitée par les types d'avions et leurs disponibilité dans la flotte. Pour des raisons techniques, il est préférable d'utiliser un même type d'avion sur un couple d'O&D. Puisque la demande est cyclique, le meilleur plan d'affectation doit l'être aussi. Donc la variation périodique de la demande peut être satisfaite par la variation périodique de la capacité. Celle-ci se fait par l'augmentation de la fréquence autour des goulots d'étranglements ou tout simplement en assignant des avions de plus grande capacité à ces points rouges. L'assignation de la capacité à la demande ou l'assignation de la demande à la capacité disponible, dans divers vols alternatifs programmés préalablement, est étudié par [SOU78a] et [SOU80] en se basant sur le concept de l'optimisation collective.

4.1.3.3. Gestion des recettes (répartition de la capacité entre plusieurs classes de produit ou encore "Yield Management")

Il s'agit de la définition de la capacité optimale à allouer aux différents groupes tarifaires afin de maximiser les recettes. Le "Yield Management" en l'état actuel des choses n'interagit pas avec la planification de la fréquence, ni la capacité totale, ni l'horaire [STT87]. Il est un point intermédiaire entre la planification du service et le marketing. Il est directement lié à la tarification. L'objectif est de remplir chaque siège d'un vol selon les diverses stratégies de marketing mais en donnant la priorité à celle qui permet à la compagnie d'encaisser le plus.

4.1.4. Management des routes ou des itinéraires

Le management des itinéraires correspond au choix optimal des routes à emprunter pour transporter la demande (passagers) par une capacité totale limitée. La description du problème et l'état de l'art sont présentés par [SIP69]. On considère le problème de routage des avions comme un problème général de routage de véhicules avec fenêtres de temps et demande stochastique [DLT89]. Des exemples du problème de routage et de l'affectation des avions dans le domaine du transport aérien sont présentés par [LEV69]. La route représente, dans le cadre de notre étude, la séquence de vols directs effectués pour aller d'un aéroport d'origine jusqu'à un aéroport de destination, éventuellement en passant par des aéroports intermédiaires. Quel que soit l'itinéraire pris dans l'air, nous supposons qu'il existe une liaison unique entre deux points terrestres pour un vol direct.

4.1.5. Planification horaire

Ce sous-problème concerne la définition de la séquence optimale des fréquences d'un avion d'une flotte, sur un réseau et pour une période donnée. Son rôle est de fixer les heures de départs et d'arrivées des avions. Lorsque nous réalisons un plan horaire, il faut respecter les fréquences et la capacité préalablement définies sous les contraintes de disponibilité de la flotte [MIJ72]. La planification horaire dans un modèle est la dernière étape opérationnelle de la production des services lorsqu'elle est associée à l'affectation des avions aux vols.

Dans le cas où la planification horaire se limite à la génération des horaires pour un type d'avion plausible et non pour un avion individuel donné, il faut ajouter un module d'affectation des avions aux horaires [LEB85]. [TEG84] présente un modèle de réorganisation des horaires d'un plan initial suite à la réduction de la flotte pour une raison quelconque.

La principale contrainte du problème est la conservation du flux. Celle-ci exige la présence de l'appareil à l'aéroport au moment de décollage. Par exemple, le nombre de départs d'un point ne peut pas dépasser la somme du nombre d'avions sur place et du nombre d'avions arrivés dans le segment de temps précédent. Les contraintes supplémentaires sont liées au repositionnement des avions après le vol, au couvre-feu exigé dans certains aéroports et à la comptabilité de services entre l'avion et l'aéroport qui rendent le problème plus complexe.

La complexité du problème augmente si nous prenons en considération les irrégularités de fonctionnement (pannes, fermeture des aéroports, congestion, ...). Une simplification consiste à supposer que les durées des vols et des escales sont des paramètres constants (qui sont, en réalité, des variables stochastiques).

La modélisation combinatoire de ce sous-problème est théoriquement possible pour une taille réduite. Mais il faut éviter cette approche dans le cas pratique. En effet, le nombre de scénarios plausibles tend vers l'infini quand nous avons quelques dizaines d'avions et de routes à desservir.

Nous pouvons voir le problème comme un modèle d'ordonnement: les fréquences de vols peuvent être assimilées au nombre de produits et les avions aux postes de production. Une autre approche est le "Problème de Tournées de Véhicules à Capacité Limitée avec Contraintes de Temps". Ces deux approches ne sont pas employées à notre connaissance dans ce domaine.

La planification optimale des horaires peut être présentée par quatre objectifs:

- la minimisation du nombre d'avions nécessaires et donc des coûts fixes (management de la flotte),
- la réalisation de la production maximale (souvent définie par la planification de la fréquence et de la capacité) avec la flotte disponible [ABA89],
- la couverture des heures préférées de la demande pour le départ et l'arrivée, donc la satisfaction qui en résulte par l'augmentation du revenu pour une même quantité de produit,
- le respect des contraintes de management de l'équipage, des services au sol, des services au bord et de la maintenance.

L'interaction entre la planification horaire, la planification de la fréquence et de la capacité est primordiale. Les deux derniers problèmes font partie de la construction, alors que le premier problème relève de l'évaluation de la planification globale [SOU78a], [ETM85], [GRA85]. Il existe des modèles d'une taille beaucoup plus modeste.

Les contraintes horaires, commerciales et d'utilisation des appareils sont considérées simultanément pour définir le routage optimal avec l'objectif du profit maximal [LAH77], [WOT89]. Par exemple [SOU78a] et [SOU78b] étudient l'évaluation des horaires en relation avec l'élasticité de la demande, dépendant du comportement des passagers vis-à-vis de la fréquence et de l'horaire préférentiel. C'est le cas de [BAC87] qui s'intéresse à l'adaptation des horaires de vol pour les services avec escale. Les modèles de simulation pour l'optimisation de la planification horaire pour un problème d'une taille importante sont présentés par [COG84].

4.2. Soutien logistique

Le bon fonctionnement de la production de services de transport nécessite une série d'activités de soutien logistique. Celles-ci sont aussi importantes que la production des services. D'une part les coûts liés à la logistique sont importants et, d'autre part, les contraintes sont déterminantes pour la production. Les principaux services faisant partie du soutien logistique dans le transport aérien sont:

- maintenance,
- équipage,
- carburant,
- contrôle du trafic aérien,
- services au sol,
- flux d'information.

4.2.1. Maintenance

Il s'agit de définir la séquence optimale de l'immobilisation des avions pour la maintenance. Un appareil de production s'use. Pour son bon fonctionnement, nous devons le contrôler, le régler et remplacer ses pièces défectueuses. Pour chaque avion, donc, on doit respecter un plan de maintenance. C'est une procédure coûteuse en main-d'oeuvre et en pièces détachées. D'autre part, elle est indispensable et réglementée par les autorités juridiques. Les contraintes techniques de la maintenance sont définies par le constructeur, sous contraintes de poursuites judiciaires provenant de la réglementation et de contraintes commerciales provenant des exigences des compagnies et de la concurrence du marché. Les documents techniques de la maintenance préparés par le constructeur indiquent dans quel état les composants doivent être remplacés et quels intervalles de contrôle doivent être appliqués.

La maintenance des avions obéit à la loi de la catastrophe comme la maintenance des centres nucléaires ou le contrôle médical. Les études sont orientées vers une maintenance économique en respectant les contraintes très rigides de la sécurité [ÖZP88], [ÖZE88]. La compagnie, dans la limite de ces contraintes, peut créer son plan de maintenance. L'objectif est évidemment la maintenance à un coût minimum tout en satisfaisant la réglementation.

4.2.2. Management de l'équipage

Chaque vol programmé doit être associé à un équipage spécifique. Le coût de l'équipage est relativement important. L'objectif principal des compagnies à ce propos est de

minimiser le coût de l'équipage tout en respectant les contraintes de sécurité et commerciales. Il existe trois éléments principaux:

- affectation de l'équipage aux vols,
- repartition des heures de repos,
- organisation des présences pour le remplacement.

Dans les trois cas, l'objectif est de réaliser les charges nécessaires avec effectif minimal tout en respectant une série de contraintes très compliquées, exigées par la réglementation.

L'équipage est constitué d'une partie technique et d'une partie commerciale. Pour le bon fonctionnement du système, nous avons besoin d'un certain effectif correspondant à la taille de la compagnie et à l'utilisation des appareils.

Dans le cas des approches unilatérales hiérarchisées, il est important de voir à quel niveau le sous-problème de management de l'équipage est interactif avec la planification générale. Si, par exemple, la planification horaire est construite sans tenir compte de l'équipage, le problème se simplifie.

Dans la littérature, le problème est souvent présenté sous la forme hiérarchisée. Un modèle de gestion de l'équipage par génération de colonnes est développé par [MIN84], [LMO88]. Ce modèle est basé sur la programmation linéaire généralisée.

4.2.3. Management de carburant

Le coût du carburant est un des coûts opérationnels dominants d'une compagnie de transport aérien [DRA74]. Tenant compte de la différence de prix du carburant et des accords avec les fournisseurs (internes et externes), la compagnie peut diminuer sensiblement ses coûts en gérant mieux la quantité d'approvisionnement à différents aéroports [HAK94], [STW77], [STL75], [WAC76] et [SMT76].

Le deuxième problème lié à la gestion de carburant correspond à la vitesse de l'avion. En fonction de la disponibilité de la flotte, la compagnie peut économiser la consommation par vol à basse vitesse, ce qui prolonge la durée de vol [PIL74].

4.2.4. Contrôle du trafic aérien

Pour des raisons de sécurité, les avions en vol circulent dans des couloirs à sens-unique prédéfinis. Ces couloirs ont une section rectangulaire de dimensions fixes. La réglementation exige aussi une durée de vol entre deux avions dans un couloir selon la capacité et l'efficacité du contrôle aérien dans la région. Il en résulte que le couloir a un débit limité. Ces couloirs sont souvent saturés dans les axes de trafic de haute densité. La complexité du problème est aiguë quand le problème a une forme dynamique, dépendant des retards des avions et de la congestion des aéroports.

Le problème de management de flux des avions est présenté par [ODO87]. Une partie du problème de contrôle de transport aérien (CTA) consiste à maximiser l'utilisation des capacités de ces couloirs pour augmenter le débit des avions ou des passagers [ANR87]. Le modèle du réseau présenté par [WAG91] est un exemple des mesures

anticongestionnelles. Notamment, l'augmentation de capacité des contrôleurs pour gérer plus d'avions dans un même segment de temps et dans un même espace physique est un des principaux objectifs [DUH74].

4.2.5. Flux d'information

Une compagnie de transport aérien doit posséder un système d'information interne et externe, avec des contraintes de rapidité et de précision très élevées. Ainsi, le flux d'information incorporé au traitement des données représente un domaine qui se développe rapidement grâce au progrès technologique. Les premières approches des compagnies de transport aérien, il y a quelques décennies, étaient l'organisation et la planification des réseaux téléphoniques [TSA85], [WHI61]. Aujourd'hui, le souci principal est de définir une organisation reliant différents centres opérationnels de la compagnie afin d'assurer une prise de décision optimale. D'ailleurs, l'utilisation de la micro-informatique dans les compagnies de transport aérien a un impact considérable sur le développement des systèmes d'information [CLE86].

4.2.6. Management des services au sol

La planification et la construction des aéroports sont indépendantes des activités opérationnelles d'un aéroport. Elles sont réalisées selon les estimations économiques, conformément à la politique du transport [WAL78], [MOR85]. Par contre, les activités opérationnelles sont dépendantes de la capacité et de la technologie des infrastructures aéroportuaires. Cependant, le management des aéroports est étroitement lié aux politiques commerciales des compagnies utilisatrices, à leur accessibilité par le transport terrestre et à leur environnement socio-économique [DEK79].

L'interface entre le transport aérien et le transport terrestre est un point délicat. D'une part, c'est la phase la plus compliquée du vol. D'autre part, c'est la phase de chargement, déchargement et d'entretien dont le fonctionnement est dépendant de plusieurs facteurs. Le management de ce système annexe est actuellement réalisé indépendamment de celui de la production de services. En l'état actuel des choses, le management de service au sol a peu de variables communes avec le reste du problème général de production des services.

4.3. Commercialisation des services

La conception classique des modèles distingue la production de services (génératrice de coûts) et la commercialisation de ceux-ci (génératrice de revenus). Les modèles considérant ces deux parties dans un même processus d'optimisation doivent comprendre le mécanisme d'interaction de la demande et de l'offre. Nous analysons ainsi dans ce paragraphe le comportement de la demande pour le transport aérien. [HAK94] présente une analyse approfondie de la demande pour le transport des passagers.

Il existe deux approches principales de modélisation de la satisfaction de la demande pour le transport [LIB82]:

- orientée vers l'intérêt de la demande,
- orientée vers l'intérêt collectif.

Quelle que soit la politique de modélisation, ces deux approches nous permettent d'équilibrer entre une fonction de coût et l'intérêt associé (revenu). L'objectif de la compagnie est la satisfaction de cet équilibre sur un point qui lui donne le profit maximal.

La demande signifie le nombre potentiel de passagers qui ont l'intention de se déplacer d'une origine vers une destination donnée. En fait, la demande a trois formes:

- demande potentielle, qui est le seuil maximal que nous pouvons réaliser quelle que soit l'offre,
- demande réelle, qui représente le nombre de personnes sollicitant un service de transport correspondant à une offre définie,
- demande satisfaite, qui est le nombre de personnes pouvant consommer le service.

Nous analysons le comportement de la demande en deux parties [FLO84]:

- *Prévision de la demande potentielle, fonction indépendante des paramètres de l'offre (Macro-Economique)*
- *Répartition de la demande, fonction dépendante des paramètres de l'offre (Micro-Economique).*

4.3.1. Prévision de la demande

Le présent travail est orienté vers l'optimisation d'un système qui est limité par les intérêts d'une compagnie de transport aérien. Nous allons donc focaliser notre attention sur la prévision du point de vue de la compagnie.

L'offre de services de transport aérien est produite en fonction de la demande estimée. Une compagnie régulière par opposition à une compagnie affrèteur (charter), s'engage à produire des vols réguliers sans engagement de la part de sa clientèle. Une fois que le plan de vol est annoncé, les "coûts opérationnels" de ce vol sont considérés comme des "coûts fixes", car la présence des passagers dans l'avion a un impact négligeable sur la fonction du coût. Donc la compagnie a un intérêt particulier à estimer correctement la demande.

La demande potentielle est calculée dans cette phase de prévision comme un paramètre agrégé. Cette estimation doit définir le nombre potentiel de passagers d'une origine et la distribution de cette demande sur différentes destinations. Il y a une série d'études spécialisées qui déterminent la demande pour le transport aérien par des paramètres macro-économiques.

Le Manuel de Prévision du Trafic Aérien de l'OACI [OAC85] présente les diverses méthodes et paramètres utilisés pour définir le volume de la demande globale. Dans ce manuel, la demande est traitée d'une façon où tous les marchés sont confondus sur un réseau. Les modèles gravitationnels pour définir la demande entre une paire d'origine et de destination sont des approches classiques [MAD78]. Les modèles de prévision dépendent de la particularité du réseau concerné. La "régression linéaire" est l'outil

principal pour exprimer la demande en fonction des autres paramètres plus ou moins justement estimés ou connus.

4.3.2. Répartition de la demande

Une fois que la demande potentielle sur une O&D est définie par les méthodes de la prévision macro-économique, on peut commencer à étudier la demande entre plusieurs types de produits.

La définition de la part de marché d'un produit se situe dans le domaine de l'étude du comportement de l'individu face à la quantité et à la qualité de l'offre. L'état de l'art présenté par [HAK94] met en relief les différents points importants des recherches sur le comportement des passagers dans le domaine du transport.

Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la demande qui est attirée par un produit de transport en fonction de la qualité de l'offre de ce produit. Ces méthodes sont le centre d'intérêt des modèles de construction de l'offre optimale quelle que soit la dimension du système étudié. La fonction de la demande est considérée dans les modèles de la planification sous deux formes principales:

- *stochastique avec une variation connue,*
- *déterministe.*

Dans le cas des modèles où la demande est supposée stochastique, le taux de remplissage devient déterminant [POW82]. La partie stochastique de la demande détermine le surplus moyen de sièges nécessaire pour satisfaire la demande aléatoire. Le problème se présente comme une gestion de stock. Dans le cas d'insuffisance de sièges, ce qui correspond à une pénurie, on peut évaluer une pénalité qui permet de définir les fréquences et le type des avions. Mais ce n'est pas une vraie interaction entre l'offre et la demande.

4.3.3. Paramètres de qualification de l'offre

Les modèles les plus réalistes tiennent compte de l'influence de la qualité de l'offre sur le comportement des usagers (la demande). Les modèles ayant l'objectif de profit maximum ont deux composants principaux. Le premier est le coût, qui est directement dépendant de l'offre. Les fréquences, les types des avions, la base de maintenance et les installations au sol, déterminent les dépenses de la compagnie. D'autre part, la demande satisfaite représente le revenu. La satisfaction de la demande par les moyens de la compagnie, autrement dit la capacité de vendre ses services dépend des lois micro-économiques.

Il faut aussi tenir compte de la présence des autres modes de transport et des compagnies concurrentes sur le marché. Ces caractéristiques de réseau n'ont pas la même influence sur tous les passagers. Le tarif et le temps perdu ont des impacts différents sur les individus. Ceci peut s'expliquer par la classe socio-économique de l'individu. D'autre part, l'utilité du voyage dépend de cette classe socio-économique, mais aussi de l'objectif du voyage. La construction de typologies de passagers est donc un souci principal des experts de la prévision.

Les critères de l'offre influant sur la demande sont considérés comme suit [HAK94]:

- *tarifs,*
- *fréquence de service,*
- *vitesse,*
- *nombre d'escales,*
- *taux de remplissage et disponibilité,*
- *horaires,*
- *conditions de service,*
- *accessibilité des aéroports,*
- *services à bord,*
- *services au sol,*
- *types des avions,*
- *relation publique de la compagnie, image de marque et fiabilité du service.*

5. MODELISATION MATHEMATIQUE

La modélisation mathématique peut emprunter deux voies: qualitative, ou quantitative.

5.1. Approches qualitatives

Une partie de la recherche est consacrée à l'évaluation qualitative du domaine. En particulier, la définition du problème et la création des relations entre les divers éléments ainsi que les études préliminaires font partie de ce groupe. Dans l'arbre généalogique d'un modèle, les premiers pas sont souvent les approches qualitatives [HAK94].

5.2. Approches quantitatives

L'utilité opérationnelle d'un travail se mesure par l'application concrète de ses résultats. Nous avons besoin d'interfaces numériques pour introduire ces résultats dans la vie pratique. Un modèle, selon sa conception, peut être résolu par deux principales techniques de recherche opérationnelle:

- *programmation mathématique, incluant les méthodes exactes ou heuristiques,*
- *simulation.*

6. CONCLUSION

Après avoir étudié et analysé le système du transport aérien, nous sommes arrivés à la conclusion suivante: le problème général de la planification du transport aérien sous tous les aspects économiques, commerciaux, techniques et sociaux, pour tous les horizons, est insolvable d'une façon optimale par un modèle unique en l'état actuel des choses (Recherche Opérationnelle, Informatique, etc...). La taille et la multitude des critères de décision et leurs incompatibilités pour un modèle, ont obligé les chercheurs académiques et les professionnels du domaine à segmenter le problème principal en plusieurs sous-problèmes.

Cependant, certains sous-problèmes qui peuvent se poser à une compagnie aérienne peuvent être formulés dans un seul modèle. C'est le cas de notre approche, où nous considérons les trois sous-problèmes suivants dans un même modèle, en raison de la grande interactivité entre eux:

- Management des tournées,
- Management de la capacité,
- Management des horaires (fréquences comprises).

TROISIEME PARTIE

Le modèle

Dans ce chapitre, grâce à la connaissance acquise sur les divers aspects du problème général (l'état de l'art), nous modélisons le problème posé en introduction.

Lors de la modélisation, nous avons eu deux principaux soucis:

a) l'intégration des sous-problèmes suivants dans une même procédure d'optimisation:

- Management de la flotte,
- Management des routes,
- Planification horaire (fréquences comprises), et enfin
- Management de la capacité.

b) le respect d'une structure permettant l'intégration future du soutien logistique:

- Management de l'équipage,
- Management de la maintenance,
- Management des services au sol,
- Management du carburant, et
- Management des services au vol.

C'est dans cette optique que nous avons développé le modèle présenté dans cette partie du document.

INTRODUCTION

La représentation d'un problème réel sous une forme compréhensible par l'homme puis par la machine, afin de simplifier le processus de prise de décision, se fait par un "*modèle*". Celui-ci est construit par la mise en commun de l'ensemble des éléments synthétisés du problème, liés entre eux par une logique précise (qui traduit les interactions entre ces éléments). Nous utilisons le terme "*modélisation*" pour désigner la procédure de génération du modèle à partir d'un problème réel donné.

Dans cette partie, nous présenterons les éléments constituant un tel modèle ainsi que sa conception. Nous étudierons par la suite, les applications numériques du modèle que nous présenterons.

Dans ce chapitre, nous utilisons les notations suivantes: "indice", ensemble, paramètre, variable.

Le modèle est conçu pour gérer d'une manière optimale la flotte. Le flux des avions est optimisé pour une période de temps $\{P\}$, dans un réseau d'aéroports $\{R\}$ et pour une flotte $\{F\}$ d'avions donnés. Dans le cadre du modèle, les passagers se présentent comme une demande potentielle désirant voyager entre deux aéroports "i" et "j" de $\{R\}$. Le modèle gère d'une manière optimale en affectant les avions "k" de $\{F\}$ dans les créneaux horaires "l" de $\{P\}$ du jour m de S entre les aéroports "i-j" de $\{R\}$.

1. Concepts de base

La modélisation d'un problème commence par distinguer les éléments du modèle. Les éléments présentés ci-dessous ne sont pas forcément universels. Leur interprétation varie d'une école à une autre.

En utilisant ces éléments, nous pouvons générer autant de modèles souhaités en modifiant les caractéristiques particulières de leur conception.

Les éléments principaux considérés sont:

- *les hypothèses,*
- *les paramètres,*
- *les variables de décision,*
- *la fonction objectif,*
- *les contraintes.*

1.1. Les hypothèses du modèle

Il est pratiquement impossible de convertir un problème réel en un modèle mathématique sans lui donner une nouvelle forme synthétique par des hypothèses. La modélisation du système général du transport aérien de passagers nécessite ainsi une série d'hypothèses. Dans le cadre de ce présent mémoire, elles concernent les éléments suivants:

- la demande,
- le réseau,
- les avions (la flotte), ainsi que
- la fonction de coût.

1.1.1. La demande potentielle

Le modèle que nous allons présenter est construit sur l'hypothèse de la demande potentielle fixe.

Nous supposons qu'il existe une demande potentielle D_{ij} pour le transport entre les deux aéroports "i" et "j" par semaine. D_{ij} sera considérée comme une donnée exogène et indépendante des conditions de l'offre [GGL82], [SEN85]. Cela veut dire que la valeur de D_{ij} est estimée par diverses méthodes de prévision qui ne seront pas explicitement abordées dans ce mémoire (la méthode des moindres carrés par exemple). Cette hypothèse nous permet d'isoler le modèle d'optimisation de la partie dite "prévision de la demande". Nous pouvons ainsi travailler dans un milieu où, quelles que soient les valeurs des variables de décision du modèle, la demande reste fixe. Ceci rend le modèle déterministe.

Selon cette hypothèse, la demande D_{ij} est une borne supérieure du nombre de passagers que nous pouvons transporter. Nous supposons que le nombre de passagers transportés est égal à la demande, si la capacité disponible est supérieure ou égale à celle-ci. Sinon le nombre de passagers transportés est égal à la capacité disponible:

"Passagers" = "Demande" si "Demande" ≤ "Capacité"

"Passagers" = "Capacité" si "Demande" > "Capacité"

1.1.2. Le réseau

Le réseau que nous considérons représente tous les aéroports desservis par la compagnie aérienne Air Algérie. Cependant, la structure de ce réseau est un peu particulière du fait que tous les avions doivent regagner l'aéroport mère Alger chaque jour, pour des raisons de maintenance (pour le réseau domestique, aucun autre aéroport ne possède un service de maintenance capable d'assurer la sécurité du vol). Par ailleurs, les vols se font durant la journée. Pour faire ressortir cette particularité, nous imposerons un coût de pénalité de vol par nuit. De cette manière, les vols de nuit seront pénalisés, donc effectués le moins possible.

1.1.3. Hypothèses sur la configuration d'une flotte

Les approches suivantes pour la considération des avions dans une flotte sont utilisées pour la modélisation.

1.1.3.1. La flotte fixe

Nous excluons la variation du nombre d'avions et de leurs caractéristiques techniques pendant la période d'optimisation. La flotte et tout ce qui concerne les avions sont des paramètres externes préalablement définis.

1.1.3.2. La flotte mixte

Les modèles qui prennent en considération plusieurs types d'avions avec leurs caractéristiques techniques distinctes sont des modèles basés sur l'hypothèse de la flotte mixte. Ils considèrent que chaque appareil est distinct et suivi individuellement. Dans la plupart de cas réels, la flotte exploitée par une compagnie est constituée de plusieurs types d'avions. L'approche de flotte mixte nous permet de généraliser les caractéristiques techniques des avions et l'interchangeabilité de ces appareils pour l'affectation (sauf pour la capacité / type d'avion).

L'approche de flotte fixe diminue considérablement la charge de calcul et nécessite des ressources informatiques plus modestes. Dans cette optique, nous cernons le problème posé ci-dessus dans le but d'apporter une solution optimale donc réalisable.

Néanmoins, nous pourrions changer l'hypothèse de flotte fixe par la flotte mixte sans apporter des changements considérables dans les autres hypothèses. Donc l'ossature du modèle proposé reste la même.

1.1.4. Caractéristiques techniques des avions

L'objectif principal est de présenter le problème de la manière la plus réaliste possible dans un modèle. Cependant, nous ignorons l'intervention de tout processus stochastique tel que les pannes, la variation de la durée de vol, etc. Ainsi, nous supposons que les paramètres techniques concernant les avions de la flotte sont déterministes. Néanmoins, la probabilité peut être simulée par les études de sensibilité des résultats face à la variation des données supposées déterministes.

1.1.5. Hypothèses pour la fonction coût

Dans un modèle stratégique, le coût est une fonction non-linéaire et discrète [ENR69]. Tenant compte de la difficulté de résoudre ce type de problèmes, nous avons considéré la fonction du coût en deux parties:

- le coût fixe pour une période d'optimisation donnée,
- le coût opérationnel indexé aux variables de décision.

1.1.5.1. Le coût fixe pour une période d'optimisation donnée

Nous supposons que la compagnie a un coût fixe indépendant de toutes les variables de décision du modèle. Ce coût fixe est basé notamment sur les installations, les salaires et l'amortissement des avions. Le modèle utilise un coût fixe par appareil.

1.1.5.2. Le coût opérationnel indexé aux variables de décision

Contrairement à l'hypothèse souvent utilisée par les méthodes classiques, qui proposent une fonction de coût lissée, nous utilisons une fonction de coût discrète. Nous avons défini une fonction de coût opérationnel qui correspond au coût de revient du vol entre deux aéroports donnés.

Nous supposons que ce coût opérationnel, associé à chaque vol et à chaque avion, est un paramètre connu et déterministe. Nous ignorons donc la variance de consommation dépendant du chargement de l'avion et des paramètres météorologiques et économiques. Nous supposons que l'erreur est négligeable. Par contre, la structure du modèle permet de prendre en compte la variation de ce coût en fonction des horaires, due au changement de tarifs d'atterrissage liés à la congestion.

1.2. Paramètres

Le modèle établi utilise des paramètres qui sont des données externes. Nous supposons que les paramètres qui seront cités ci-dessous sont disponibles.

1.2.1. Paramètres techniques d'avions

La compagnie aérienne Air Algérie exploite une flotte "F" d'avions k représentant plusieurs types. Chaque avion de la flotte est distingué par ses propres paramètres qui sont:

- *capacité effective,*
- *vitesse,*
- *localisation de l'avion (disponibilité de l'aéronef),*
- *durée d'escale,*
- *coût opérationnel de vol.*

1.2.1.1. Capacité effective

Chaque avion, selon sa structure, est limité par un nombre maximal de sièges " $Q(K)$ ". Même si à long terme nous pouvons varier la capacité en changeant la configuration, nous supposons que pendant la période de l'étude, celle-ci est un paramètre constant. Le paramètre "capacité effective" est défini en fonction du coefficient de remplissage de l'avion K pour effectuer la liaison "I-J". Ce coefficient représente le pourcentage à partir duquel le vol est rentable pour la compagnie.

$$CE(I, J, K) = CR(I, J, K) * Q(K)$$

où

CE(I, J, K) : Capacité effective pour chaque avion K effectuant chaque vol "I-J"
CR(I, J, K) : Coefficient de remplissage de l'avion K pour le vol "I-J"
Q (K) : Capacité maximale de l'avion K .

1.2.1.2. Vitesse et durée de vol

La vitesse moyenne " $V(K)$ " d'un avion K est connue. A partir de cette vitesse, nous déduisons une durée d'affectation de l'avion " K " à un vol " I - J ". La vitesse moyenne et la distance entre " I - J " du réseau R nous permettent de calculer la durée entre l'enlèvement des cales au départ et la remise de celles-ci à l'arrivée. Celle-ci est désignée dans la terminologie anglo-saxonne par "**Block to Block**". [PAV84] utilise le terme français "**cale à cale**". Cette durée dépend de plusieurs paramètres, notamment de la longueur du trajet aérien entre deux aéroports, de la distance entre les pistes d'atterrissage et le terminal, ainsi que de la vitesse de l'avion ; dans le modèle, nous notons ce paramètre par " $CAC(I, J, K)$ ", paramètre constant défini pour chaque avion " K " et chaque paire d'aéroports " I - J " en fonction de la politique de la compagnie concernant la vitesse de vol et la consommation. " $CAC(I, J, K)$ " est calculé de la manière suivante:

$$CAC(I, J, K) = DST(I, J) / V(K) + TAXI(I, K) + DEC(I, K) + APP(J, K) + ATT(J, K) + TAXI(J, K)$$

où

DST(I, J) : Distance entre une paire d'aéroports " I - J "
V(K) : Vitesse moyenne de l'avion K
TAXI(I, K) : Durée de taxi au départ (I) et à l'arrivée (J) pour l'avion K
DEC(I, K) : Durée de décollage
APP(J, K) : Durée d'approche de l'avion K à l'aéroport " J "
ATT(J, K) : Durée d'atterrissage de l'avion K à l'aéroport " J "

1.2.1.3. Durée d'escale

Chaque avion a un temps moyen d'escale " $DESC(K)$ " entre l'atterrissage et le décollage. Ce paramètre dépend de la taille de l'appareil. Il correspond à la durée de débarquement, nettoyage, vidange, remplissage de carburant, contrôle technique, et embarquement. Nous supposons que $DESC(K)$ est connu pour tous les avions " K " de la flotte et qu'il est déterministe.

1.2.1.4. Coût opérationnel

Par le paramètre "coût opérationnel", nous regroupons tous les coûts intervenant dans la réalisation d'un vol entre deux aéroports " I - J " pour chaque avion " K " donné.

Le coût opérationnel de vol de l'avion " K " est " $CO(I, J, K)$ ". Celui-ci est basé sur les caractéristiques techniques des avions et des redevances de survol et d'atterrissage, ainsi que du service aux aéroports " I - J ". En pratique, il varie d'un jour à l'autre en fonction des paramètres météorologiques, du chargement et de la tarification spéciale des redevances dans les mesures anti-congestionnelles. Nous le considérons déterministe en supposant que sa variation est négligeable.

$CO(I, J, K)$ est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\begin{aligned} CO(I,J,K) &= CVU(K) CAC(I,J,K) + HL(J,K) + TSV(I,J,K) \\ CO(I,I,K) &= PARK(I,K) \end{aligned}$$

où

CVU(K) : Coût opérationnel unitaire moyen correspondant à une minute de vol pour l'avion K
HL(J,K) : Les coûts d'atterrissage et de soutien logistique de l'avion K à l'aéroport J
TSV(I,J,K) : La taxe de survol de territoire entre deux aéroports "I-J" par l'avion K
PARK(I,K) : Le coût de parking à l'aéroport I de l'avion K dans la cas où ce dernier n'est pas affecté à un vol et reste sur le tarmac.

1.2.1.5. Le coût de pénalité

Ce paramètre a été introduit pour pénaliser les vols de nuit. Il est noté par COSUPP.

$COSUPP(I,J,K,L,M) = 1000000$ si c'est un vol de nuit
sinon $COSUPP(I,J,K,L,M) = 1$

1.2.1.6. Localisation initiale de l'avion au début de la période d'optimisation

Le point de départ de chaque avion "**LOC(I,K,M)**" est un paramètre externe connu dans notre modèle. **LOC(I,K,M)** est un paramètre binaire. Il est égal à "1" si l'avion K se trouve à l'aéroport "I" au premier créneau horaire du jour "M", sinon il est égal à "0".

1.2.2. Paramètres du réseau

Le réseau sur lequel la compagnie aérienne a le droit d'effectuer des vols commerciaux est l'ensemble des aéroports "I". Pour des raisons de modélisation mathématique et de la distinction d'un aéroport selon son état (arrivée ou départ), la formulation est la suivante:

- l'aéroport de décollage de l'avion est représenté par "I",
- l'aéroport d'atterrissage est représenté par "J".

1.2.3. Coûts fixes de la compagnie

Nous supposons que la compagnie a un coût fixe "CF" correspondant à la somme des coûts générés même si elle n'effectue aucun vol et ne transporte aucun passager. Le "CF" est fixe et déterministe quelque soit le niveau de service pendant la période d'optimisation. Nous supposons qu'il regroupe les coûts salariaux, les coûts financiers, les coûts d'amortissement des avions, des immeubles, ainsi que les coûts commerciaux et techniques du réseau.

1.2.4. Période d'optimisation

Le modèle est basé sur une période de temps donnée, pendant laquelle tous les paramètres sont connus et déterministes. Nous ignorons ce qui précède et ce qui suit la période P . Nous considérons que cette période est un segment type d'un horizon glissant (par exemple: une semaine type d'une saison). La période P est un espace de temps qui est lui-même divisé en un certain nombre de créneaux horaires de même durée, dont le nombre est fixé selon la capacité de calcul et la précision souhaitée. Ces créneaux horaires sont représentés par l'indice "L". Comme la flotte utilisée par Air Algérie sur le réseau domestique doit regagner chaque jour l'aéroport mère (Alger), nous avons introduit un autre indice "M" qui représente les jours de la semaine S . Ainsi, nous avons adopté la notation suivante:

$L(M)$: le créneau horaire "L" de la journée "M".

Notre période d'optimisation est une semaine type de sept jours.

1.3. Variables de décision

Le modèle comporte un ensemble de variables de décision principales (variables binaires), concernant l'affectation des avions, notées $X(I,J,K,L,M)$, et une variable continue notée Z , représentant l'ensemble des coûts opérationnels de la compagnie.

1.3.1. Objectif

L'objectif du modèle est de minimiser la somme des coûts opérationnels " Z " concernant le plan de vol de la compagnie pour la période d'optimisation. Pour cela, il faut définir la meilleure stratégie possible par l'intermédiaire des variables d'affectation. Une affectation est concrétisée par la définition du plan de vol de chaque avion de la flotte et de la capacité allouée à la demande.

1.3.2. Affectation des avions

Notre modèle est basé sur le temps discret. Dans chaque créneau horaire " $L(M)$ ", nous prenons une décision pour chacun des appareils " K " de la flotte F afin de l'affecter (lorsqu'il est disponible) aux vols entre une paire d'aéroports " I - J " du réseau R . Dans le modèle, le plan de vol de chaque appareil est défini par la variable binaire "affectation des avions", $X(I,J,K,L,M)$. A notre connaissance, c'est la première fois dans la modélisation du transport aérien (mis à part [HAK94]) qu'une variable associe l'affectation d'un avion " K " à un vol entre deux aéroports " I " et " J " avec un horaire de décollage " L ".

Dans sa formulation, [HAK94] ne considère pas l'indice "M" du fait que son modèle ne tient pas compte de la contrainte de la compagnie Air Algérie citée précédemment.

La variable $X(I,J,K,L,M)$ est définie comme suit :

Si l'avion " K " est affecté au vol entre " I - J " avec un décollage pendant le créneau horaire " L " du jour " M " alors " $X(I,J,K,L,M) = 1$ ", sinon " $X(I,J,K,L,M) = 0$ ".

1.4. Fonction Objectif

La fonction objectif du modèle est de minimiser l'ensemble des coûts opérationnels de la compagnie. Ceci peut être présenté sous la forme synthétique suivante :

$$Z = \sum (\text{COÛTS OPERATIONNELS}) \times \text{COÛTS PENALITE}$$

$$Z = \sum_{i,j,k,l,m} \text{CO}(I,J,K) \times \text{COSUPP}(I,J,K,L,M) \times X(I,J,K,L,M)$$

1.5. Contraintes générales

Les contraintes globales sont classées en deux groupes:

- les relations entre la capacité effective des avions sur le vol "I-J" et la demande potentielle pour ce vol $D(I,J)$,
- la conservation du flux des avions.

1.5.1. Les relations entre la capacité effective des avions et la demande potentielle

Pour la conception d'un fréquencesmètre (nombre d'avions pour assurer une liaison "I-J" pour une semaine), la direction commerciale d'Air Algérie estime une demande " $D(I,J)$ " des passagers pour la semaine.

Une contrainte traitera cette demande potentielle en fonction des capacités de la flotte afin d'assurer le meilleur service possible pour les passagers. Elle permettra de se passer de fréquencesmètre pour établir le programme de vol. Ainsi, de paramètre d'entrée, le fréquencesmètre devient une variable du modèle.

Cette approche se traduit mathématiquement par :

$$\sum_{klm} X_{ijklm} \times CE_{ijk} \geq D_{ij}$$

où D_{ij} représente la demande potentielle pour la liaison "i-j" pendant une semaine.

Cette contrainte est valable pour:

$$\forall I, J \in \{R\} \text{ pour tous les aéroports "I", "J" du réseau R}$$

1.5.2. Conservation de flux des avions

Nous considérons qu'un avion à un moment donné se trouve soit à un aéroport, soit en vol entre deux aéroports. Pour la conservation du flux dans le temps, nous avons trois contraintes:

Chaque avion "K" se trouvant à un aéroport "I" à la fin d'un créneau horaire "L(M)", suivant la durée d'escale, est affecté à un vol ou à l'attente.

$$\sum_j X_{ijklm} = \sum_j X_{jiktm} \quad t \geq 2$$

où: "t" est le créneau horaire précédent le créneau horaire "I" du jour "m" par la durée de vol et de l'escale.

$$t = 1 - \lfloor (DESC_k + CAC_{ijk}) / DS \rfloor$$

Ces deux équations sont valables pour:

$$\begin{aligned} \forall K \in \{F\} & \text{ l'avion "K" fait partie de la flotte } \{F\} \\ \forall I \in \{R\} & \text{ l'aéroport "I" fait partie du réseau } \{R\} \\ \forall L \in \{P\} & \text{ le créneau horaire "L" est un segment de la période } \{P\} \\ \forall M \in \{S\} & \text{ le jour "M" est un élément de la semaine } \{S\} \end{aligned}$$

Dans tous les cas, un avion ne peut être affecté qu'une seule fois dans un créneau horaire donné, ce qui se traduit par :

$$\sum_j X_{ijklm} \leq 1$$

Cette contrainte est valable pour:

$$\begin{aligned} \forall K \in \{F\} & \text{ l'avion "K" appartient à la flotte } \{F\} \\ \forall I \in \{R\} & \text{ l'aéroport "I" fait partie du réseau } \{R\} \\ \forall L \in \{P\} & \text{ le créneau horaire "L" est un segment de la période } \{P\} \\ \forall M \in \{S\} & \text{ le jour "M" est un élément de la semaine } \{S\} \end{aligned}$$

En plus de ces contraintes de conservation de flux, nous introduisons la localisation de l'avion sous forme de contrainte.

L'avion "K" ne peut être affecté qu'à partir de son origine donnée par LOC_{kim} au premier créneau horaire ("L") du jour "M".

Ceci peut être exprimé comme suit :

$$\sum_j X_{ijk} 1^m \leq LOC_{ikm}$$

Cette contrainte est valable pour:

- $\forall K \in \{F\}$ l'avion "K" est un avion de la flotte {F}
- $\forall I \in \{R\}$ l'aéroport "I" fait partie du réseau {R}
- $\forall M \in \{S\}$ le jour "M" fait partie de la semaine {S}

QUATRIEME PARTIE

Validation du modèle

La validation d'un modèle théorique se fait par une application numérique à un cas réel. La comparaison de ses résultats et de ses performances par rapport aux approches précédemment utilisées nous permet de juger le modèle. C'est ce que nous entreprenons de faire dans cette présente partie de l'étude.

1. ELEMENTS D'APPLICATION NUMERIQUE

La mise en oeuvre du modèle d'optimisation élaboré passe par la description des quatre éléments suivants:

- nature de l'approche de résolution (exacte ou heuristique),
- langage de programmation (logiciel / progiciel - software),
- équipements informatiques (ordinateurs / hardware),
- données numériques.

1.1. Nature de l'approche

Il existe deux approches possibles pour résoudre un problème d'optimisation:

- approche heuristique
- approche exacte.

La démarche scientifique nécessite le passage obligatoire par les techniques exactes qui permettent de donner une solution optimale et de vérifier la cohérence du modèle.

Le modèle élaboré fait partie des modèles combinatoires (NP-durs). Sa forme d'affectation des avions avec des variables binaires facilite la résolution par Branch & Bound tout en gardant un aspect réaliste. L'utilisation de temps discret au lieu de temps continu élargie la charge du calcul nécessaire mais laisse espérer une possibilité d'adaptation aux algorithmes spécifiques.

La taille réelle du problème s'élève à une flotte de 43 avions, 100 à 150 aéroports, 32 ou 224 segments de temps (une journée ou une semaine en tranches de 15 minutes). Supposons que nous étudions le problème de manière purement combinatoire. Cela représente pour la compagnie aérienne Air Algérie pour une semaine 62126400 variables binaires. Nous ne pouvons pas proposer une solution raisonnable en temps machine et en coût de calcul.

Nous n'avons pas étudié la question d'un algorithme spécifique pour ce problème dont la forme dynamique promet des heuristiques potentielles adaptées.

Le choix d'une technique de résolution exacte peut surprendre, quand on sait la nature et la complexité de notre problème. Elle n'en est pas moins justifiée pour autant, et les principaux arguments sont :

- Le recours à une technique exacte est la suite logique à toute modélisation mathématique. En effet, seule cette catégorie d'outils permet réellement de **valider le modèle** conçu, puisque les heuristiques sont par définition incapables d'accomplir un tel travail (elles procèdent par approximations, et introduisent des perturbations incompatibles avec les besoins de validation). Par ailleurs, quand bien même la résolution de cas concrets par de telles approches serait inefficace, elle n'en donne pas moins des indications précieuses sur le fonctionnement du système, tout au moins dans des situations particulières.

- Des progrès considérables ont été réalisés tant sur le plan des équipements informatiques que sur celui des logiciels :

- Construction d'ordinateurs à architecture parallèle, intégrant plusieurs processeurs fonctionnant à très haute fréquence d'horloge et exploitant une mémoire vive de plusieurs centaines de Méga-Octets et des disques durs de plusieurs Giga-Octets de capacité.

- Elaboration de techniques d'optimisation de plus en plus efficaces, et de mieux en mieux adaptées aux grands systèmes. En particulier, il convient de noter l'apparition de toute une nouvelle génération d'algorithmes exploitant le calcul en parallèle, ce qui ouvre des perspectives absolument inédites en Recherche Opérationnelle en général, et en Optimisation combinatoire en particulier.

Ce saut technologique extraordinaire laisse croire que les ordinateurs de demain auront des performances sans commune mesure avec celles des calculateurs d'aujourd'hui. Par ailleurs, quand bien même la complexité des problèmes combinatoires resterait toujours la même, il n'en demeure pas moins vrai que grâce à ces progrès, il sera possible de résoudre des problèmes de plus en plus gros, et de plus en plus réalistes.

- La souplesse, l'ergonomie, l'ouverture des logiciels actuels sont tels que les critiques classiques des approches exactes (rigidité, lourdeur, etc.) ne tiennent plus, et cela pour plusieurs bonnes raisons :

- Ces approches sont désormais intégrées dans des environnements exceptionnellement riches, offrant des formalismes de modélisation s'approchant considérablement du langage naturel utilisé dans le contexte. Il s'agit de véritables langages (la programmation logique, en l'occurrence), dotés de primitives de contrôle puissantes et variées. Il devient, dès lors, possible de construire, de manière relativement aisée, des algorithmes à plusieurs étages comprenant une étape de " pré-processing " (conditionnement initial, obtention d'une bonne solution initiale pour accélérer la convergence, etc.), une étape de " processing " (résolution optimale de problèmes ou de sous-problèmes), et enfin une étape de " post-processing " (transformation éventuelle de la solution courante afin de la réinjecter dans le processus qui deviendrait alors cyclique). De tels algorithmes ont souvent des performances appréciables.

- Elles sont de plus en plus nombreuses, et constituent de véritables bibliothèques de routines permettant un choix réel (à titre d'exemple, GAMS, qui sera présenté dans la suite du document, est fourni avec pas moins d'une demi-douzaine de " solvers " réputés).

- Ces outils intègrent de plus en plus tout un éventail de générateurs de nombres aléatoires, permettant de construire directement des modèles stochastiques très réalistes.

- La nature du problème est telle que l'obtention d'une solution approchée n'apporte pas d'informations pertinentes, encore moins de véritables éléments de décision, car les managers s'orientent de plus en plus vers des réponses optimales (la rentabilité d'une ligne découlant directement du type d'appareil affecté, il ne saurait être question de se

contenter de la faisabilité de la solution, lorsque celle-ci n'offre pas des garanties de rentabilité).

- Il est souvent possible de réduire la complexité d'un modèle mathématique en jouant sur le taux d'agrégation, en relaxant des contraintes, etc. Les outils logiciels actuels permettent justement ce genre d'opérations, donnant à l'utilisateur la possibilité de trouver, après quelques tentatives, l'indispensable compromis entre complexité du modèle, et précision de ses résultats.

- Enfin, à supposer qu'il faille absolument écrire une heuristique de résolution, il ne faut surtout pas perdre de vue que :

- l'heuristique a besoin d'être validée, ce qui n'est pas toujours une mince affaire (en plus de prouver la convergence de l'algorithme, il faudra étudier ses performances en termes de temps de calcul et d'espace de stockage consommés, de manière extrêmement précise et rigoureuse.) ;

- elle a surtout besoin d'être implémentée, et la chose est loin d'être aisée dans notre cas: il s'agit, faut-il le rappeler, d'un problème combinatoire de grande taille (grand nombre de variables binaires et de contraintes). On ne peut raisonnablement entreprendre, en tout cas dans le contexte de cette étude, en même temps de modéliser (ce qui ne peut se faire sans un diagnostic préalable !), et de concevoir un outil de résolution qui soit à la fois approprié et efficient.

1.2. Langage de programmation

La conversion d'un modèle théorique en une application pratique sur un support informatique peut se faire de diverses façons :

- utilisation d'un langage de programmation comme Fortran, C, pascal, etc.
 - pour l'ensemble du programme y compris les algorithmes de résolution,
 - uniquement pour la conception du modèle en se servant des algorithmes de résolution standards du marché comme des sous-routines;
- utilisation d'un langage de modélisation spécifique comme GAMS, DATA FORME ou XPRESS, ...
 - en développant des algorithmes de résolution particuliers,
 - en utilisant les algorithmes de résolution standards du marché.

Une application performante des techniques de l'optimisation pour la résolution des problèmes industriels ou économiques complexes nécessite la maîtrise et la mise en oeuvre efficace de deux éléments complémentaires :

- une description mathématique, ou modélisation, adéquate du problème posé et la génération de données pertinentes,
- la recherche de solutions numériques, ou résolution, du modèle, par des techniques performantes.

Du côté des techniques de résolution, elles se sont multipliées, et l'on peut faire appel, pour chaque classe de problème (linéaire, quadratique, non linéaire, en nombres entiers, booléen ou mixte), à de nombreux logiciels, ou "solvers", autant performants que complexes, pour la recherche des solutions numériques du problème décrit par le modèle et les données qui l'accompagnent.

A travers la revue de littérature de la micro-informatique, il existe six (06) logiciels commercialisés qui peuvent résoudre aussi bien les problèmes linéaires, que les problèmes non linéaires. Le tableau 7, résumera les caractéristiques générales de ces logiciels :

Tableau 7: Distributeurs, prix et informations hardware

Logiciel	Version	Distributeur	Prix	Mémoire minimale	Coprocasseur mathématique
EUREKA: The Solver	1.0	Borland International 4585 Scotts Valley Dr Scotts Valley, CA 95066	\$ 99.95	384 K	S
GAMS /MINOS	2.02 A	The Scientific Press 507 Seaport Court Redwood City, CA 94063	\$ 1600 \$ 75 #	512 K	R
MP6 -NLPROG	3.0	SCICOM Inc. 2640 Parkridge Dr Ann Arbor, MI 48103	\$ 80	256 K	R
NLPSOLVE	1.0	3i Corporation 85 Broadway Park Ridge, NJ 07656	\$ 795 \$ 495 #	512 K	S
OPTISOLVE	1.00	Optisoft 1445 Crone Avenue Anaheim, CA 92802	\$ 195	128 K	S
SUPER-GINO	5/9/86	LINDO Systems Inc. P.O.Box 148231 Chicago, IL 60614	\$ 995 \$ 650 #	512 K	S

Prix spécial pour l'enseignement

R : Requis, S : non requis.

Les logiciels d'optimisation des programmes mathématiques ont connu un développement important. Plusieurs nouvelles caractéristiques ont été incluses, afin de permettre aux utilisateurs de modéliser, et de résoudre les problèmes linéaires et non linéaires facilement et plus efficacement. Nous allons nous intéresser donc aux caractéristiques de la programmation mathématique de chacun des six logiciels susceptibles d'être appliqués à notre modèle. Ces caractéristiques peuvent être par exemple, la taille du problème que le système peut supporter, le type de problèmes non linéaires et linéaires que le système peut résoudre, et le type d'algorithmes qu'il utilise.

Ces six logiciels ont pour fonction de résoudre des problèmes dont la fonction objectif et les contraintes sont linéaires (et non linéaires). Seuls trois logiciels (EUREKA, OPTISOLVE, et SUPER GINO) peuvent en plus résoudre un système d'équations linéaires et non linéaires simultanées.

Cinq de ces logiciels peuvent résoudre des problèmes linéaires et non linéaires de taille petite ou moyenne (20 à 100 variables). GAMS/MINOS peut contenir des problèmes de plus grande taille (500 variables sur P.C), la revue Scientific Press donne de plus amples informations sur la taille des problèmes que GAMS/MINOS peut contenir au maximum (32.767 lignes, 32.767 colonnes).

Ces six logiciels utilisent cinq différents algorithmes de résolution des problèmes linéaires et non linéaires. Pour bien comparer ces six logiciels selon leurs caractéristiques de programmation mathématique, nous allons regrouper toutes les informations dans le tableau 8.

Tableau 8: Les caractéristiques de programmation mathématique

Le Logiciel	Type de problème	Taille maximale		Algorithme	Commentaires
		Lignes	Colonnes		
EUREKA: The Solver	GP, SN	20	20	VM	fonctions graphiques solutions pour variables complexes intégrales définies.
GAMS/MINOS	GP	300	500	PL	Valable pour IBM et DEC, Sun et Apollo stations de travail
MP6-NLPROG	GP	N+M <= 25		FP	deux modes d'interface: interprété et batch
NLPSOLVER	GP	70	100	SQP	logiciel QPSOLVER pour la programmation quadratique et convexe
OPTISOLVE	GP, SN	25	25	VM	solutions pour racines complexes
SUPER GINO	GP, SN	50	100	GRG	valables pour IBM et DEC

FP = point fixe; **GRG** = gradient réduit général; **PL** = Lagrangien projeté; **SQP** = programmation quadratique successive; **VM** = variable métrique; **GP** = problèmes généraux; **SN** = équations non linéaires simultanées; **N** = nombre de variables; **M** = nombre de contraintes (sans inclure les limites)

Beaucoup de recherches se sont focalisées sur le développement des langages de modélisation mathématique. Ces langages ont l'avantage de représenter facilement et efficacement les problèmes linéaires et non linéaires. Vu l'intérêt majeur que nous portons à la modélisation (afin de se rapprocher le plus possible de la réalité), nous allons examiner les caractéristiques de modélisation de chacun des six logiciels cités ci-dessus pour pouvoir choisir objectivement l'outil de résolution.

Le tableau 9 résumera les capacités de modélisation de chaque logiciel :

Tableau 9 : Capacité des langages de modélisation

Logiciel	Représentation		Caractéristiques de modélisation				Fonctions repré.
	Naturelle	Compacte	Sommes	Produits	Matrices	Fonctions	
EUREKA : The Solver	O	N	N	N	N	29	ABS, COS, COSH, EXP, FLOOR, LOG, LOG10, SIN, SINH, TAN, TANH
GAMS/MINOS	N	O	O	O	O	22	ABS, ATAN, CEIL, COS, EXP, FLOOR, LOG, LOG10, MAX, MIN, NORMAL, SIN, UNIFORM.
MP6-NLPROG	O	N	N	N	N	4	EXP, LOG, SIN, TAN
NLPSOLVER	O	O	O	O	O	12	ACOS, ASIN, ATAN, COS, COSH, EXP, SIN, SINH, TAN, TANH
OPTISOLVE	O	N	N	N	N	11	ABS, COS, EXP, LOG, SIN, TAN

ABS = valeur absolue; ACOS = arcosinus; ASIN = arcsinus; ATAN = arctangente; CEIL = le plus petit entier $\geq x$; COS = cosinus; COSH = cosinus hyperbolique; EXP = exponentielle; FLOOR = le plus grand entier $\leq x$; LOG = logarithme népérien; LOG10 = logarithme décimal; MAX = la plus grande valeur de la série; MIN = la plus petite valeur de la série; NORMAL = nombre aléatoire du nuage $N(x,y)$; SIN = sinus; SINH = sinus hyperbolique; TAN = tangente; TANH = tangente hyperbolique; UNIFORM = nombre aléatoire du nuage $U(x,y)$; O = oui; N = non.

De ce tableau, nous remarquons que les modèles élaborés par EUREKA et OPTISOLVE sont presque identiques. Seuls GAMS/MINOS et NLPSOLVER ont une représentation compacte du modèle. Grâce à ce type de représentation, les données peuvent être introduites sous forme de tableaux, ce qui permet aux utilisateurs de modéliser des problèmes de très grande taille.

Le grand nombre de fonctions dans la bibliothèque des deux logiciels EUREKA et GAMS/MINOS donne l'avantage à ces derniers de pouvoir modéliser une grande variété de problèmes linéaires et non linéaires. Seul GAMS/MINOS génère des nombres aléatoires.

Une des caractéristiques unique de GAMS/MINOS qui valorise l'habileté du modéliste, c'est la bibliothèque de 100 modèles de programmation mathématique livrés avec le produit. Ces modèles sont de type linéaire, non linéaire et entiers mixtes.

Nous verrons plus tard, toutes les caractéristiques de GAMS/MINOS qui appuieront par la suite notre choix en matière d'outil de résolution.

Dans la présente étude, nous avons opté pour l'utilisation d'un langage de modélisation spécifique (GAMS) avec les algorithmes de résolution standards du marché (OSL et MINOS-5). Les avantages et les désavantages d'utilisation des langages de modélisation (LM) et les études comparatives sont présentés par [DEC90]. Un langage de modélisation facilite les modifications importantes de structure du modèle. Le principal handicap d'utilisation d'un tel langage est la limitation des dimensions par la capacité de celui-ci avant d'atteindre souvent celle de l'algorithme de résolution utilisé. L'interface des langages avec les algorithmes de résolution est aussi un point faible de leur utilisation qui diminue le champ d'action du modéliste. Enfin, la facilité de modéliser avec les commandes spécifiques d'un langage, limite la liberté d'expression que nous pouvons

posséder en utilisant un langage de base. Au niveau de l'utilisation des équipements, le langage de modélisation spécifique augmente la consommation de mémoire vive et celle de stockage sur disque tout en diminuant la vitesse de calcul. Cette dégradation de performance n'est pas admissible pour le calcul de routine. Mais les avantages de facilité de modélisation sont indiscutables malgré les inconvénients cités ci-dessus.

En ce qui concerne les algorithmes de résolution, nous avons une panoplie d'algorithmes disponibles sous GAMS, le langage que nous avons choisi pour développer notre modèle. Les besoins particuliers de ce modèle portent sur un type d'algorithme: la résolution de problèmes en nombre entiers (MPOSL, ZOOM).

Les algorithmes de résolution MIP sont disponibles au laboratoire Génie Industriel de l'Ecole Nationale Polytechnique. Pour l'application numérique de notre modèle, nous avons utilisé l'algorithme de résolution linéaire, ZOOM et OSL en association avec un algorithme MIP, MPOSL.

1.3. Système informatique

Lors du développement d'un prototype, l'occupation prioritaire du modéliste est le comportement du modèle au niveau de la faisabilité. Ce n'est que plus tard, une fois que le modèle fonctionne logiquement, que l'on s'intéresse à l'utilisation efficace des ressources informatiques. Les équipements utilisés pour la validation de notre modèle sont les suivants:

- Mai 1994 : Nous avons obtenu les premiers résultats encourageants sur un PC (i80486 DX2 50 Mhz) doté de 4 Mo de RAM et 250 MO de disque dur.
- Juin 1994 : Le prototype actuel consomme de 3 à 10 minutes sur un IBM RISC 6000/530H avec 37 MIPS et 64Mo de RAM.

Le mise en oeuvre du prototype du modèle a été effectuée sur un ordinateur IBM RISC 6000, au niveau du Laboratoire Productique Logistique de l'Ecole Centrale Paris. Ce matériel a pour principaux avantages la qualité des opérations en virgule flottante, sa puissance de calcul, et sa compatibilité avec l'algorithme MPOSL. L'inconvénient majeur du RISC 6000 est ... sa non disponibilité à l'Ecole Polytechnique d'Alger !

1.4. Données

L'exemple suivant est généré pour expérimenter le modèle présenté dans la troisième partie en se basant sur les données recueillies à Air Algérie que nous présentons dans cette partie.

Dans ce modèle, nous avons dimensionné le problème de façon à pouvoir obtenir des résultats nous permettant de juger de sa cohérence:

- 3 aéroports (Alger, Oran, Tlemcen),
- une flotte de 3 avions: 1 B727, 1 B737, 1 F27.
- une semaine avec des journées de 12 heures divisées en 24 tranches de 2 heures (120 mn).

Les données numériques sont regroupées comme suit:

- réseau,
- demande,
- avions.

1.4.1. Réseau

Nous avons considéré un réseau de 3 aéroports :

Aéroports	Villes
ALG	Alger
ORN	Oran
TLM	Tlemcen

Ce réseau correspond dans la réalité à une petite compagnie régionale. La distance entre ces aéroports est présentée ci-dessous:

Distances	ALG	ORN	TLM
ALG		364	460
ORN	364		102
TLM	460	102	

1.4.2. La demande

Dans le cadre de cet exemple, nous avons considéré la demande enregistrée durant l'année 1992 (Source: Direction Commerciale):

Demandes	ALG	ORN	TLM
ALG		131308	18683
ORN	131308		19818
TLM	18683	19818	

1.4.3. Avions de la flotte

La flotte est constituée de 3 avions faisant partie de 2 types:

Nom	Code	Type
Boeing 727	B727	Réacteur
Boeing 737	B737	Réacteur
Fokker 27	F27	Hélice

Les paramètres de ces avions sont présentés ci-dessous:

PARAMETRES	Abrév.	Unité	B727	B737	F27
Capacité maximale	C_{max}	Nbre sièges	147	101	40
Vitesse de croisière	V_k	KM/mn	15	16	8
Redevance d'atterrissage	ATT_k	DA/mn	11.78	11.88	12.05
Redevance de survol et de parking	$PARK_k$	DA/mn	7.57	7.64	7.74

Année de référence: 1992

2. EXPERIMENTATION DU MODELE

Nous avons modélisé le problème avec le langage GAMS version 2.5. Le listing est donné en annexe B du document. La résolution est effectuée sur une machine RS6000-530H avec le solver OSL version 2.0.

La justification du bon fonctionnement du modèle par rapport aux autres approches est actuellement impossible. Comme nous l'avons indiqué, le modèle prend en considération une conception nouvelle du problème. Cependant, nous pouvons vérifier la logique de ce modèle par l'interprétation de ses entrées-sorties. Rappelons que ce modèle est présentée sous la forme suivante:

ENTREES	MODELE	SORTIES
<ul style="list-style-type: none"> • Réseau • Demande • Fonction du coût 	linéaire, à variables binaires	<ul style="list-style-type: none"> • Coût minimum • Plan de vol des avions • Fréquencemètre

La comparaison logique des entrées-sorties nous permet de visualiser le comportement du modèle dans un environnement pratique.

3. INTERPRETATION DES RESULTATS

La période d'optimisation considérée est la semaine, qui est subdivisée en créneaux horaires numérotés de la façon suivante :

1^{er} jour : Lundi - 1 à 13
 2^{ème} jour: Mardi - 14 à 27
 3^{ème} jour: Mercredi - 28 à 41
 4^{ème} jour: Jeudi - 42 à 55
 5^{ème} jour: Vendredi - 56 à 69
 6^{ème} jour: Samedi - 70 à 83
 7^{ème} jour: Dimanche - 84 à 97
 8^{ème} jour (jour fictif): 98. Ce créneau fictif nous assure le retour de toute la flotte à la base mère (Alger) pour la semaine d'après.

Les résultats obtenus sont représentés en premier lieu, sous forme de tableaux, sous forme schématique en second lieu.

Nous avons résumé les résultats obtenus dans le tableau suivant:

Avion	Mouvements/Semaine
B727	32
B737	14
F27	24

Ce tableau représente le fréquencesmètre obtenu en comptabilisant, dans la solution optimale, le nombre de vols effectués par chaque appareil durant la semaine-type.

Nous remarquons que le B727 est le plus utilisé, ce qui était prévisible car il permet de s'ajuster à moindre coût à la demande, en raison de sa grande capacité.

Les créneaux horaires pendant lesquels les avions sont en attente, seront vraisemblablement exploités lors de l'intégration future de tout le réseau (International et Domestique).

Les rotations sont regroupées par avion. Comme nous l'avons cité précédemment, un avion est soit en vol entre deux villes, soit en attente d'affectation. Celle-ci est symbolisée par une paire de villes dont l'origine et la destination sont confondues.

B727

Paires de villes	Créneaux de décollage
ALG-ALG	1, 12, 44, 45, 72, 73
ALG-ORN	2, 13, 38, 54, 74, 94
ALG-TLM	24, 32, 46, 60, 82, 88
ORN-ALG	21, 29, 41, 51, 57, 69, 97
ORN-ORN	16
ORN-TLM	5, 17, 65, 77
TLM-ALG	9, 35, 79, 85, 91
TLM-ORN	19, 27, 49, 63, 67
TLM-TLM	7, 8

B737

Paires de villes	Créneaux de décollage
ALG-ALG	1, 2, 3, 4, ..., 17, 22, 23, ..., 39, 46, 47, 58, 59, ..., 79, 86, 87, 88, 96, 97, 98
ALG-ORN	18
ALG-TLM	40, 48, 80, 89
ORN-ALG	20, 94
ORN-ORN	
ORN-TLM	53
TLM-ALG	43, 55, 83
TLM-ORN	51, 92
TLM-TLM	

F27

Paires de villes	Créneaux de décollage
ALG-ALG	1, 2, 3, ..., 31, 68, 69, 70, ..., 81, 97, 98
ALG-ORN	32, 82, 88
ALG-TLM	
ORN-ALG	85
ORN-ORN	43, 44, 45, 46, 52, 57, 58, 59, 60, 61
ORN-TLM	35, 47, 53, 62, 91
TLM-ALG	65, 94
TLM-ORN	41, 50, 55
TLM-TLM	37, 38, 39, 40, 49, 64, 93

L'utilisation journalière par avion est donnée dans le tableau suivant:

Avions	Utilisation Journalière
B727	12.57
B737	5.57
F27	4.86

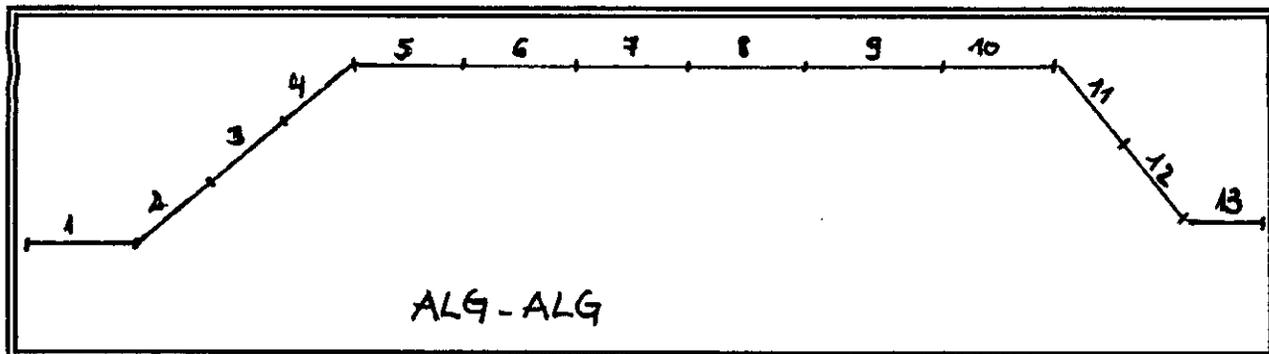
Dès le départ, nous nous étions fixé pour objectif la mise en oeuvre d'un modèle mathématique applicable à une compagnie aérienne pour l'élaboration du programme de vol. Cette mise en oeuvre passe d'abord par la validation du modèle. Cependant, la partie validation n'est là que pour montrer la cohérence et le fonctionnement du modèle.

Ceci étant, nous ne pouvons, à ce stade, comparer ces résultats avec ce qui a été fait par Air Algérie (notre jeu d'essai ne prend pas en considération la totalité du système). Toutefois, il est possible de résoudre le problème global en utilisant des moyens informatiques appropriés (16 Méga-Octets de mémoire vive).

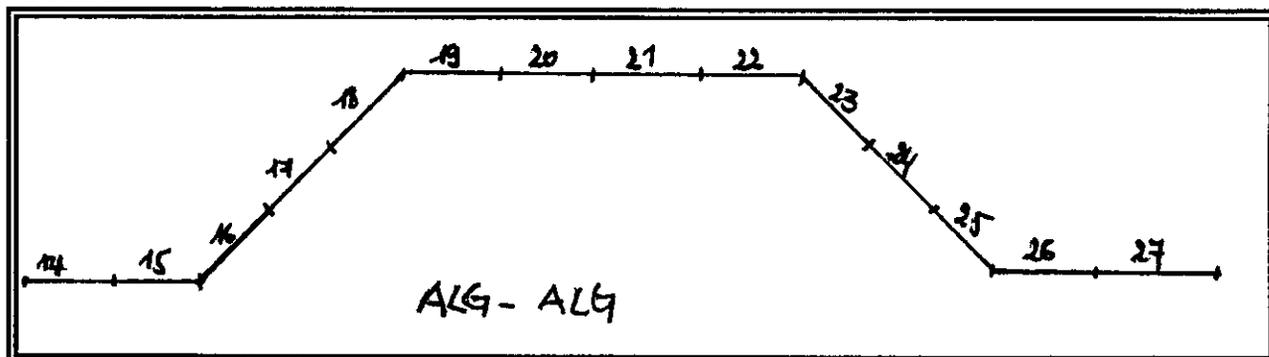
Représentation schématique des résultats obtenus par avion et par jour

(Les résultats du F27 sont représentés ci-dessous, les résultats des avions sont représentés en annexe B).

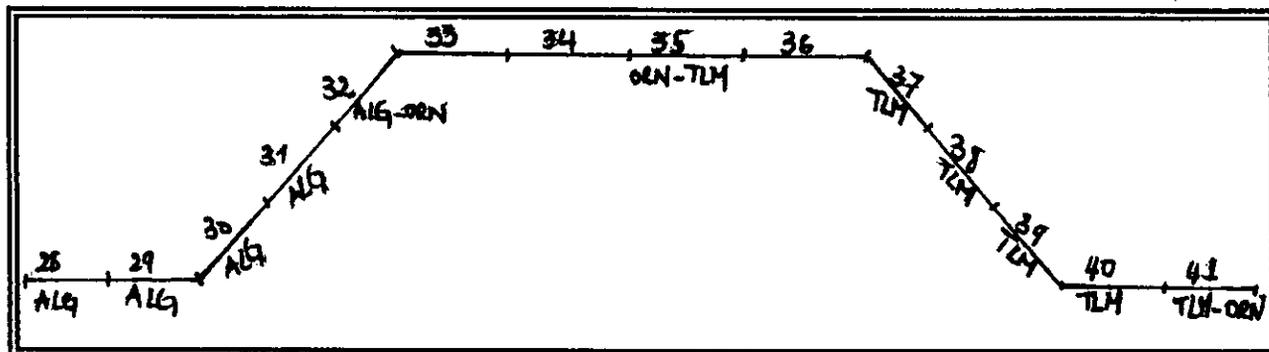
Jour 1



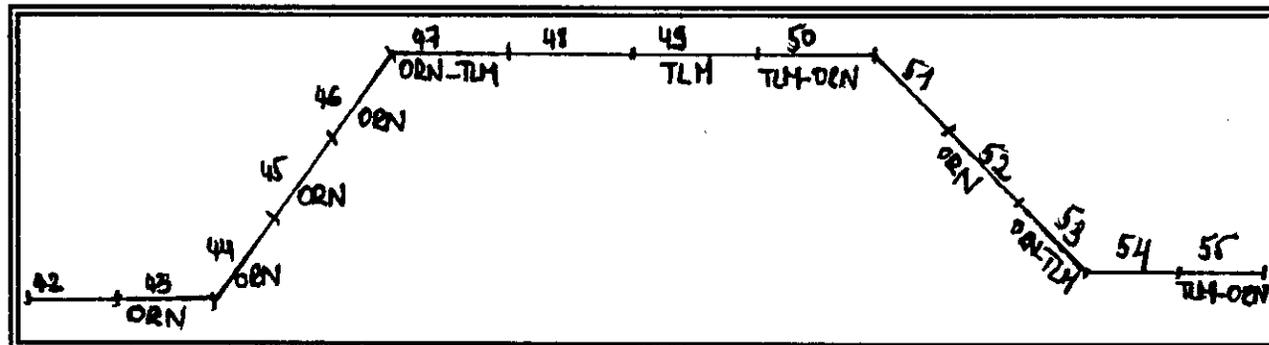
Jour 2



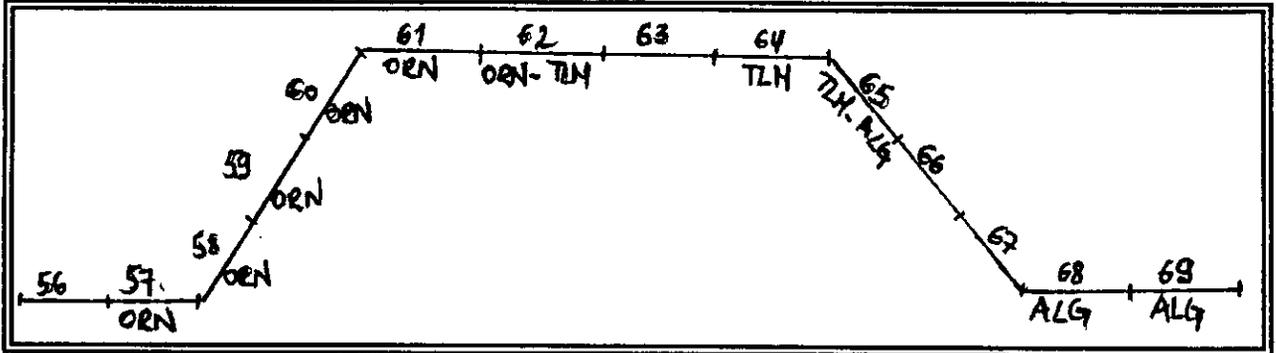
Jour 3



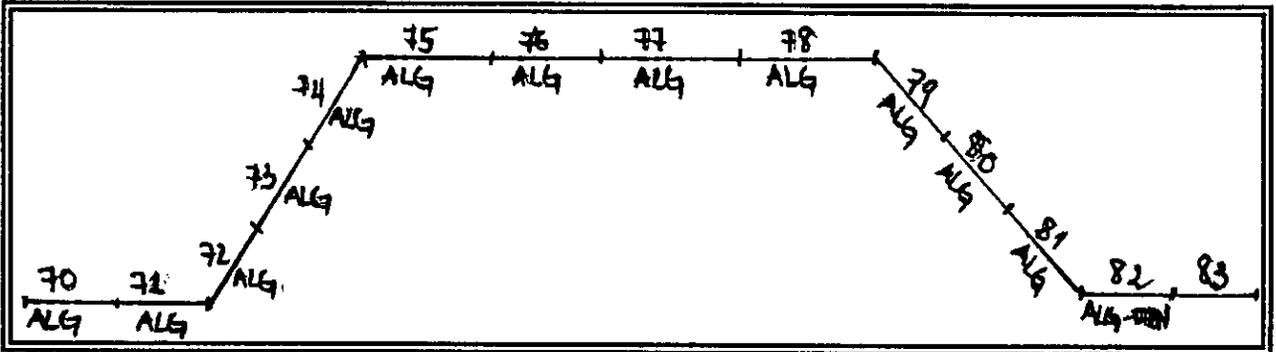
Jour 4



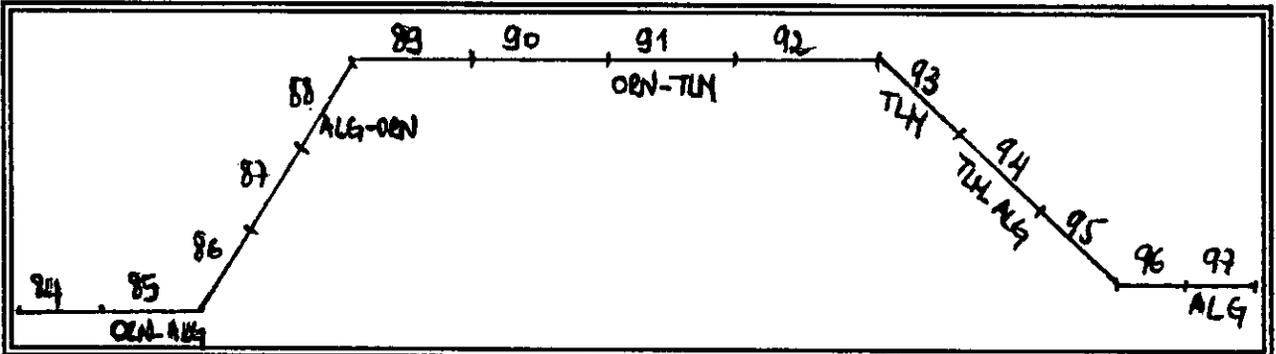
Jour 5



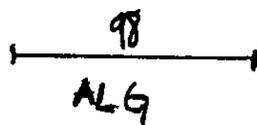
Jour 6



Jour 7



Jour 8



CINQUIÈME PARTIE

Conclusion générale

La conclusion porte sur deux axes:

- l'apport de ce travail sur l'application pratique
- les recherches futures

1. L'APPORT PRATIQUE

Nous avons conçu une nouvelle approche de modélisation en redéfinissant le problème classique de l'affectation dans le cas du transport aérien. Cette approche consiste en l'affectation individuelle des avions aux vols sur un réseau donné. L'objectif principal est de réorganiser le processus de décision autour d'un noyau sur lequel les principaux sous-problèmes de la gestion d'une compagnie peuvent être intégrés sans transformation majeure.

L'affectation d'un avion donné à un vol qui est défini par paire d'aéroports (décollage et atterrissage), avec l'heure de décollage, à ce stade d'optimisation, nous permet d'intégrer sans une interface supplémentaire la gestion de la maintenance et de l'équipage. Cette variable de décision est conforme au cahier des charges de la maintenance opérationnelle ainsi que celui de l'affectation de l'équipage aux vols.

Les principaux apports de notre approche sont:

- l'optimisation des variables stratégiques telles que l'affectation de types d'avions aux routes en tant que variables opérationnelles nous permet d'éviter la sous-utilisation des ressources, et l'obtention de solutions sous-optimales.
- la forme des résultats nous permet de travailler dans un environnement ouvert. Dans un même processus, nous pouvons optimiser la maintenance, l'équipage ainsi que les services au sol et l'embouteillage du ciel.

2. RECHERCHE FUTURE

La recherche future porte sur deux axes:

- élargissement du champ d'action du modèle,
- développement de solvers spécifiques,
- adaptation du modèle à d'autres domaines différents.

2.1. Elargissement du champ d'application du modèle

Le présent modèle n'a pas inclus les sous-problèmes tels que le management de l'équipage, de la maintenance et la simulation de la flotte. Il est actuellement limité par l'intégration de l'affectation des avions aux horaires et aux routes.

Toutefois, la forme désagrégée du modèle et les variables comme l'affectation individuelle des avions lui permet d'avancer dans le sens de l'intégration de tous les sous-problèmes cités dans l'état de l'art (partie II).

2.2. Développement de solvers spécifiques

Le travail actuel se limite à la redéfinition du problème et à la proposition d'un modèle. Le modèle a été analysé par une seule version linéaire de base. Pour la résolution, nous

avons utilisé les matériels (hardware) et les algorithmes (software) disponibles sur le marché.

La question de l'utilisation d'un algorithme spécialisé n'a pas été évoquée. Mais la forme du problème, présente notamment dans le cadre de l'affectation des avions, donne espoir à des méthode plus efficaces.

2.3. Adaptation aux autres domaines

La considération d'un problème de grande taille comme procédure d'optimisation intégrale est également faisable pour d'autres domaines. Le problème du transport aérien peut être adapté aux autres modes de transport. Le problème d'affectation peut être utilisé dans le domaine de la gestion de la production. L'utilisation de la méthode de temps discret nous permet de convertir les problèmes en programmation dynamique. Cela réduit le nombre de décisions à prendre pendant chaque segment de temps.

Références bibliographiques

- ABA89** *ABARA J. A. 1989*, Applying Integer Linear Programming to Fleet Assingnement Problem, Interfaces, Vol. 19, No. 4, pp.20-28
- AIR90** *AIRBUS INDUSTRIE, 1990*, Market perspectives for civil jet aircraft, Rapport Internal, AI/CM-P312 0020/90
- ANR87** *ANDREATA G. & ROMANIN-JACUR G., 1987*, Aircraft Flow Management Under Congestion, Transportation Science, Vol.21, No.4, pp.249-253
- BAC87** *BARD J.F. & CUNNINGHAM I.G., 1987*, Improving Through-Flight Schedules, IIE Transactions, Vol.35, No.1, pp.1-21
- BOE92** *BOEING 1992*, Current Market Outlook, World Market Demand and Airplane Supply Requirements, Boeing Commercial Airplane Group, Seattle
- BO174** *BOILE J. L. 1974*, Influence of Scheduling Frequencies and Fares in Traffic for Airline in Competition with Other Airlines or Surface Transport, AGIFORS, Vol.14, pp.463-466
- CLE86** *CLEGG R. 1986*, Bridging the DSS Generation in British Airways (PC's in our time), AGIFORS, Vol. 26, pp.82-91
- COG84** *COOK T.M. & GILLIAN S. C., 1984*, Airline Dependability Model, AGIFORS 24, pp.227-245
- DEK79** *DE NEUFVILLE R. & KING C. L., 1979*, Access, Fares, Frequency: Effects on Airport Traffic, Transportation Engineering Journal of ASCE, Vol. 105, No. TE2
- DLT89** *DROR M., LAPORTE G., TRUDEAU P., 1989*, Vehicule Routing with Stochastic Demands: Properties and Solution Framworks, Transportation Science, Vol. 23, pp. 166-176
- DNK73** *De NEUFVILLE R. & KING C. R., 1973*, Multiattribute Preference Analysis for Transportation systems Evaluation, Transportation Research, Vol.7, pp. 63-76
- DOL93** *DOBSON G. W., & LEDERER P. J., 1993*, Airline Schedueling and Routing in a hub and Spoke System, Transportation science, Vol. 27, N°. 3, pp.281-297
- DRA74** *DRAKE J. W., 1974*, Social, Political and Economic Constraints on Airline Fuel Optimisation, Transportation Research, Vol. 8, pp. 443-449
- DUH74** *DUNLAY W. Jr. & HORONJEFF R., 1974*, Application of Human Factors Data to Estimating Air Traffic Control Conflicts, Transportation Research, Vol. 8, pp. 205 - 217

- ENK76** *ENGLISH J. M. & KERNAN G. L., 1976*, The Prediction of Air Travel and Aircraft Technology to the Year 2000 Using the Delphi Method. Transportation Research, Vol. 10A, N° 1, pp. 1-8
- ERT80** *ERISKSEN S. E., TANEJA N. K., 1980*. Evaluation of Scheduled Air Passenger Service in Domestic Markets. Journal of Aircraft. Vol. 17, N° 1
- ETM84** *ETSCHMAIER M. M. & MATHAISEL D. F. X. 1984*. Aircraft Scheduling The State of Art. AGIFORS Proceedings, Vol. 24
- ETM85** *ETSCHMAIER M. M. & MATHAISEL D. F. X. 1985*, Airline Scheduling: An Overview, Transportation Science, Vol. 19, N° 2, pp. 127-138
- FIA84** *FINNEGAN W. F. & ANDRADE J. M., 1984*, The Impact of Changes in the Environment on an Airline Network, AGIFORS Proceedings, Vol. 24, pp. 61-84
- FLO84** *FLORIAN M., 1984*, Transportation Planning Models, Chapitre I, pp. 3-107, North-Holland, Elsevier Science Publishers B. V., ISBN: 0444875816
- GRA85** *GRAY P., 1985*. System Tool for Aircraft Routing. AGIFORS Proceedings, Vol. 25
- GUN64** *GUNN W. A. 1964*, Airline System Simulation, Operations Research, Vol. 12, pp. 206-229
- HAK94** *HAKAN C, 1994*, Définition Nouvelle du Problème d'Affectation des Sièges à la Capacité et des Avions aux Routes et aux Horaires Simultanément sous l'Influence de la Demande, sa Modélisation et sa Résolution. Ecole Centrale de Paris. Laboratoire Productique-Logistique.
- HAL89** *HALL R. W., 1989*. Configuration of an Overnight Package Air Network, Transportation Research, Vol. 23A, N° 2, pp. 139-149
- HOO88a** *HOOKE J. N. 1988a*, An Approach to Real-Time Aircraft Scheduling, Working Paper 27-87-88, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213
- HOO88b** *HOOKE J. N. 1988b*, MAC Routing and Scheduling-Progress Report, Working Paper 88-89-04, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213
- HOO88c** *HOOKE J. N. 1988c*, MAC Routing and Scheduling-Final Report, Working Paper 88-89-04, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA 15213
- KAN81** *KANAFANI A. 1981*, Aircraft Technology and Network Structure in Short-Haul Airtransportation, Transportation Research, Vol. 15A, pp. 305-314
- KAN83** *KANAFANI A., 1983*, Transportation Demand Analysis, Mc GrawHill, New York

- LAH77** *LADANY S. P., HERSH M., 1977.* Non-Stop vs One Stop Flights. Transportation Research, Vol. 11, pp. 155-159
- LEB85** *LEBEUF D. 1985,* L'allocation des appareils pour un Horaire Aerien: Une Approche Interactive Graphique. Mémoire de M.Sc., University of Montréal, Centre de Recherche pour Transport
- LEV69** *LEVIN A., 1969.* Some Fleet routing and Scheduling Problems for Air Transportation Systems. Massachusettes Institute of Technology, Cambridge, Flight Transportation Report, N° FTL-R68-5, 135p.
- LIB82** *LITINAS N. & BEN-AKIVA M., 1982.* Simplified Transportation Policy Analysis Using Continuous Distributions, Transportation Research, Vol. 16A, N° 5/6, pp. 431-445
- LMO88** *LAVOIE S., MINOUX M. & ODIER E., 1988.* A new approach for crew pairing problems by column generation with an application to air transportation. European Journal of Operational Research, N° 35, pp 45-58
- MAD78** *MALONE J. M. & DICESARE F. 1978,* Calibration of Gravity Models. Transportation Research, Vol. 12, pp. 181-184
- MAG81** *MAGNATI T. L., 1981,* Combinatorial Optimization and Vehicle Fleet Planning: Perspectives and Prospects. Networks, Vol.11, pp 179-213
- MAT83a** *MATHAISEL D. F. X., 1983a,* Cell Theory: Air Transportation Net Work Aggregation and Fleet Planning, AGIFORS, Vol.23
- MAT83b** *MATHAISEL D. F. X., 1983b,* Fleet Assignment with Variable Demand: A Goal Programming Approach, AGIFORS Proceeding, Vol.23
- MDD89** *MC DONALD DOUGLAS, 1989,* Outlook for Commercial Aircraft 1988-2002, Report N° C1-M34-8476-88
- MIJ72** *MILLER J. C. 1972,* A Time of a Day Model for Aircraft Scheduling. Transportation Science, Vol. 6, pp. 221-246
- MIN84** *MINOUX M., 1984.* Column Generation Techniques in Combinatorial Optimization - A New Application to Crew Pairing. AGIFORS Proceedings, Vol.24, pp. 15-29
- MOR85** *MORRISON S. A. 1985.* Voting and the Efficiency of Airport Runway Investment, Transportation Research, Vol. 19A, N° 1, pp. 59-64
- NAK86** *NAKAZAWA S. 1986,* A Study of Heuristic Method for Developping a Domestic Timetable: AGIFORS, Vol 26, pp. 34-50
- OAC85** *OACI, 1985,* Manuel on Air Traffic Forecasting, DOC 8991-AT/722/2, 2nd edition

- ODO87** *ODONI A. R. 1987*, The Flow Management Problem in Air Traffic Control, "Flow Control of Congested Networks", pp. 269-288. Odoni A. R., Bianco L. & Szego G., Edit. Springer-Verlag, New York
- ÖZE88** *ÖZEKICI S., 1988*, Optimal Periodic Replacement of Multicomponent Reliability Systems, Operations Research, Vol. 36, N° 4, pp. 542-552
- ÖZP88** *ÖZEKICI S., PAPAZYANT I. 1988*, Inspection Policies and Processes for Deteriorating Systems Subject to Catastrophic Failure. Naval Research Logistics, Vol. 35, pp. 481-492
- PIL74** *PILATI D. A., 1974*, Energy Use and Conservation Alternatives for Airplanes, Transportation Research, Vol. 8, pp. 433-441
- POK74** *POLLACK M. 1974*, Some aspects of the aircraft scheduling problem, Transportation Research, Vol. 8, pp. 233-243
- POK77** *POLLACK M. 1977*, Some Elements of the Airline Fleet Planning Problem, Transportation Research, Vol. 11, N° 5, pp. 301-310
- POW82** *POWELL W. B. 1982*, Analysis of Airline Operating Strategies Under Stochastic Demand, Transportation Research, Vol. 16B, N° 1, pp. 31-43 et 394-402
- RAP83** *RAPLEY K. 1983*, Airline Case Study in Systems O.R. AGIFORS, Vol. 23, pp. 493-507
- RIC76** *RICHARDSON R. 1976*, An Optimization Approach to Routing Aircraft, Transportation Science, Vol. 10, N° 1, pp. 52-71
- SAB74** *SALZBORN F. J. M., Buckley D. J. 1974*, Minimum Fleet Size Models for Transportation Systems, 1974 Proceeding, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 607-623
- SFR80** *SOUMIS F., FERLAND J. A. & ROUSSEAU J. M. 1980*, A Model for a Large-Scale Aircraft Routing and Scheduling Problems, Transportation Research, Vol. 14B, pp. 191-201
- SFR81** *SOUMIS F., FERLAND J. A. & ROUSSEAU J. M. 1981*, A Model for Assigning Passengers to a Flight Schedule, Transportation research, Vol. 15A, pp. 155-162
- SIP69** *SIMPSON R. W. 1969*, Scheduling and Routing Models for Airline Systems, Massachusetts Institute of technology, Cambridge, Flight Transportation Report, N° FTL-R68-3, 175p.
- SMT76** *SMITH C. M. 1976*, Fuel Management and Optimization, AGIFORS Proceedings, Vol. 16
- SOU78a** *SOUMIS F. 1978*, Planification d'une Flotte d'Avions, Université de Montréal, Centre de Recherche sur les Transports, Pub. #133

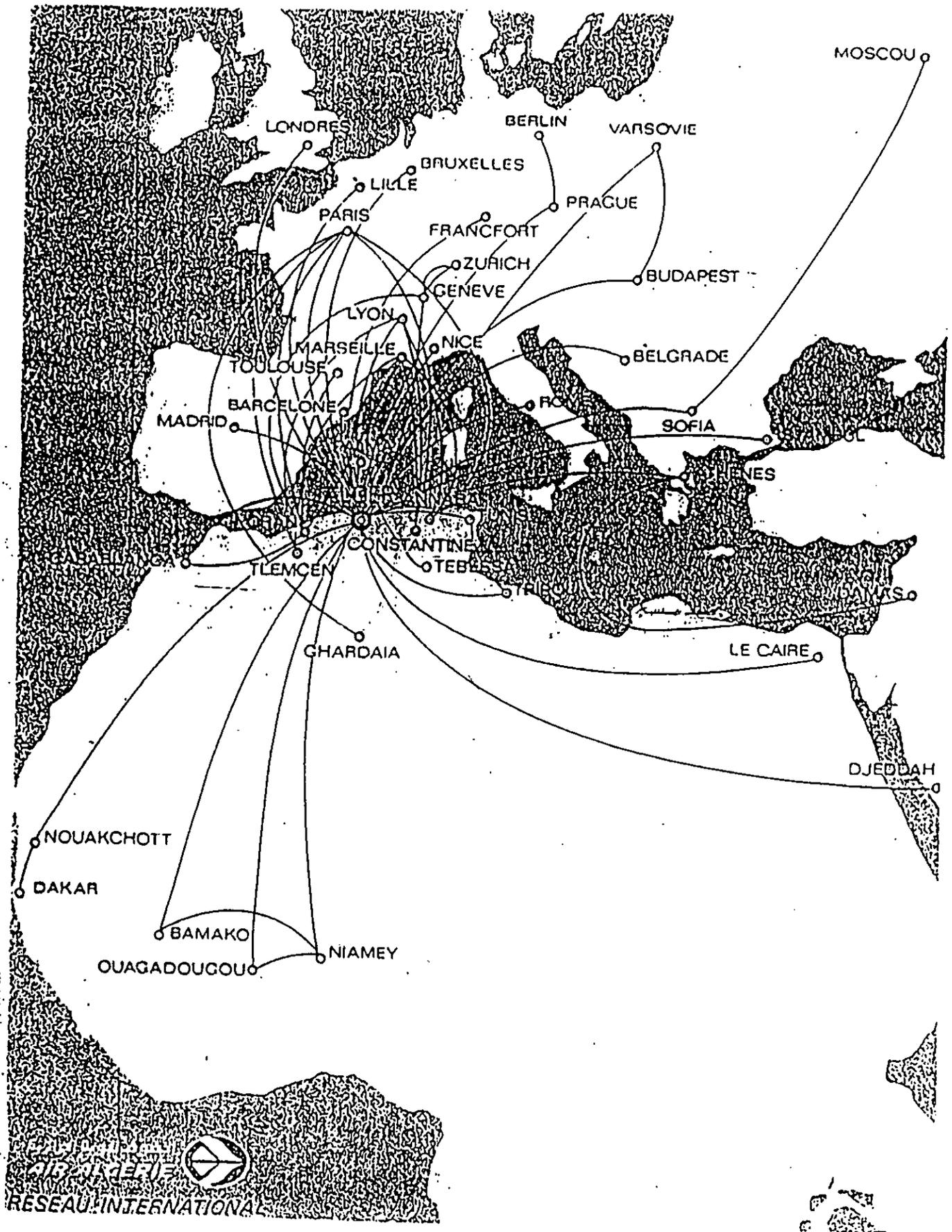
- SOU78b** *SOUMIS F. 1978*, Modèle de Comportement des Clients du Transport Aérien. Université de Montréal, Centre de Recherche sur les Transports, Pub. #119
- STU75** *STROUP J. W., LACKEY W. J. 1975*, Fuel Management Model. Paper 6376. McDonnell Douglas Corp., Long Beach, Ca, 90846, USA
- STT87** *STEENGE R. & TILANUS E. W. 1987*, Yield Management and Operations Research AGIFORS Proceedings. Vol. 27
- SWA77** *SWAN W. 1977*, The Frequency of Airline Service in Large Markets: Competition or Network Effects? Flight Transportation Laboratory Technical Memorandum, 77-3, Massachussettes Institute of Technology
- TAN78** *TANEJA N. K. 1978*, Airline Traffic Forecasting, Lexington Books, Massachussettes, ISBN: 0-669-02186-5
- TEG84** *TEODOROVIC D. GUBERINIC S. 1984*, Optimal Dispatching Strategy an Airline Network after a Schdule Perturbation, European Journal of Operational Research, N° 15, pp 178-182
- TEK89** *TEODOROVIC D. & KRCMAR-NOZIC E. 1989*, Multicriteria Model to Determine Flight Frequencies on an Airline Network under Competitive Conditions, Transportation Science, Vol. 23, N° 1, pp. 14-25
- TEO83** *TEODOROVIC D. 1983*, Flight Frequency Determination, Journal of Transportation Engineering, N° 107, pp. 747-757
- TEO84** *TEODOROVIC D. 1984*, Optimal Dispatching Strategies on an Airline Network After a Schedule Perturbation, European Journal of Operational Research, N° 15, pp. 178-182
- TEO89** *TEODOROVIC D. 1989*, Model for Operational Daily Airline Schedule, Transportation Planning and Technology, Vol. 14, N° 4, pp. 273-285
- TRE82** *TRESEDER R. 1982*, Yield Management, AGIFORS, Vol. 22
- TRI93** *TRIETSCH D. 1993*, Scheduling Flights at Hub Airports, Transportation Research, Vol. 27B, N° 2, pp 133-150
- TSA85** *TSANG S. 1985*, Manpower and Telephone Trunk Line Management for a reservation Center, AGIFORS 25, pp 175-190
- VOI69** *VOGT IVERS and Associates 1969*, Social and Economical Factors Affecting Intercity Travel, National Cooperative Highway Research Program Report N° 70, Project 8-1 FY '64

- WAC76** **WAYNE D. D. LOFLIN C. 1976.** Fuel Management and Allocation Model, AGIFORS Proceedings, Vol. 16
- WAG91** **WANG h. 1991,** A Dynamic Programming Framework for the Global Flow Control Problem in Air Traffic Management, Transportation Science, Vol. 25, N° 4, pp. 308-313
- WAL78** **WALTERS A. A. 1978,** Airports - An Economic Survey, Journal of Transport Economics & Policy, Vol. 12, pp 125-157
- WAN82** **WANG G. H. K. 1982,** Modeling the Interaction between Payload Restriction, Passenger Demand and Reservation Booking Levels, AGIFORS, Vol. 22, pp. 323-338
- WAP70** **WALKER-POWELL A. J. 1970,** The Port Linkage Problem, Rapport non publié, présenté au Groupe de travail de la construction et évaluation de la planification à la réunion de AGIFORS à Vienne, disponible au FTL-MIT
- WHI72** **WHITE J. L. 1972.** Quality variation when prices are regulated, Bell Journal of Economics & Management Science, Vol. 3, N° 2, pp. 425-436
- WOL92** **WOLLMER R. D. 1992,** An Airline Reservation Model for Single Leg Route When Lower Fare Classes Book First, Operations Research, Vol. 40, N° 1, pp. 26-37

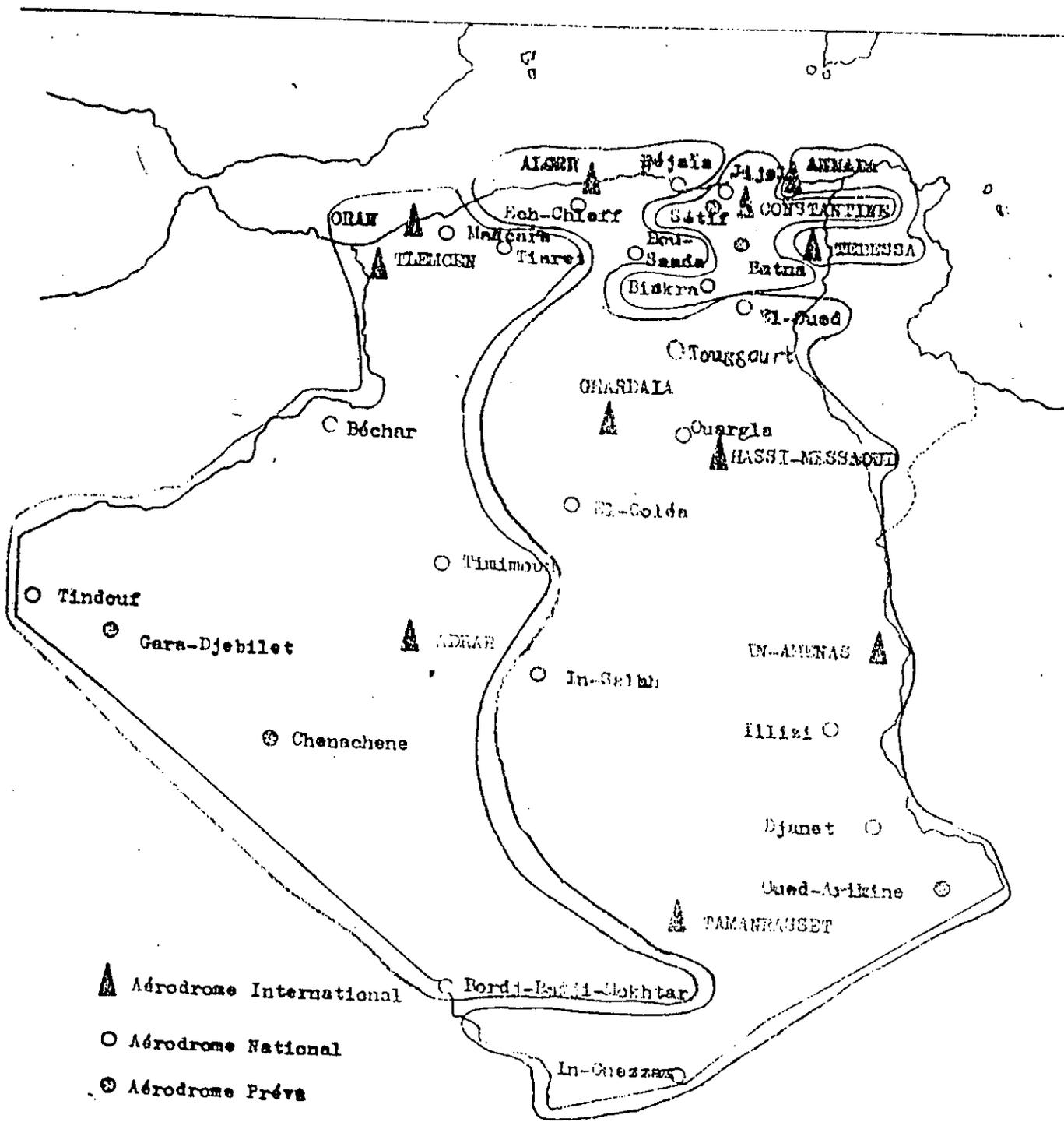
ANNEXES

ANNEXE A

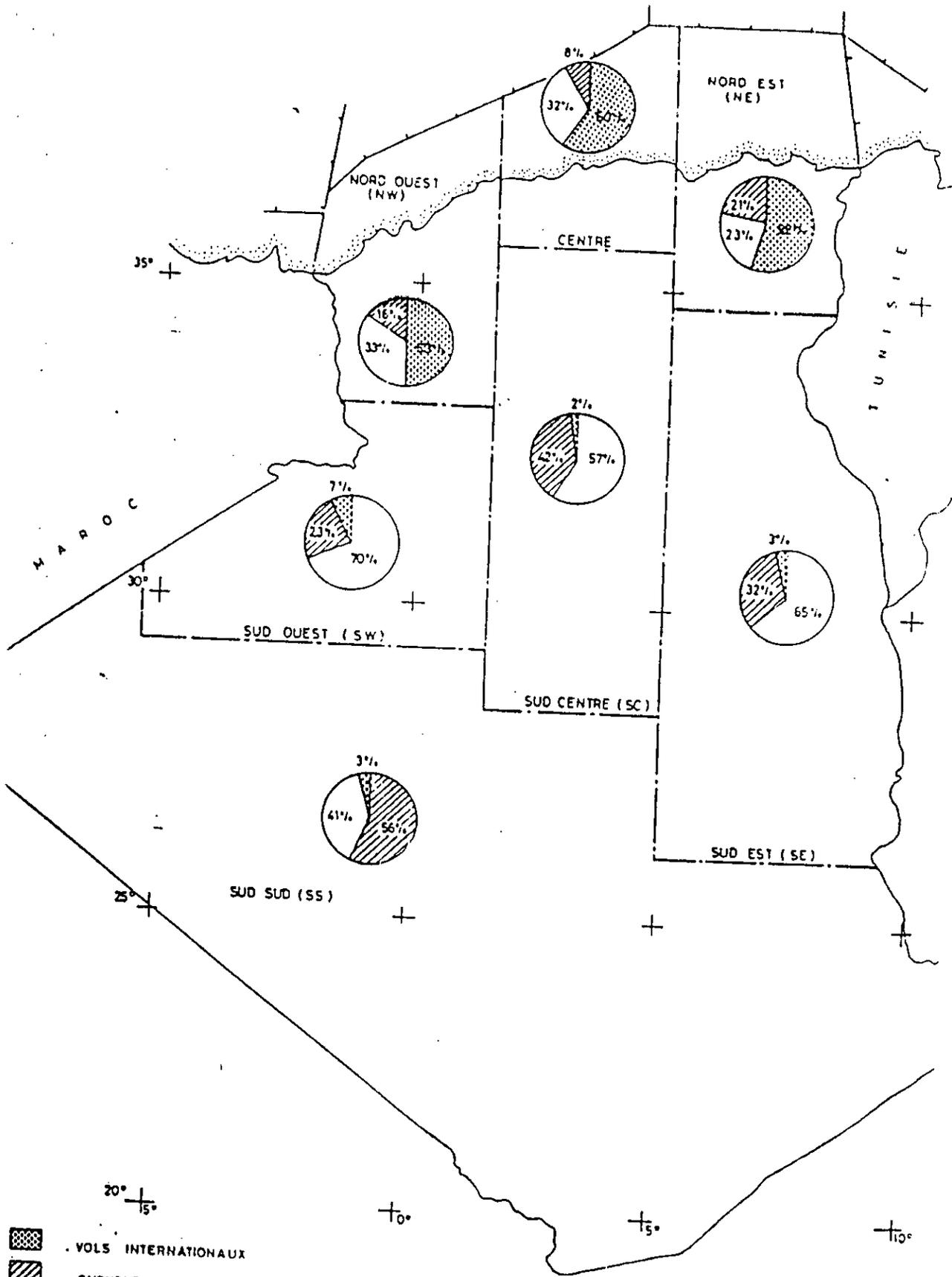
- A.1. Réseau domestique d'Air Algérie
- A.2. Réseau international d'Air algérie
- A.3. Carte des aérodromes
- A.4. Trafic des secteurs - FIR d'Alger
- A.5. Organigramme type des EGSA
- A.6. Organigramme de la DACM
- A.7. Statistiques du trafic de passagers d'Air Algérie (1989 à 1992)
- A.8. Les résultats du marché global d'Air Algérie (1989 à 1992)
- A.9. Résultats analytiques d'Air Algérie pour l'année 1992
- A.10. Carte d'atterrissage GHARDAIA
- A.11. Carte d'atterrissage TAMANRASSET
- A.12. Carte d'atterrissage ANNABA
- A.13. Carte d'atterrissage CONSTANTINE
- A.14. Carte d'atterrissage ORAN



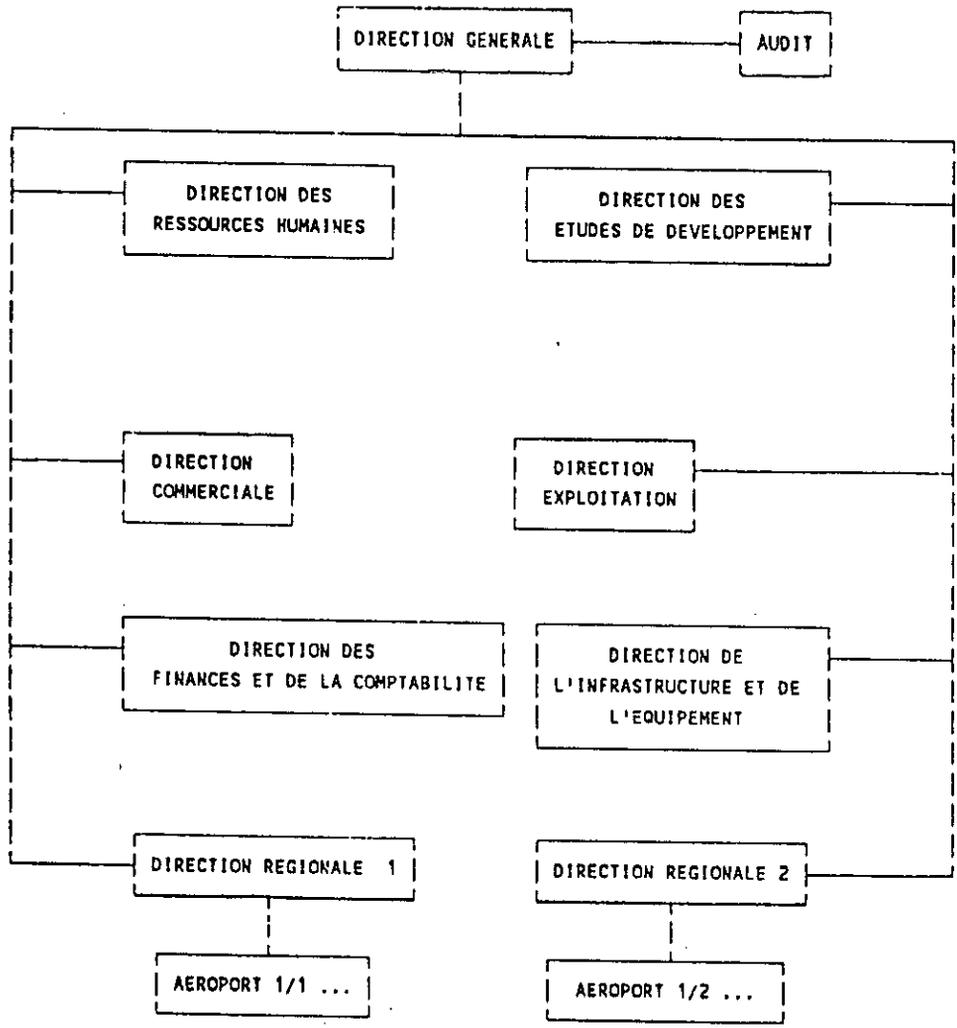
A.1. RESEAU INTERNATIONAL - AIR ALGERIE



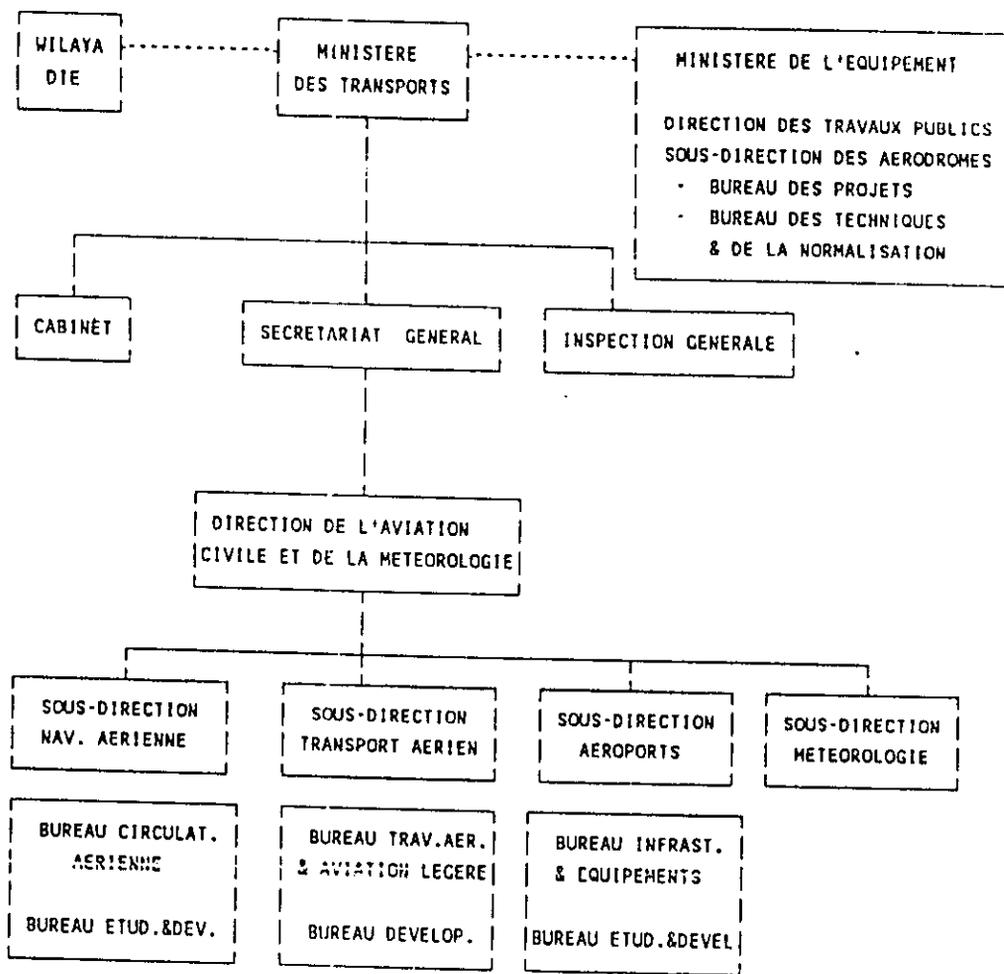
A. 5. CARTE DES AERODROMES
 Source : ENESA



A. 11 : TRAFIC DES SECTEURS - FIR D'ALGER
 Source : DACM (PNNA).



A.5. Organigramme type des EGSA.



A. 6. Organigramme de la DACH.

A.7. Les statistiques de trafic de passagers d'Air Algérie (1989 à 1992)

Réseau	Sens	Trafic passagers			
		1989	1990	1991	1992
Afrique	Aller	17588	15811	13150	15706
	Retour	19662	19428	17215	18941
	Total	37250	35239	30365	34647
Europe 1	Aller	123178	122389	98783	103805
	Retour	116029	113696	92545	92200
	Total	239207	236085	191328	196005
Europe 2	Aller	28976	27009	18912	16618
	Retour	25903	24206	16861	15111
	Total	54884	51215	35773	31729
France	Aller	741115	667222	634376	673535
	Retour	663093	611503	569533	576954
	Total	1404208	1279325	1198909	1250489
Intérieur	Aller	964423	976531	808790	N.C
	Retour	933044	954270	786106	N.C
	Total	1897467	1930001	1594896	1833665
M.M.O ¹	Aller	116224	126543	82954	106476
	Retour	113030	122128	84326	103644
	Total	229254	248671	167280	210120
Système	Aller	1991504	1936105	1656965	N.C
	Retour	1870766	1845231	1561586	N.C
	Total	3862270	3781336	3218551	3524926

¹ Maghreb et Moyen Orient

**A.8. Les résultats du marché global d'Air Algérie
(1989 à 1992)**

Réseau	Sens	Les parts de marché %			
		1989	1990	1991	1992
Afrique	Aller	100.00	100.00	100.00	100.00
	Retour	100.00	100.00	100.00	100.00
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00
Europe 1	Aller	56.57	58.61	63.96	64.80
	Retour	58.91	59.41	65.21	65.05
	Total	57.69	58.99	64.56	64.92
Europe 2	Aller	57.33	60.32	67.77	75.72
	Retour	58.88	60.42	67.80	77.71
	Total	57.95	60.37	67.78	76.60
France	Aller	54.52	61.39	75.10	76.10
	Retour	53.98	59.94	73.85	75.90
	Total	54.27	60.69	74.50	76.01
M.M.O¹	Aller	54.42	56.67	59.29	65.20
	Retour	54.71	56.88	62.28	66.12
	Total	54.56	56.77	60.78	65.66

A.9. Résultats analytiques d'Air Algérie pour l'année 1992

	Carburant	Entretien	Atté. Statio.	Survol	Touchées	P.N
International	715299469	515172622	257237824	342857145	436748127	3680303
Domestique	407881470	513279632	41735627	26822226	0	2522499
Système	1123180939	1028452254	298973451	369679371	436748127	6202802

Atté. Statio : atterrissage et stationnement.

	Soustraction frais de vols	Frais hôteliers	Quote part frais d'escalas	Redevances pax	Assurances responsabilité Civile	Soutrait frais tra
International	2635345503	372896401	168905640	245518155	15744452	803064
Domestique	1241968857	87831822	127799228	0	7635568	223266
Système	3877314360	460728223	296704868	245518155	23380020	102633

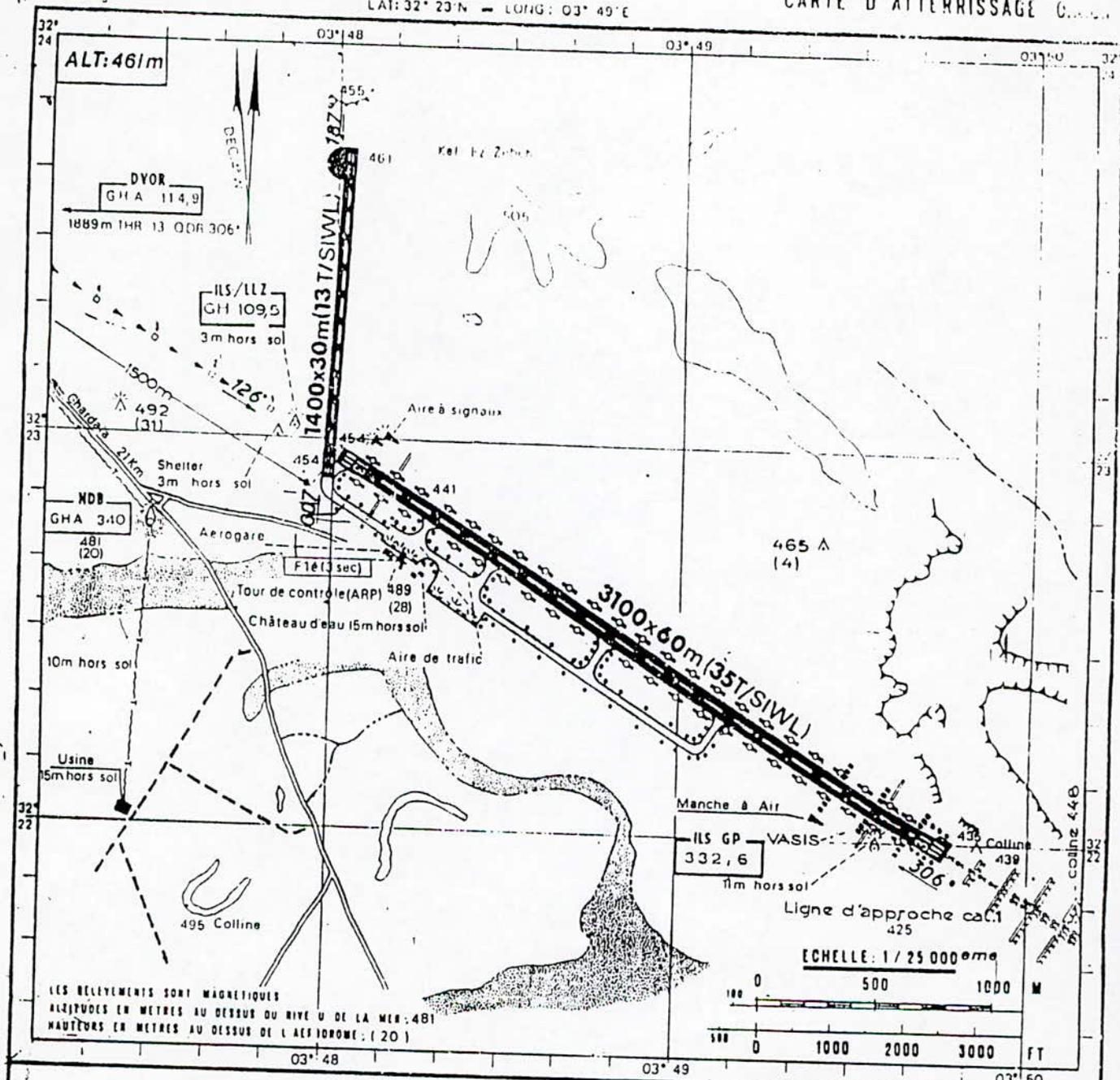
	Frais distribution	TAIC	Frais vente	Coûts variables	Coûts fixes	Coûts d'explo
International	651965126	0	651965126	4090375277	291196870	438157
Domestique	64665113	18321780	82986893	1548222368	186363867	173458
Système	716630239	18321780	734952019	5638597645	477560737	611615

	Coûts indirects	Prix de revient (Amort. com)	Nombre pax	Prix revient / pax
International	575600841	4957172988	1802754	2627
Domestique	272117412	2006703647	1833665	961
Système	847718253	6963876635	3636419	1787

A:10.GHARDAIA/Noumerate

CARTE D'ATERRISSAGE

LAT: 32° 23' N - LONG: 03° 49' E



LES RELIÈVEMENTS SONT MAGNÉTIQUES
 ALTIITUDES EN MÈTRES AU DESSUS DU NIVEAU DE LA MER: 481
 HAUTEURS EN MÈTRES AU DESSUS DE L'AÉRODROME: (20)



BALISAGE DE L'AERODROME

- **BALISAGE LUMINEUX:** Piste 13/31
 Piste: Feux blancs LIL/LIH
 Seuil 31 Feux rouges et verts LIL/LIH
 Seuil 13 Feux rouges et verts LIL
 Barre des 300m
 Indicateur de pente d'approche VASIS 3° OFU 31
 Ligne d'approche Cat.1 sur 900m OFU 31
- **BALISAGE DIURNE**
 Numero d'identification tous OFU
 Axes de piste et de voies de circulation
 Point d'attente
 Marque de zone d'impact avec code de distance sur 900m pistes 13/31
 Marque des 300m
- **AUTRES BALISAGES**
 Raquette, voies de circulation, bretelles, parkings: Feux bleus LIL
 TE et Manche à air éclairés
 Phare d'aérodrome: alternés: vert et blanc

INSTALLATIONS ET SERVICES

- CARBURANT: JET A1 AVGAS 100
 Horaire H 24
- SERVICES:
 Douane, Police et Santé O/R
 Sécurité incendie: CAT V
 BIA et Bureau d'Exposé verbal: Meteo: 00

NOTE

Piste 01-19 utilisable de jour seulement

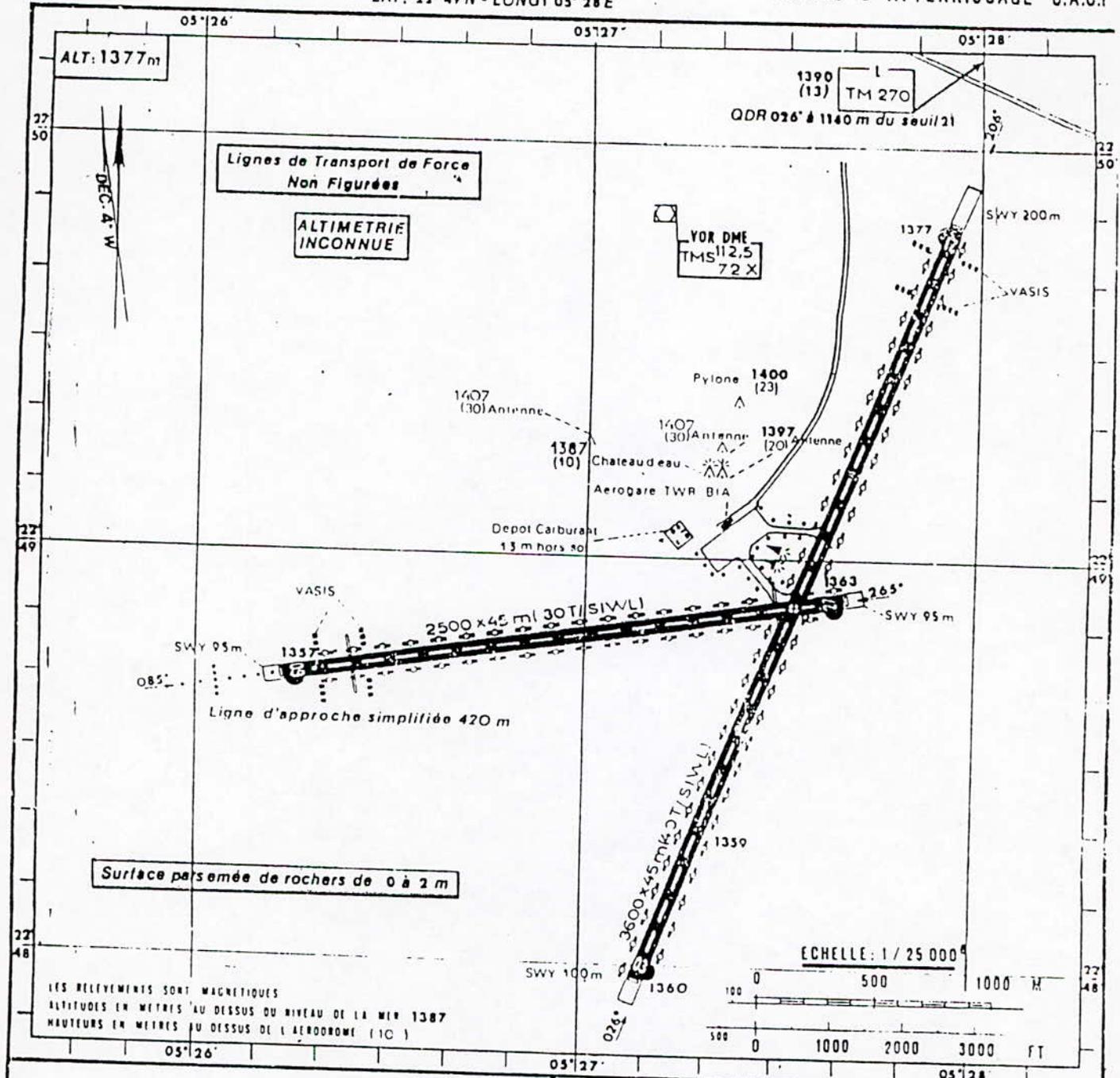
CORRECTIONS: NOTAM: N° 2108/87

A.11.

TAMANRASSET/Aguenar

LAT: 22° 49' N - LONG: 05° 28' E

CARTE D'ATTERRISSAGE O.A.C.I



Surface parsemée de rochers de 0 à 2 m

ECHELLE: 1 / 25 000

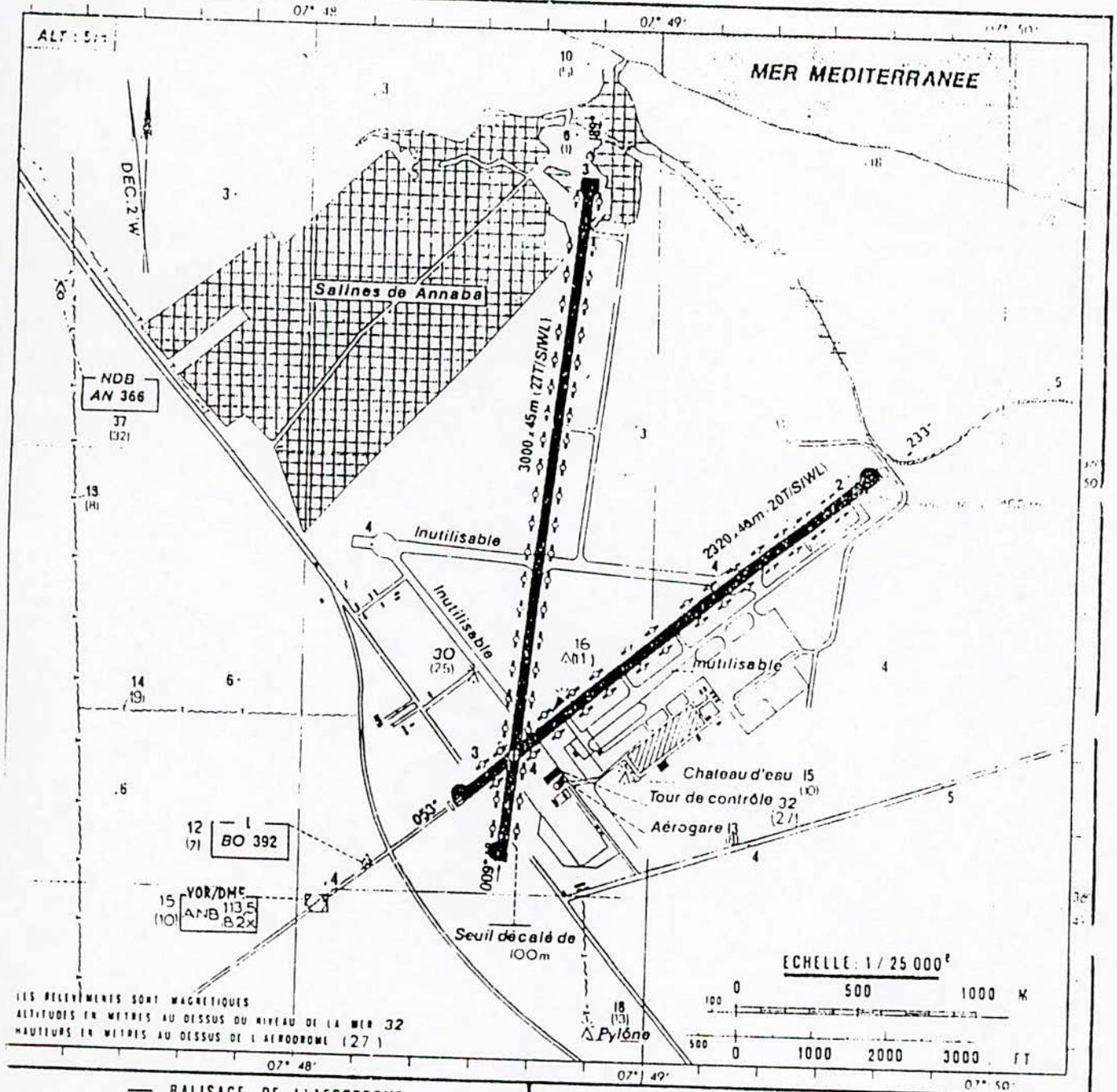
LES RELEVEMENTS SONT MAGNETIQUES
 ALTITUDES EN METRES AU DESSUS DU NIVEAU DE LA MER 1387
 HAUTEURS EN METRES AU DESSUS DE L'AERODROME (IC)

BALISAGE DE L'AERODROME

- BALISAGE LUMINEUX:
 - Piste: 03/21 Feux Blancs
 - Seuils: Feux Verts et Rouges
 - Piste: 09/27 Feux Blancs
 - Seuils: Feux Verts et Rouges
 - Barres des 300 m Feux Blancs
 - Ligne d'approche simplifiée Piste 09: Feux Blancs
 - Indicateurs visuels de pente d'approche (VASIS) Piste 09 et 21
- BALISAGE DIURNE:
 - Numero d'identification tous OFU
 - Bandes axiales - Marque d'impact avec code de distance
- AUTRES BALISAGES:
 - Vores de circulation et parking: Feux Bleus
 - Té et marche à air éclairés

INSTALLATIONS ET SERVICES

- CARBURANT
 - JET A1, AVGAS 100
 - (au comptant ou présentation de carte de crédit)
- SERVICES
 - Douane - Police; HJ (PN 24 HR)
 - BIA oui
 - Securite incendie Catégorie V



BALISAGE DE L'AERODROME

- BALISAGE LUMINEUX: Toutes pistes. Feux blancs LIL.
Piste 05/23 Seuil Feux Verts. Preseuil Feux Rouges.
Seuil 23 décalé de 100m. Barre des 300m.
Piste 01/19 Seuil 19 Feux Verts. Seuil 01 décalé.
Feux rouges sur 100m. Seuil Feux Verts. Preseuil Feux Rouges.

AUTRES BALISAGES: Voies de circulation. Feux bleus.
Manche à vent éclairée.
Obstacles balises de jour et de nuit.

BALISAGE DIURNE: Pistes 05/23 et 01/19.
Bandes axiales, numéros d'identification, marques de seuil et des 300 m.

NOTES: Pistes 19 et 23 virage de 180° à gauche au plus tard 1 minute après le décollage.
Présence d'oiseaux sur l'aérodrome.
Réservé aux aéronefs munis de Radio.
Inutilisable en dehors de l'aire de manœuvre.

INSTALLATIONS ET SERVICES

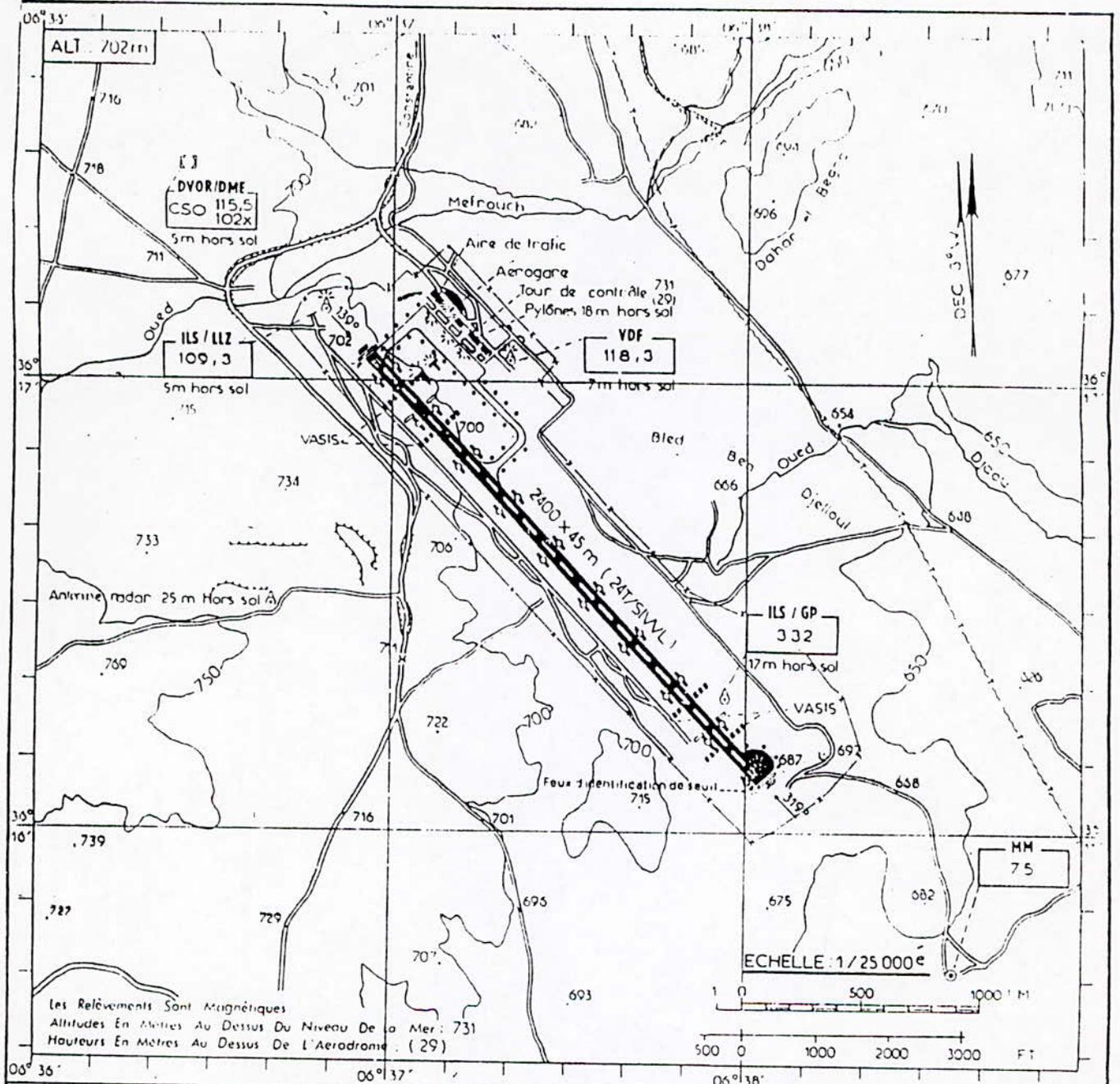
- CARBURANT: JET A 1 AVGAS 100
(au comptant ou sur présentation de carte de crédit) Dépôt NAFTAL. Tél. 82 21 34 ANNABA. HORAIRE H 24
- SERVICES:
Police, Douane: H 24. Santé sur demande.
Sécurité incendie: Cat. VI.
BIA: Bureau d'exposé verbal météo H 24

A.13.

CONSTANTINE / Ain el Bey

CARTE D'ATERRISSAGE O.A.C.I

LAT. 36° 17' 10" N LONG. 06° 37' 12" E



BALISAGE DE L'AERODROME

BALISAGE LUMINEUX :

- Piste 14/32 : Feux Blancs
- Seuils : Feux Verts et Rouges
- Barres des 300 m : Feux Blancs
- Indicateurs Visuels de pente d'approche VASIS OFU 14/32

BALISAGE DIURNE :

- Bande Axiale, Marques latérales et des 300m
- Nombres d'identification de piste
- Marques de seuils

AUTRES BALISAGES :

- Té et Manche à air éclairés
- Feux d'identification de seuils de piste (120e min) Feux Blancs
- Voies de circulation et Raquette Feux Bleus

INSTALLATIONS ET SERVICES

CARBURANT : JET A1 AVGAS 100

[au comptant ou sur présentation de carte de crédit]

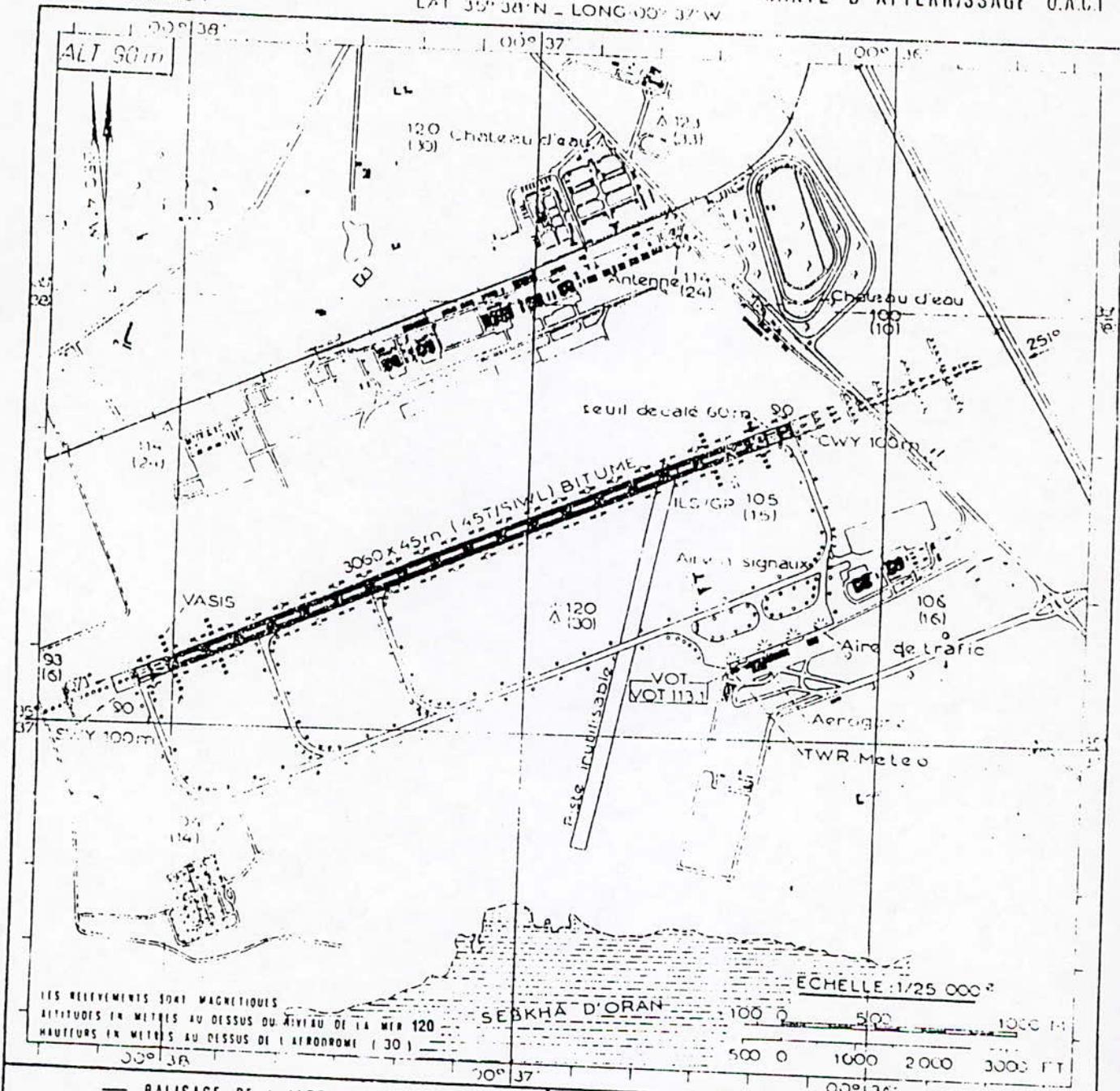
SERVICES :

- Douane, Police, Santé H24
- BIA Oui
- Sécurité Incendie CAT VII
- Bureau d'Exposé Verbal Météo Oui

1014
ORAN / Es Senia
 (ALGERIE)

CARTE D'ATERRISSAGE O.A.C.I

LAT 35° 38' N - LONG 00° 37' W



LES RELIEVEMENTS SONT MAGNETIQUES
 ALTITUDES EN METRES AU DESSUS DU NIVEAU DE LA MER 120
 HAUTEURS EN METRES AU DESSUS DE L'AERODROME (30)

- BALISAGE DE L'AERODROME**
- BALISAGE LUMINEUX:
 - Piste: Feux Blancs
 - Seuils: Feux Verts
 - Ligne d'approche: Catégorie II OFU 25
 - Ligne d'approche: Simplifiée OFU 07
 - BALISAGE DIURNE:
 - Ligne axiale, N° des OFU, Marques et seuils
 - Zone d'impact: avec code de distances
 - AUTRES BALISAGES:
 - VASIS: OFU 07, 25
 - Voies de circulation, parking, Feux Bleus
 - TE et Manche à air: acéliques
 - Tous les obstacles sont balisés de jour et de nuit

- INSTALLATIONS ET SERVICES**
- CARBURANT: JET A1, AVGAS 100
 (au comptant ou sur présentation de carte de crédit) H 24
 - SERVICES:
 - Douane, Police et santé H 24
 - Sécurité incendie Catégorie VI
 - BIA et Bureau d'exposé ventaire météo OUI

NOTE: Pour renseignements supplémentaires

SERVICE DE L'INFORMATION AERONAUTIQUE - ALGERIE

CORRECTIONS:

ANNEXE B

**Listing du programme et des résultats obtenus sur
GAMS**

* Densite de demande =	10.00	
* Cout optimal reelle		625166.49 Dinars
* affectation des avions		
B727. ALG. ALG. 1	1.00	
B727. ALG. ALG. 12	1.00	
B727. ALG. ALG. 44	1.00	
B727. ALG. ALG. 45	1.00	
B727. ALG. ALG. 72	1.00	
B727. ALG. ALG. 73	1.00	
B737. ALG. ALG. 1	1.00	
B737. ALG. ALG. 2	1.00	
B737. ALG. ALG. 3	1.00	
B737. ALG. ALG. 4	1.00	
B737. ALG. ALG. 5	1.00	
B737. ALG. ALG. 6	1.00	
B737. ALG. ALG. 7	1.00	
B737. ALG. ALG. 8	1.00	
B737. ALG. ALG. 9	1.00	
B737. ALG. ALG. 10	1.00	
B737. ALG. ALG. 11	1.00	
B737. ALG. ALG. 12	1.00	
B737. ALG. ALG. 13	1.00	
B737. ALG. ALG. 14	1.00	
B737. ALG. ALG. 15	1.00	
B737. ALG. ALG. 16	1.00	
B737. ALG. ALG. 17	1.00	
B737. ALG. ALG. 22	1.00	
B737. ALG. ALG. 23	1.00	
B737. ALG. ALG. 24	1.00	
B737. ALG. ALG. 25	1.00	
B737. ALG. ALG. 26	1.00	
B737. ALG. ALG. 27	1.00	
B737. ALG. ALG. 28	1.00	
B737. ALG. ALG. 29	1.00	
B737. ALG. ALG. 30	1.00	
B737. ALG. ALG. 31	1.00	
B737. ALG. ALG. 32	1.00	
B737. ALG. ALG. 33	1.00	
B737. ALG. ALG. 34	1.00	
B737. ALG. ALG. 35	1.00	
B737. ALG. ALG. 36	1.00	
B737. ALG. ALG. 37	1.00	
B737. ALG. ALG. 38	1.00	
B737. ALG. ALG. 39	1.00	
B737. ALG. ALG. 46	1.00	
B737. ALG. ALG. 47	1.00	
B737. ALG. ALG. 58	1.00	
B737. ALG. ALG. 59	1.00	
B737. ALG. ALG. 60	1.00	
B737. ALG. ALG. 61	1.00	
B737. ALG. ALG. 62	1.00	
B737. ALG. ALG. 63	1.00	
B737. ALG. ALG. 64	1.00	
B737. ALG. ALG. 65	1.00	
B737. ALG. ALG. 66	1.00	
B737. ALG. ALG. 67	1.00	
B737. ALG. ALG. 68	1.00	
B737. ALG. ALG. 69	1.00	
B737. ALG. ALG. 70	1.00	
B737. ALG. ALG. 71	1.00	
B737. ALG. ALG. 72	1.00	
B737. ALG. ALG. 73	1.00	
B737. ALG. ALG. 74	1.00	
B737. ALG. ALG. 75	1.00	

B737.	ALG.	ALG.	76	1.00
B737.	ALG.	ALG.	77	1.00
B737.	ALG.	ALG.	78	1.00
B737.	ALG.	ALG.	79	1.00
B737.	ALG.	ALG.	86	1.00
B737.	ALG.	ALG.	87	1.00
B737.	ALG.	ALG.	88	1.00
B737.	ALG.	ALG.	96	1.00
B737.	ALG.	ALG.	97	1.00
B737.	ALG.	ALG.	98	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	1	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	2	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	3	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	4	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	5	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	6	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	7	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	8	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	9	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	10	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	11	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	12	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	13	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	14	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	15	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	16	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	17	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	18	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	19	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	20	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	21	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	22	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	23	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	24	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	25	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	26	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	27	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	28	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	29	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	30	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	31	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	68	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	69	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	70	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	71	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	72	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	73	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	74	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	75	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	76	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	77	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	78	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	79	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	80	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	81	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	97	1.00
F27 .	ALG.	ALG.	98	1.00
B727.	ALG.	ORN.	2	1.00
B727.	ALG.	ORN.	13	1.00
B727.	ALG.	ORN.	38	1.00
B727.	ALG.	ORN.	54	1.00
B727.	ALG.	ORN.	74	1.00
B727.	ALG.	ORN.	94	1.00
B737.	ALG.	ORN.	18	1.00

F27 . ALG. ORN. 32	1.00
F27 . ALG. ORN. 82	1.00
F27 . ALG. ORN. 88	1.00
B727. ALG. TLM. 24	1.00
B727. ALG. TLM. 32	1.00
B727. ALG. TLM. 46	1.00
B727. ALG. TLM. 60	1.00
B727. ALG. TLM. 82	1.00
B727. ALG. TLM. 88	1.00
B737. ALG. TLM. 40	1.00
B737. ALG. TLM. 48	1.00
B737. ALG. TLM. 80	1.00
B737. ALG. TLM. 89	1.00
B727. ORN. ALG. 21	1.00
B727. ORN. ALG. 29	1.00
B727. ORN. ALG. 41	1.00
B727. ORN. ALG. 51	1.00
B727. ORN. ALG. 57	1.00
B727. ORN. ALG. 69	1.00
B727. ORN. ALG. 97	1.00
B737. ORN. ALG. 20	1.00
B737. ORN. ALG. 94	1.00
F27 . ORN. ALG. 85	1.00
B727. ORN. ORN. 16	1.00
F27 . ORN. ORN. 43	1.00
F27 . ORN. ORN. 44	1.00
F27 . ORN. ORN. 45	1.00
F27 . ORN. ORN. 46	1.00
F27 . ORN. ORN. 52	1.00
F27 . ORN. ORN. 57	1.00
F27 . ORN. ORN. 58	1.00
F27 . ORN. ORN. 59	1.00
F27 . ORN. ORN. 60	1.00
F27 . ORN. ORN. 61	1.00
B727. ORN. TLM. 5	1.00
B727. ORN. TLM. 17	1.00
B727. ORN. TLM. 65	1.00
B727. ORN. TLM. 77	1.00
B737. ORN. TLM. 53	1.00
F27 . ORN. TLM. 35	1.00
F27 . ORN. TLM. 47	1.00
F27 . ORN. TLM. 53	1.00
F27 . ORN. TLM. 62	1.00
F27 . ORN. TLM. 91	1.00
B727. TLM. ALG. 9	1.00
B727. TLM. ALG. 35	1.00
B727. TLM. ALG. 79	1.00
B727. TLM. ALG. 85	1.00
B727. TLM. ALG. 91	1.00
B737. TLM. ALG. 43	1.00
B737. TLM. ALG. 55	1.00
B737. TLM. ALG. 83	1.00
F27 . TLM. ALG. 65	1.00
F27 . TLM. ALG. 94	1.00
B727. TLM. ORN. 19	1.00
B727. TLM. ORN. 27	1.00
B727. TLM. ORN. 49	1.00
B727. TLM. ORN. 63	1.00
B727. TLM. ORN. 67	1.00
B737. TLM. ORN. 51	1.00
B737. TLM. ORN. 92	1.00
F27 . TLM. ORN. 41	1.00
F27 . TLM. ORN. 50	1.00
F27 . TLM. ORN. 55	1.00

out.put

Jeu Jun 02 14:54:42 1994

4

B727.	TLM.	TLM.	7	1.00	
B727.	TLM.	TLM.	8	1.00	
F27	.	TLM.	TLM.	37	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	38	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	39	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	40	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	49	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	64	1.00
F27	.	TLM.	TLM.	93	1.00

/;

saby

Jeu Jun 02 14:26:55 1994

1

STITLE PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
*Ce probleme est pose dans la compagnie aerienne Air Algerie;

OPTION ITERLIM = 1000000;
OPTION OPTCA = 0;
OPTION OPTCR = 1;
OPTION RESLIM = 5000000;
OPTION SOLPRINT = ON;
OPTION LIMROW = 100;
OPTION LIMCOL = 100;
OPTION SYSOUT = OFF;
OPTION BRATIO = 0.25;

SONSYMXREF
* SOFFSYMXREF
* SOFFSYMLIST
SONSYMLIST
SONUELLIST
* SOFFUELLIST

SCALAR NONO /1000000/;

SCALAR

DS Duree de segment (minutes) / 60 /;

SETS I aeroports d'origines / ALG, ORN, TLM /;
SET K Types des aeronefs / B727, B737, F27 /;
SET M Jours de semaines / 1*8 /;
SET L Creneaux horaires / 1*98/ ;
Alias (I,J);

SET HJ(M,L)

/

1. (1*13)
2. (14*27)
3. (28*41)
4. (42*55)
5. (56*69)
6. (70*83)
7. (84*97)
8. 98

/;

SET BASE(L)

/1, 14, 28, 42, 56, 70, 84, 98/;

PARAMETERS

CO(I,J,K)

Q(K) Capacite maximale de chaque avion / B727 147 , B737 101 , F27 40 /

DESC(K) Duree d'escale par type d'avion / B727 60 , B737 50 , F27 35 /

CVU(K) Cout op unit moyen par minute de vol par type d'avion /B727 173, B737 189, F27 73 /

V(K) Vitesse de croisiere par type d'avion / B727 15, B737 16, F27 8 /

Parameters

LOC(I,K,M), CAC(I,J,K), F(I,J), CE(I,J,K);

TABLE DST(I,J) distances entre deux aeroports

saby Jeu Jun 02 14:26:55 1994 2

	ALG	ORN	TLM
ALG		364	460
ORN	364		102
TLM	460	102	;

TABLE DEC(I,K) Duree de decollage de l'avion K a partir de l'aeroport I

	B727	B737	F27
ALG	17	22	30
ORN	17	22	30
TLM	17	22	30;

TABLE HL(J,K) Cout d'atterrissage et soutien logistique a l'aeroport J par avion k

* En attendant mieux, mettons des valeurs quelconques !

	B727	B737	F27
ALG	11.78	11.88	12.05
ORN	11.78	11.88	12.05
TLM	11.78	11.88	12.05;

TABLE PARK(I,K) Cout du parking a l'aeroport I par avion K

* En attendant mieux, mettons des valeurs quelconques !

	B727	B737	F27
ALG	3	2	1
ORN	3	2	1
TLM	3	2	1 ;

* TABLE D(I,J) Demande de l'origine I a la destination J par semaine

* En attendant mieux, mettons des valeurs quelconques !

*		ALG	ORN	TLM
*				
*	ALG		1500	1150
*	ORN	1500		1100
*	TLM	1240	1100	;

SCALAR CD /10/;

PARAMETER D(I,J) demande;

D(I,J)\$ (ORD(I) NE ORD(J)) = CD * UNIFORM(50,100);

TABLE APP(J,K) Duree d'approche de l'avion K a l'aeroport J

	B727	B737	F27
ALG	10	10	15
ORN	10	10	15
TLM	10	10	15;

TABLE TAXI1(I,K) Duree taxi de l'avion K a son depart de l'aeroport I

saby Jeu Jun 02 14:26:55 1994 3

	B727	B737	F27
ALG	10	10	10
ORN	10	10	10
TLM	10	10	10;

TABLE TAXI2(J,K) Duree taxi de l'avion K a son arrivee a l'aeroport J

	B727	B737	F27
ALG	5	5	5
ORN	5	5	5
TLM	5	5	5;

TABLE TSV(I,J,K) Taxe de survol entre deux aeroports par l'avion K
* En attendant mieux, mettons des valeurs quelconques !

	B727	B737	F27
ALG.ORN	7.57	7.64	7.74
ALG.TLM	7.57	7.64	7.74
ORN.TLM	7.57	7.64	7.74
ORN.ALG	7.57	7.64	7.74
TLM.ALG	7.57	7.64	7.74
TLM.ORN	7.57	7.64	7.74;

TABLE CR(I,J,K) Coefficient de remplissage de l'avion K par ligne

	B727	B737	F27
ALG.ORN	.75	.7	.8
ALG.TLM	.75	.7	.8
ORN.TLM	.75	.7	.8
ORN.ALG	.75	.7	.8
TLM.ALG	.75	.7	.8
TLM.ORN	.75	.7	.8

* En attendant mieux, mettons des valeurs quelconques !

* CR(I,J,K) = 100;

* En attendant les vraies valeurs de LOC, mettons n'importe quoi.
LOC("ALG",K,M) = 1;

CAC(I,J,K)\$(ORD(I) NE ORD(J)) = DST(I,J)/V(K) + TAXI1(I,K)+DEC(I,K)+APP(J,K)+TAXI2(J);

CAC(I,I,K) = DS-1;

PARAMETER CACS(I,J,K) DUREE CAC EN SEGMENTS;
CACS(I,J,K) = CEIL((DESC(K) + CAC(I,J,K))/DS);
CACS(I,I,K) = CEIL(CAC(I,I,K)/DS);

PARAMETER REPCACS(K,I,M) DERNIER DELAIS DE REPOS;
REPCACS(K,I,M) = SUM(J\$LOC(J,K,M), CACS(I,J,K));

PARAMETER COSUPP(I,J,K,L);
COSUPP(I,J,K,L) = 1;
COSUPP(I,J,K,L)\$(BASE(L)\$(SUM(M\$HJ(M,L), LOC(I,K,M)+LOC(J,K,M)) ne 2)) = NONO;

CE(I,J,K) = Q(K)*CR(I,J,K);
CO(I,J,K)\$(ORD(i) ne ORD(j)) = (CVU(K)*CAC(I,J,K)+HL(J,K)+TSV(I,J,K));

```

CO(I,I,K) = PARK(I,K);
Display CR, CE, CO, CAC, DST;
DISPLAY COSUPP;

```

VARIABLES

```

Z
X(I,J,K,L) Variable binaire Z fonction objectif;

Binary Variable X;

X.FX("ALG", "ALG", K, "1")=1;

```

EQUATIONS

```

COST                Fonction Objectif

CONFLUX(I,K,L)      Conservation du flux
MONOAFF1(I,K,L)     Disponibilite des avions
MONOAFF2(I,K,L)     Disponibilite des avions
DEMANDE(I,J)
* VOLJ1(K)
* VOLJ(K,M)
* VOLJ8(K)
;

* FONCTION OBJECTIF
COST .. Z =E= SUM((I,J,K,L), CO(I,J,K)*X(I,J,K,L)*COSUPP(I,J,K,L));

DEMANDE(I,J)$ (ORD(I) NE ORD(J)).. D(I,J) =L= SUM((K,L)$ (NOT(BASE(L))), (X(I,J,K,L)*CE(I,K)));

* CONSERVATION DU FLUX
CONFLUX(I,K,L)$ (ORD(L) GT 1)..
SUM(J, X(I,J,K,L))
=E=
SUM(J, X(J,I,K,L-CACS(J,I,K)));

MONOAFF1(I,K,L).. SUM(J, X(I,J,K,L)) =L= 1;
MONOAFF2(I,K,L).. SUM(J, X(J,I,K,L)) =L= 1;

* VOLJ1(K).. SUM((I,J,L)$HJ("1",L), X(I,J,K,L)*CACS(I,J,K)) =L= 14;
* VOLJ(K,M)$ ((ORD(M) GT 1)$ (ORD(M) LT 8)).. SUM((I,J,L)$HJ(M,L), X(I,J,K,L)*CACS(I,J,K))
L= 13;
* VOLJ8(K).. SUM((I,J,L)$HJ("8",L), X(I,J,K,L)*CACS(I,J,K)) =L= 1;
MODEL FS /ALL/;
FS.OPTFILE=1;
FS.WORKSPACE = 20;
SOLVE FS USING MIP MINIMIZING Z;

OPTION X:0:0:1; Display X.L;
PARAMETER AC(k,l,i,j);
AC(k,l,i,j) = X.L(i,j,k,l);
OPTION AC:0:0:1; DISPLAY AC;

F(I,J) = SUM((K,L), X.L(I,J,K,L));
Display F;
$INCLUDE out.dat

```

```

231
232
233 * VOLJ1(K).. SUM((I,J,L)$HJ("1",L), X(I,J,K,L)*CACS(I,J,K)) =L= 14;
234 * VOLJ(K,M)$((ORD(M) GT 1)$ (ORD(M) LT 8)).. SUM((I,J,L)$HJ(M,L), X(I,J,K,
L)*CACS(I,J,K)) =L= 13;
235 * VOLJ8(K).. SUM((I,J,L)$HJ("8",L), X(I,J,K,L)*CACS(I,J,K)) =L= 1;
236 MODEL FS /ALL/;
237 FS.OPTFILE=1;

```

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 5
PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES

```

238 FS.WORKSPACE = 20;
239 SOLVE FS USING MIP MINIMIZING Z;
240
241 OPTION X:0:0:1; Display X.L;
242 PARAMETER AC(k,l,i,j);
243 AC(k,l,i,j) = X.L(i,j,k,l);
244 OPTION AC:0:0:1; DISPLAY AC;
245
246 F(I,J) = SUM((K,L), X.L(I,J,K,L));
247 Display F;

```

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 6
PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES

Symbol Listing

SYMBOL	TYPE	REFERENCES					
AC	PARAM	ASSIGNED	243	REF	242	2*244	
APP	PARAM	DEFINED	117	REF	117	175	
BASE	SET	DEFINED	47	REF	46	187	221
CAC	PARAM	ASSIGNED	175	176	REF	60	179
			180	190			
CACS	PARAM	ASSIGNED	179	180	REF	178	183
			227				
CD	PARAM	DEFINED	111	REF	111	114	
CE	PARAM	ASSIGNED	189	REF	60	192	221
CEIL	FUNCT	REF	179	180			
CO	PARAM	ASSIGNED	190	191	REF	51	192
			218				
CONFLUX	EQU	DEFINED	225	IMPL-ASN	239	REF	208
			236				
COST	EQU	DEFINED	218	IMPL-ASN	239	REF	206
			236				
COSUPP	PARAM	ASSIGNED	186	187	REF	185	193
			218				
CR	PARAM	DEFINED	157	REF	157	189	192
CVU	PARAM	DEFINED	54	REF	54	190	
D	PARAM	ASSIGNED	114	REF	113	221	
DEC	PARAM	DEFINED	70	REF	70	175	
DEMANDE	EQU	DEFINED	221	IMPL-ASN	239	REF	211
			236				
DESC	PARAM	DEFINED	53	REF	53	179	
DS	PARAM	DEFINED	26	REF	26	176	179
			180				
DST	PARAM	DEFINED	62	REF	62	175	192
F	PARAM	ASSIGNED	246	REF	60	247	
FS	MODEL	DEFINED	236	IMPL-ASN	239	ASSIGNED	237
			238	REF	236	239	
HJ	SET	DEFINED	35	REF	34	187	
HL	PARAM	DEFINED	79	REF	79	190	
I	SET	DEFINED	28	REF	28	32	51

		4*60	62	70	90	113	114
		126	144	157	4*175	176	178
		179	3*180	182	183	185	187
		189	3*190	2*191	197	208	209
		210	211	3*218	4*221	225	2*227
		229	230	242	243	246	
		CONTROL	114	175	176	179	180
		183	186	187	189	190	191
		218	221	224	229	230	243
		246					
J	SET	DECLARED	32	REF	51	3*60	62
		79	113	114	117	135	144
		157	4*175	178	179	2*183	185
		187	189	4*190	197	211	3*218
		4*221	225	2*227	229	230	242
		243	246	CONTROL	114	175	179
		183	186	187	189	190	218
		221	225	227	229	230	243
		246					
K	SET	DEFINED	29	REF	29	51	52
		53	54	55	3*60	70	79
		90	117	126	135	144	157
		5*175	178	2*179	180	182	2*183
		185	2*187	2*189	4*190	191	197
		208	209	210	3*218	2*221	225

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 7
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 Symbol Listing

SYMBOL	TYPE	REFERENCES					
		2*227	229	230	242	243	246
		CONTROL	173	175	176	179	180
		183	186	187	189	190	191
		201	218	221	224	229	230
		243	246				
L	SET	DEFINED	31	REF	31	34	46
		185	2*187	197	208	209	210
		2*218	2*221	224	225	227	229
		230	242	243	246	CONTROL	186
		187	218	221	224	229	230
		243	246				
LOC	PARAM	ASSIGNED	173	REF	60	183	2*187
M	SET	DEFINED	30	REF	30	34	60
		182	183	3*187	CONTROL	173	183
		187					
MONOAF1	EQU	DEFINED	229	IMPL-ASN	239	REF	209
		236					
MONOAF2	EQU	DEFINED	230	IMPL-ASN	239	REF	210
		236					
NONO	PARAM	DEFINED	23	REF	23	187	
PARK	PARAM	DEFINED	90	REF	90	191	
Q	PARAM	DEFINED	52	REF	52	189	
REPCACS	PARAM	ASSIGNED	183	REF	182		
TAXI1	PARAM	DEFINED	126	REF	126	175	
TAXI2	PARAM	DEFINED	135	REF	135	175	
TSV	PARAM	DEFINED	144	REF	144	190	
UNIFORM	FUNCT	REF	114				
V	PARAM	DEFINED	55	REF	55	175	
X	VAR	DECLARED	199	IMPL-ASN	239	ASSIGNED	201
		REF	197	218	221	225	227
		229	230	2*241	243	246	
Z	VAR	IMPL-ASN	239	REF	196	218	239

FUNCTIONS

ABS
ARCTAN
CEIL
COS
ERRORF
EXECERROR
EXP
FLOOR
GDAY
GDOW
G_HOUR
GLEAP
GMINUTE
GMONTH
GSECOND
GYEAR
JDATE
JNOW
JSTART
JTIME
LOG
LOG10
MAPVAL

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

8

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIEENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES

Symbol Listing

FUNCTIONS

MAX
MIN
MOD
NORMAL
POWER
ROUND
SIGN
SIN
SQRT
TRUNC
UNIFORM

SETS

BASE

HJ
I aeroports d'origines
J Aliased with I
K Types des aeronefs
L Creneaux horaires
M Jours de semaines

PARAMETERS

AC
APP Duree d'approche de l'avion K a l'aeroport J
CAC

ml.lst Jeu Jun 02 11:13:45 1994 10

ORN.ALG	110.250	70.700	32.000
ORN.TLM	110.250	70.700	32.000
TLM.ALG	110.250	70.700	32.000
TLM.ORN	110.250	70.700	32.000

---- 192 PARAMETER CO

	B727	B737	F27
ALG.ALG	3.000	2.000	1.000
ALG.ORN	11475.133	13192.750	7708.500
ALG.TLM	12582.333	14326.750	8584.500
ORN.ALG	11475.133	13192.750	7708.500
ORN.ORN	3.000	2.000	1.000
ORN.TLM	8453.400	10097.875	5317.750
TLM.ALG	12582.333	14326.750	8584.500
TLM.ORN	8453.400	10097.875	5317.750
TLM.TLM	3.000	2.000	1.000

---- 192 PARAMETER CAC

	B727	B737	F27
ALG.ALG	59.000	59.000	59.000
ALG.ORN	66.267	69.750	105.500
ALG.TLM	72.667	75.750	117.500
ORN.ALG	66.267	69.750	105.500
ORN.ORN	59.000	59.000	59.000
ORN.TLM	48.800	53.375	72.750
TLM.ALG	72.667	75.750	117.500
TLM.ORN	48.800	53.375	72.750
TLM.TLM	59.000	59.000	59.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

12

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

---- 192 PARAMETER DST distances entre deux aeroports

	ALG	ORN	TLM
ALG		364.000	460.000
ORN	364.000		102.000
TLM	460.000	102.000	

---- 193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ALG

	1	2	3	4	5
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ml.lst

Jeu Jun 02 11:13:45 1994

11

	6	7	8	9	10
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	11	12	13	14	15
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000

	16	17	18	19	20
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 13
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ALG

	21	22	23	24	25
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	26	27	28	29	30
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000

TLM.B727	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000

+ 31 32 33 34 35

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 36 37 38 39 40

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 41 42 43 44 45

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 14
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIEENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ALG

+ 41 42 43 44 45

TLM.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000

+ 46 47 48 49 50

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 51 52 53 54 55

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 56 57 58 59 60

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 61 62 63 64 65

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 15
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ALG

+ 66 67 68 69 70

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000

+ 71 72 73 74 75

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
+	76	77	78	79	80

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
+	81	82	83	84	85

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
+	86	87	88	89	90

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 16
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ALG

+	86	87	88	89	90
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
+	91	92	93	94	95

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	96	97	98
---	----	----	----

mi.lst

Jeu Jun 02 11:13:45 1994

15

ALG.B727	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B737	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1000000.000

INDEX 1 = ORN

	1	2	3	4	5
ALG.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	6	7	8	9	10
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

17

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ORN

+	11	12	13	14	15
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000

+	16	17	18	19	20
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

 + 21 22 23 24 25

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

 + 26 27 28 29 30

ALG.B727	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1000000.000	1.000	1.000

 + 31 32 33 34 35

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 18
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ORN

 + 31 32 33 34 35

TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

 + 36 37 38 39 40

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

 + 41 42 43 44 45

ALG.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000

+ 46 47 48 49 50

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 51 52 53 54 55

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

19

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ORN

+ 56 57 58 59 60

ALG.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 61 62 63 64 65

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ml.lst

Jeu Jun 02 11:13:45 1994

18

TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	66	67	68	69	70
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000

+	71	72	73	74	75
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	76	77	78	79	80
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 20
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIEENNE AVEC DES FENETRES HORAIREES
 Execution

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = ORN

+	76	77	78	79	80
---	----	----	----	----	----

TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	81	82	83	84	85
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000

+	86	87	88	89	90
---	----	----	----	----	----

mi.lst

Jeu Jun 02 11:13:45 1994

19

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	91	92	93	94	95
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	96	97	98
---	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1000000.000
ALG.B737	1.000	1.000	1000000.000
ALG.F27	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B727	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B737	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1000000.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

21

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = TLM

	1	2	3	4	5
ALG.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

```

ml.lst      Jeu J in 02 11:13:45 1994      20

TLM.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
+           11           12           13           14           15

ALG.B727     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
ALG.B737     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
ALG.F27      1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
ORN.B727     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
ORN.B737     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
ORN.F27      1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
TLM.B727     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
TLM.B737     1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
TLM.F27      1.000      1.000      1.000 1000000.000      1.000
+           16           17           18           19           20

ALG.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ALG.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ALG.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
TLM.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
TLM.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
TLM.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
+           21           22           23           24           25

ALG.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ALG.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ALG.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
ORN.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
TLM.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P                06/02/94 10:48:07 PAGE      22
PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIEENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

```

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = TLM

```

+           21           22           23           24           25

TLM.B737     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
TLM.F27      1.000      1.000      1.000      1.000      1.000
+           26           27           28           29           30

ALG.B727     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
ALG.B737     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
ALG.F27      1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
ORN.B727     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
ORN.B737     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
ORN.F27      1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
TLM.B727     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
TLM.B737     1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
TLM.F27      1.000      1.000 1000000.000      1.000      1.000
+           31           32           33           34           35

ALG.B727     1.000      1.000      1.000      1.000      1.000

```

ml.lst

Jeu Jun 02 11:13:45 1994

21

ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	36	37	38	39	40
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	41	42	43	44	45
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1000000.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

23

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = TLM

+	46	47	48	49	50
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+	51	52	53	54	55
---	----	----	----	----	----

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	56	57	58	59	60
ALG.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1000000.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	61	62	63	64	65
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	66	67	68	69	70
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P

06/02/94 10:48:07 PAGE

24

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = TLM

	66	67	68	69	70
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1000000.000

	71	72	73	74	75
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

	76	77	78	79	80
ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 81 82 83 84 85

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1000000.000	1.000

+ 86 87 88 89 90

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

GAMS 2.25.064 AIX RS/6000P 06/02/94 10:48:07 PAGE 25
 PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIEENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
 E x e c u t i o n

193 PARAMETER COSUPP

INDEX 1 = TLM

+ 91 92 93 94 95

ALG.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ALG.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
ORN.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B727	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.B737	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
TLM.F27	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

+ 96 97 98

ALG.B727	1.000	1.000	1000000.000
ALG.B737	1.000	1.000	1000000.000
ALG.F27	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B727	1.000	1.000	1000000.000
ORN.B737	1.000	1.000	1000000.000
ORN.F27	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B727	1.000	1.000	1000000.000
TLM.B737	1.000	1.000	1000000.000
TLM.F27	1.000	1.000	1000000.000

PROBLEME D'OPTIMISATION DE LA FLOTTE AERIENNE AVEC DES FENETRES HORAIRES
Equation Listing SOLVE FS USING MIP FROM LINE 239

---- COST =E= Fonction Objectif

COST.. Z - 3*X(ALG,ALG,B727,1) - 3*X(ALG,ALG,B727,2) - 3*X(ALG,ALG,B727,3)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,4) - 3*X(ALG,ALG,B727,5) - 3*X(ALG,ALG,B727,6)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,7) - 3*X(ALG,ALG,B727,8) - 3*X(ALG,ALG,B727,9)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,10) - 3*X(ALG,ALG,B727,11) - 3*X(ALG,ALG,B727,12)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,13) - 3*X(ALG,ALG,B727,14) - 3*X(ALG,ALG,B727,15)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,16) - 3*X(ALG,ALG,B727,17) - 3*X(ALG,ALG,B727,18)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,19) - 3*X(ALG,ALG,B727,20) - 3*X(ALG,ALG,B727,21)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,22) - 3*X(ALG,ALG,B727,23) - 3*X(ALG,ALG,B727,24)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,25) - 3*X(ALG,ALG,B727,26) - 3*X(ALG,ALG,B727,27)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,28) - 3*X(ALG,ALG,B727,29) - 3*X(ALG,ALG,B727,30)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,31) - 3*X(ALG,ALG,B727,32) - 3*X(ALG,ALG,B727,33)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,34) - 3*X(ALG,ALG,B727,35) - 3*X(ALG,ALG,B727,36)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,37) - 3*X(ALG,ALG,B727,38) - 3*X(ALG,ALG,B727,39)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,40) - 3*X(ALG,ALG,B727,41) - 3*X(ALG,ALG,B727,42)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,43) - 3*X(ALG,ALG,B727,44) - 3*X(ALG,ALG,B727,45)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,46) - 3*X(ALG,ALG,B727,47) - 3*X(ALG,ALG,B727,48)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,49) - 3*X(ALG,ALG,B727,50) - 3*X(ALG,ALG,B727,51)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,52) - 3*X(ALG,ALG,B727,53) - 3*X(ALG,ALG,B727,54)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,55) - 3*X(ALG,ALG,B727,56) - 3*X(ALG,ALG,B727,57)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,58) - 3*X(ALG,ALG,B727,59) - 3*X(ALG,ALG,B727,60)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,61) - 3*X(ALG,ALG,B727,62) - 3*X(ALG,ALG,B727,63)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,64) - 3*X(ALG,ALG,B727,65) - 3*X(ALG,ALG,B727,66)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,67) - 3*X(ALG,ALG,B727,68) - 3*X(ALG,ALG,B727,69)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,70) - 3*X(ALG,ALG,B727,71) - 3*X(ALG,ALG,B727,72)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,73) - 3*X(ALG,ALG,B727,74) - 3*X(ALG,ALG,B727,75)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,76) - 3*X(ALG,ALG,B727,77) - 3*X(ALG,ALG,B727,78)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,79) - 3*X(ALG,ALG,B727,80) - 3*X(ALG,ALG,B727,81)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,82) - 3*X(ALG,ALG,B727,83) - 3*X(ALG,ALG,B727,84)
 - 3*X(ALG,ALG,B727,85) - 3*X(ALG,ALG,B727,86) - 3*X(ALG,ALG,B727,87)