

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

13/95

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Génie Industriel

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

OPTIMISATION DES ROTATIONS

D'EQUIPAGES D' AVIONS

Cas Pratique : Air Algérie

Proposé par :

Mr : BETKA
Mr : CHEBLAINE

Etudié par :

M^{lle} M.ZEBAIER
Mr S.GHEZALI

Dirigé par :

M^{me} BELMOKHTAR
M^{lle} TALI-MAAMAR

PROMOTION

1995

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT **Génie Industriel**

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

OPTIMISATION DES ROTATIONS

D'EQUIPAGES D' AVIONS

Cas Pratique : Air Algérie

Proposé par :

Mr : BETKA
Mr : CHEBLAINE

Etudié par :

M^{lle} M.ZEBAIER
Mr S.GHEZALI

Dirigé par :

M^{me} BELMOKHTAR
M^{lle} TALI-MAAMAR

PROMOTION

1995

Résumé

L'objectif de l'étude est l'élaboration d'un modèle mathématique optimisant les rotations d'équipages d'avions, qui consiste en la construction de séquences de segments de vols, afin de réduire le coût du personnel navigant d'AIR ALGERIE.

Abstract

The aim of the present work is the elaboration of a mathematical model optimizing flight crew schedules, that involves the construction of sequences of flight segments which are called pairings or rotations, to reduce the costs of the flying personnel at the company Air Algérie.

DEDICACES



A TOUS CEUX QU'ON AIME.
EN PARTICULIER A NOS
TRES CHERS PARENTS.



MALYA et SOFIANE.

REMERCIEMENTS

الطبعة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidé de loin ou de près, et ont contribué à ce que ce travail aboutisse, qu'ils soient de l'Ecole Nationale Polytechnique, AIR ALGERIE et autres.

*Nous remercions particulièrement Madame **Belmokhtar** et Mademoiselle **Tali-Maamar** d'avoir accepté de diriger ce travail, et de nous avoir suivi et aidé tout le long de la durée du projet de fin d'études.*

Nos remerciements s'adressent aussi :

*à notre chef de département, Mademoiselle **Aboun** ainsi qu'à Monsieur **Sari**, Monsieur **Lamraoui**, Monsieur **Mekarnia** et à tous les enseignants du départements qui ont contribué à notre formation.*

*à l'équipe de la direction des opérations Messieurs **Betka**, **Cheblaine**, **Mahdi**, **Masaad** et **Hafid**, et des autres directions d'AIR ALGERIE, Mademoiselle **Hammo**, Madame **Chekkour** et **Hakim**, et à Monsieur **Abdoun** 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.*

LISTE DES FIGURES

Figure H.1 . Evolution de l'effectif du personnel navigant

Figure H.2 . Evolution du trafic passagers

Figure H.3 . Evolution des heures de vol

Figure H.4 . Evolution du ratio nombre de passagers par heure de vol

Figure C.1 . Coûts directement liés à l'avion et au vol. Réseau domestique

Figure C.2 . Coûts directement liés à l'avion et au vol. Réseau international

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 . Grades et fonctions du personnel navigant technique

Tableau 2 . Grades et fonctions du personnel navigants commercial

Tableau 3 . Répartition de l'effectif de la direction des opérations aériennes

Tableau 4 . Répartition de l'effectif du personnel navigant commercial

Tableau 5 . Répartition de l'effectif du personnel navigant technique

Tableau 6 . Frais du personnel navigant (par heure)

Tableau 7 . Frais carburant de la flotte

Tableau 8 . Frais d'entretien d'avions (par heure)

Tableau 9 . Coût de revient de la formation du personnel navigant technique

Tableau 10 . Coût de revient de la formation du personnel navigant commercial

PLAN

Préambule	1
-----------------	---

PREMIERE PARTIE : DIAGNOSTIC.

Diagnostic	2
Intoduction	3
1. Diagnostic	5
1.1 Corps personnel navigant.....	5
1.1.1 Personnel navigant technique.....	5
1.1.2 Personnel navigant commercial.....	5
1.2 Classification de la flotte.....	6
1.3 Présentation de la Direction des Opérations Aériennes.....	6
1.4 Gestion des ressources humaines.....	7
1.4.1 Sous-direction personnel navigant commercial.....	7
1.4.1.1 Activités techniques et administratives.....	7
1.4.1.2 Formation personnel navigant Commercial.....	8
1.4.1.3 Organisation et fonction du PNC.....	8
1.4.2 Sous-direction personnel navigant technique.....	9
1.4.2.1 Activités techniques et administratives.....	9
1.4.2.2 Organisation interne et poste de travail.....	10
1.4.3 Sous-direction formation personnel navigant technique.....	11
1.4.3.1 Centre de simulation de vol.....	11
1.5 Activités techniques et opérationnelles.....	11
1.5.1 Introduction.....	11
1.5.2 Sous-direction études et exploitation.....	12
1.5.2.1 Département navigation.....	12
1.5.2.2 Département traitement exploitation.....	12
1.5.2.3 Département réglementation et information vols.....	12
1.5.3 Sous-direction programmes et surveillances des vols.....	12
1.5.3.1 Ramassage personnel navigant.....	12
1.5.3.2 Programmation flotte et personnel navigant.....	13
1.5.3.3 Surveillance des vols.....	14
1.5.3.4 Cellule supervision équipages.....	14
1.5.3.5 Cellule A.I.M.S.....	14
1.6 Gestion administrative et financière.....	14
1.6.1 Sous-direction administrative et financière.....	14
1.6.1.1 Département administratif.....	14
1.6.1.2 Département carburant.....	15
1.6.1.3 Département économique.....	15
1.7 Classification des coûts.....	15
1.7.1 Introduction.....	15
1.7.2 Coût d'exploitation.....	15
1.7.2.1 Frais personnel navigant.....	16

Deuxième partie:	43
3.2 Programmation individuelle du personnel navigant.....	
3.2.1 Bidline système.....	43
3.2.2 Approche par partitionnement.....	46
4. Conclusion.....	48

TROISIEME PARTIE : MODELISATION.

Modélisation.....	49
Introduction	50
1. Hypothèses du modèle.....	51
1.1 Secteurs.....	51
1.2 Programme de vol	51
1.3 Réglementation.....	52
1.4 Fonction coût.....	52
2. Paramètres du modèle.....	52
2.1 Paramètres liés à la réglementation.....	53
2.1.1 Segment de vol.....	53
2.1.2 Service de vol.....	53
2.1.3 Période de vol.....	53
2.1.4 Période de service de vol.....	53
2.1.5 Rotation.....	54
2.2 Paramètres du coût.....	54
2.3 Période d'optimisation.....	54
3. Variables du modèle.....	55
3.1 Objectif.....	55
3.2 Variables de décision.....	55
4. Fonction objectif.....	55
5. Contraintes du modèle.....	55
5.1 Contraintes de recouvrement.....	56
5.2 Contraintes de base.....	56
5.3 Contraintes de réglementation	57

QUATRIEME PARTIE : VALIDATION.

Validation.....	59
1. Approche utilisée.....	60
2. Langage de programmation.....	60
3. Système informatique.....	63
4. Données.....	63
5. Interprétation.....	64

CINQUIEME PARTIE : CONCLUSION

Conclusion	65
1. L'apport pratique.....	66
2. Recherche future.....	66
2.1 Application plus étendue du modèle.....	66
2.2 Utilisation de nouveaux solvers.....	67
2.3 Adaptation aux autres domaines.....	67

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

ANNEXES

Annexe A

Figure P1. Profil de carrière du personnel navigant commercial

Figure P2. Profil de carrière du personnel navigant technique

Organigramme de la direction des opérations aériennes

Flight crew productivity

Annexe B

Complément sur l'état de l'art

Annexe C

Listing du programme et des résultats obtenus sur GAMS

PREAMBULE

La programmation du personnel navigant d'une compagnie aérienne exige une grande et minutieuse organisation, difficile à réaliser intégralement.

Depuis ces dernières années, la compagnie aérienne Air Algérie a rencontré des problèmes dans la gestion du personnel navigant, et s'est intéressée de plus près au problème de programmation d'équipages, dans le but de réduire les frais du personnel navigant, par conséquent une meilleure productivité de ce dernier.

L'objectif de notre travail est de présenter une nouvelle forme de gestion de la programmation d'équipages, pour une réelle maîtrise et une meilleure gestion du processus de programmation d'équipages, afin d'alléger le coût du personnel navigant qui est une des préoccupations premières d'Air Algérie.

Notre démarche pour la réalisation de notre objectif s'est étalée sur quatre parties :

- La première partie consiste à une connaissance claire de la réalité, car la théorie et les expériences ne servent à rien tant qu'elles ne sont pas justifiées par la réalité, c'est pour cela qu'on a essayé d'établir un diagnostic de la situation actuelle du personnel navigant, à travers l'étude de son environnement et du système qui le régit, ce qui nous a permis de déceler plusieurs problèmes et de définir une problématique de base.
- La seconde partie est consacrée à l'état de l'art, où on a essayé d'enrichir le plus possible notre documentation en la matière, afin de :
 - Etudier les plus importantes méthodes utilisées pour la résolution du problème de programmation d'équipages d'avions.
 - D'avoir un large éventail de techniques utilisées par d'autres compagnies aériennes pour la résolution de cas réel.

L'état de l'art, nous a permis de mieux comprendre le problème (comprendre surtout le processus de programmation d'équipages d'avions) et de pouvoir lui donner une nouvelle définition : le problème de programmation d'équipages d'avions consiste en fait en la résolution en série de deux problèmes, dont le premier est la programmation des rotations d'équipages d'avions, et le second la programmation individuelle de membres d'équipages d'avions.

- La troisième partie est consacrée à la présentation d'une méthodologie d'approche permettant l'élaboration d'un modèle mathématique afin d'optimiser les rotations d'équipages d'avions.
- Dans la quatrième partie nous présentons les exemples numériques résultant de l'application du modèle.

Enfin, la cinquième partie représente notre conclusion générale.

PREMIERE PARTIE

Diagnostic

Le diagnostic et l'analyse d'un système correspond en général à une véritable nécessité, quand celui-ci est en difficulté pour pouvoir identifier les origines de ces dysfonctionnements, et définir des mesures adaptées de redressement susceptibles d'améliorer la situation, ou bien que le système soit en bonne santé pour répondre à une volonté d'amélioration des performances. C'est pour cela qu'on entreprend dans cette partie d'analyser en toute objectivité le problème tel qu'il a été proposé par Air Algérie.

INTRODUCTION :

La compagnie aérienne AIR ALGERIE a été créée en 1947. Son objectif était d'assurer principalement les liaisons entre la France et des villes d'Afrique du nord.

Après l'indépendance, en février 1963, l'état Algérien participait à concurrence de 51% dans le capital social de l'entreprise. Cette part passa à 100 % le 12 décembre 1972, date à laquelle fut parachevée la souveraineté de l'état sur la société après le rachat auprès d'AIR FRANCE des dernières actions détenues par cette compagnie.

Elle s'est vue confiée, dès lors, la mission du transport aérien : Passagers, fret et messageries sur les lignes locales et internationales.

A cet effet, la compagnie possède :

- Un réseau commercial constitué d'agences réparties à travers le pays et le reste du monde.
- Une flotte aérienne :
 - 02 Hercule LC 100-30.
 - 07 Fokkers 27.
 - 11 Boeing 727.
 - 15 Boeing 737.
 - 03 Boeing 767.
 - 02 Airbus 310 .

La compagnie occupe une place importante dans l'économie du pays. Elle permet entre autres de :

- Favoriser la mobilité sociale à travers le territoire national.
- Assurer la présence du pays le long du réseau international.
- Assister l'agriculture et stimuler le développement des différents secteurs d'activité.
- Développer des échanges économiques et culturels avec d'autres pays.

Actuellement, 28 aérodromes sont ouverts à la circulation aérienne :

- 11 de classe internationale :

Alger, Annaba, Constantine, Oran, Ghardaïa, Tlemcen, Hassi-Messaoud, Tamanrasset, Ouargla, Bechar, et Adrar.

- 17 aérodromes nationaux :

Béchar, Béjaïa, Biskra, Bordj Badji Mokhtar, In Guessam, In Salah, Jijel, Tindouf, Timimoun, Touggourt, Tiaret, Djanet, El Oued, El Goléa, Tebessa, Mascara, et Illizi.

Le réseau d'AIR ALGERIE dessert 75 escales à l'intérieur du pays, en Europe, en Afrique, au moyen Orient et au Maghreb, s'étalant sur une longueur de 80000 Km, avec une moyenne de 60 vols par jour.

La réalisation et l'exécution de ces différents vols nécessite un personnel navigant qui a pour mission principale d'assurer les liaisons aériennes, et un personnel au sol s'occupant

de l'encadrement et de la logistique comprenant la programmation et la surveillance des vols. Tout ce personnel est géré par une des directions de la compagnie : la Direction des Opérations Aériennes (DOA) où il nous a été proposé de résoudre le problème de programmation du personnel navigant.

La programmation du personnel navigant débute à la reception des programmes de vol saisonniers élaborés par la direction commerciale d'AIR ALGERIE à partir d'états statistiques qu'elle établit après l'étude de la demande, se basant sur des données récoltées auprès de ses agences.

La Direction des Opérations Aériennes transforme ces programmes commerciaux en des programmes d'exploitation en répartissant les différents vols entre le personnel navigant ainsi que sa flotte.

Les procédures de gestion scientifiques efficaces du personnel navigant demeurent pratiquement inexistantes ; cela entraîne des perturbations et la baisse de performances des capacités de traitement. La mise en place d'autres méthodes plus rationnelles de travail s'impose. Une nouvelle réorganisation est nécessaire pour une meilleure gestion du personnel navigant.

La direction des Opérations Aériennes nous a proposé d'élaborer un modèle de programmation des horaires d'équipages d'avions, avec une utilisation optimale à moindre coût du personnel navigant.

Pour la réalisation et l'aboutissement de notre travail nous nous sommes rapprochés de la direction des opérations aériennes pour mieux comprendre et analyser l'environnement du personnel navigant.

1. DIAGNOSTIC DE LA DIRECTION DES OPERATIONS AERIENNES :

1.1 Corps Personnel Navigant : (PN)

Le corps personnel navigant rassemble deux grandes parties : Une première partie assurant le traitement en vol des passagers, et la seconde de les conduire à destination. Elles se distinguent par les dénominations et fonctions suivantes :

1.1.1 Personnel Navigant Technique : (PNT)

C'est le personnel qui se trouve dans la cabine de pilotage de l'avion pour assurer la conduite de celui-ci et l'arrivée à destination. Il compte les commandants de bord (CDB), les co-pilotes, les officiers mécaniciens et les radios navigants qui sont à la disposition de la compagnie.

Les grades se répartissent comme le montre le tableau suivant :

TAB.1 : GRADES ET FONCTIONS DU PNT.

TYPE D'APPAREIL	FOKKER 27	BOEING 737	BOEING 727	AIRBUS 310	BOEING 767
GRADE	CDB	CDB	CDB	CDB	CDB
	Co-pilote	Co-pilote	Co-pilote	Co-pilote	Co-pilote
	-	-	Off.mécanic	-	-
	-	-	Off.Radio	-	-

Source: Direction des Opérations Aériennes.

1.1.2 Personnel Navigant Commercial : (PNC)

Il représente le personnel complémentaire de bord ; formé essentiellement pour rendre agréable le séjour à bord de tout passager et lui procurer un maximum de confort . Les différents grades sont représentés dans le tableau ci-dessous:

TAB.2 : GRADES ET FONCTIONS DU PNC.

GRADE	Hotesse Steward	Chef de cabine	Chef de cabine principal
TYPE D'APPAREIL	F27	-	-
	B737	B737	-
	B727	B727	-
	A310	A310	A310
	B767	B767	B767

Source: Direction des Opérations Aériennes.

Mis à part dans le transport des passagers, le personnel navigant technique effectue sa mission sans assistance du personnel navigant commercial, autrement dit pour le transport : fret et messagerie, le personnel navigant technique opère tout seul.

1.2 Classification de la flotte :

La compagnie répartit sa flotte en 04 secteurs : [A, B, C, D] qui regroupent les aéronefs présentant une forte similitude et nécessitant une même capacité et aptitude de conduite.

Les différentes caractéristiques avions prises en considération sont au nombre de 06 :

- **MTOW** : Masse Maximale autorisée au décollage.
- **MMO** : Mach Maximum en opération [Pour les avions Jet, tel que: B727, B737, A310 et B767].
- **VMO** : Vitesse Maximum en opération [Pour les avions à hélices tel que le FOKKER 27].
- **Capacité** : Nombre moyen de sièges passagers installés.
- **P** : Effectif équipage de conduite (PNT).
- **R** : Effectif équipage commercial (PNC).

Chaque secteur compte :

- *Secteur A* : regroupe les gros porteurs B767; A310.
- *Secteur B* : se compose uniquement du B727.
- *Secteur C* : regroupe B737 , L 382. (L382: cargo)
- *Secteur D* : compte les F27.

1.3 Présentation de la DOA :

La Direction des opérations Aériennes est chargée de la réalisation du programme d'exploitation dans les limites réglementaires d'utilisation du personnel navigant et des avions.

Elle met en oeuvre, coordonne et contrôle la bonne exécution de l'ensemble des activités qui ont pour but la préparation et l'exécution des vols programmés.

Pour gérer l'ensemble de son personnel, la direction des opérations aériennes se compose de 06 sous-directions, désignées comme suit:

- 1- Sous-direction études et exploitation.
- 2- Sous-direction administration et finance.
- 3- Sous-direction programmes et surveillances des vols.
- 4- Sous-direction personnel navigant commercial.
- 5- Sous-direction formation du personnel navigant technique.
- 6- Sous-direction personnel navigant technique.

L'ensemble de ces sous-directions est dirigé par le directeur, placé sous l'autorité directe du Président Directeur Général.

TAB.3: REPARTITION DE L'EFFECTIF DE LA DOA.

Sous Direction	Personnel Navigant Technique		Personnel Navigant Commercial		Formation PNT	Programme et surv. des vols	Etudes et Exploitation	Administ. et Finances
	Sol	Nav	Sol	Nav				
EFFECTIF	10	478	17	711	10	167	30	43

Source: Direction des Opérations.

Les principales activités de la direction des opérations aériennes se regroupent en 03 branches :

- Gestion des ressources humaines incluant la sous-direction personnel navigant technique, la sous-direction personnel navigant commercial et la sous-direction formation personnel navigant technique .
- Activités techniques et opérationnelles incluant la sous-direction études et exploitation, et la sous-direction programmes et surveillance des vols.
- Activités administratives et financières incluant la sous-direction administration et finance .

1.4 Gestion des ressources humaines :

1.4.1 Sous-Direction Personnel Navigant Commercial :

La Sous-Direction personnel navigant commercial est chargée de la gestion du PNC; sa mission consiste principalement à l'animation et la formation de ce dernier, elle est formée de 04 départements dont les activités majeures peuvent être groupées en trois catégories :

1.4.1.1 Activités techniques et administratives :

La sous-direction s'occupe en premier lieu de l'animation du personnel navigant commercial en ligne, autrement dit elle veille au bon déroulement de service du PNC en vol. Les différents chefs de secteurs [A, B, C, D] mettent en oeuvre des moyens et règlements liés au traitement en vol des passagers pour leur personnel correspondant.

En second lieu, on retrouve le suivi du produit " service en vol " et la coordination avec les directions concernées. La sous-direction réalise également les informations et procédures ainsi que la documentation technique, et traite les anomalies relevées par le PNC à bord.

La partie administrative assure la logistique, le suivi, la gestion de carrière du personnel navigant et de la discipline; elle est en relation avec le département économique de la sous-direction administrative et finances pour s'occuper de toutes les redevances diverses, hôtellerie, etc...

1.4.1.2 Formation Personnel Navigant Commercial :

La sous-direction assure également l'instruction au sol et en vol du personnel navigant commercial. Cette formation n'entre pas dans le domaine de l'aéronautique, mais plutôt dans le domaine commercial.

L'instruction au sol consiste en l'acquisition d'un diplôme de secourisme ; et l'instruction en vol est un stage pratique pour acquérir un savoir faire vis à vis des passagers.

Pour un besoin d'effectif dans un des secteurs [A, B, C, D] le département formation est dans l'obligation de former le PNC nécessaire manquant dans le secteur considéré. Le département s'occupe aussi de la planification et du contrôle de la formation, du perfectionnement et du recyclage de l'ensemble du PNC en fonction des programmes de l'aviation civile et des objectifs de la compagnie.

Pour renouveler leurs licences de vol, le personnel navigant commercial doit impérativement satisfaire semestriellement à une visite médicale pour les femmes et annuellement pour les hommes.

L'aviation civile recommande un recyclage par an pour le PNC chose qui ne se fait plus depuis quelques années ; sa réactivité est nécessaire.

1.4.1.3 Organisation et fonctions du PNC :

Les chefs de secteurs gèrent leur personnel respectif (congés, désidérata, indisponibilités, infractions), cela veut dire qu'il est mis à la disposition de chaque secteur le personnel formé et qualifié pour accomplir les différentes fonctions, réparties et définies suivant la hiérarchie de la compagnie :

-Hôtesse/Steward : Chargés d'assurer le service en vol aux passagers dans les meilleures conditions, possibles afin de réaliser un service de qualité.

-Chef de cabine : Les chefs de cabines sont responsables de l'activité du personnel (Hôtesse/Steward) placé sous leur ordre pour l'exécution d'un vol. Ils servent de trait d'union entre le commandant de bord et leur équipe PNC.

-Chef de cabine principal : Outre ses fonctions de chef de cabine, il s'occupe de la préparation et l'organisation des stages de formation nécessaires pour l'obtention des différentes qualifications machines existantes dans la compagnie.

-Chef de cabine principal instructeur : En plus de sa fonction de chef de cabine principal, il assure l'instruction du personnel navigant commercial.

L'effectif du PNC est donné dans le tableau suivant :

TAB.4: REPARTITION DE L'EFFECTIF PNC.

GRADE	Hôtesse Steward		Chef de cabine		Chef de cabine principal		Chef de cabine princip. instr.	
	F27	157	F27	-	F27	-	F27	-
REPARTITION DE L'EFFECTIF	B737		B737	-	B737	-	B737	
	B727	160	B727	113	B727	-	B27	-
	A310	167	A310	-	A310	12	A310	-
	B767		B767	-	B767	21	B767	33

Source: DOA.

Le PNC est recruté au bas de la hiérarchie, comme steward (hôtesse) affecté sur les appareils F27 et B737, ils sont ainsi biquilifiés et évoluent à chaque étape de la hiérarchie selon deux types d'avions, ce qui fait que l'effectif PNC est subdivisé en plusieurs sous-effectifs selon les types d'appareils.

Des informations sur l'effectif normal du PNC n'ont pu être trouvées, la méthode utilisée est de prendre 5 équipages par avion quelque soit le nombre et le type d'avion, cette méthode nous semble peu probante et ne tient pas compte de tous les paramètres.

1.4.2 Sous-Direction Personnel Navigant Technique :

Son rôle est d'assurer la conduite des vols dans les meilleures conditions de sécurité, de régularité et de qualité de service selon le programme, les normes et le règlement. Elle veille au maintien et à la gestion du personnel navigant technique et au respect de la discipline.

1.4.2.1 Activités techniques et administratives :

Les chefs des secteurs lignes des différents avions B727, B737, F27, B767 et A310 gèrent leurs pilotes respectifs sur le plan des congés, désidérata, indisponibilités, infractions. Ils assurent les contrôles en ligne, font procéder aux vols d'essai et règlent certains problèmes soulevés par leur personnel dans des feuilles d'instructions.

En plus des activités suscitées, les chefs de secteurs B767 et A310 assurent au personnel de pilotage : les simulateurs, le recyclage et le perfectionnement de leurs pilotes respectifs. Il est à noter que cette opération se passe à l'étranger (simulateur B767, A310 non disponible dans la compagnie).

Le personnel navigant technique doit impérativement satisfaire annuellement à deux visites médicales, deux contrôles en lignes et un simulateur .

La partie administrative assure le suivi administratif, la coordination entre les différents secteurs et la sous-direction programme et surveillance des vols, et assiste le sous-directeur PNT dans la gestion des infractions et le classement professionnel.

Toutes ces opérations sont tenues par un système manuel de fiches et de registres.

1.4.2.2 Organisation interne et postes de travail :

L'équipage de navigation technique se compose généralement d'un commandant de bord et d'un co-pilote, il s'avère parfois dans certain type d'avion la présence d'un troisième membre de l'équipage est nécessaire : c'est celui de l'officier mécanicien navigant. Les différentes fonctions sont définies comme suit :

- Commandant de bord : Il représente le pilote principal et le premier responsable à bord. Le commandant de bord (CDB) figurant parmi les plus anciens avec un minimum de 7500 à 8000 heures de vols effectuées, devient aussitôt CDB/instructeur, de plus il a la possibilité d'être nommé chef de secteur .

- Co-pilote : C'est le pilote second, et assistant du commandant de bord.

- Officier mécanicien navigant : Il représente le troisième membre de l'équipage de conduite. Parmi les aéronefs de la compagnie, le B727 est le seul nécessitant un OMN à bord; mais le développement de la technologie dans le domaine de la conception d'avions tend à réduire le nombre de l'équipage de conduite.

- Officier Radio navigant : Pour des destinations biens précises, comme celle d'Alger-Moscou, il est impératif que l'officier radio navigant fasse parti du voyage pour des raisons de communication avec les correspondants Russes .

Comme pour le personnel navigant commercial, le personnel navigant technique doté d'une licence de pilote de ligne est recruté aussi au bas de la hiérarchie. C'est aux frais de la compagnie qu'il recevra et acquérira les différentes qualifications, commençant tout d'abord par la qualification FOKKER 27 au grade de co-pilote, et évolue à chaque étape de la hiérarchie par un seul type d'avion, il est ainsi monoqualifié et n'exerce que sur la dernière qualification obtenue, ce qui divise l'effectif PNT en plusieurs sous-effectifs selon le type d'appareil.

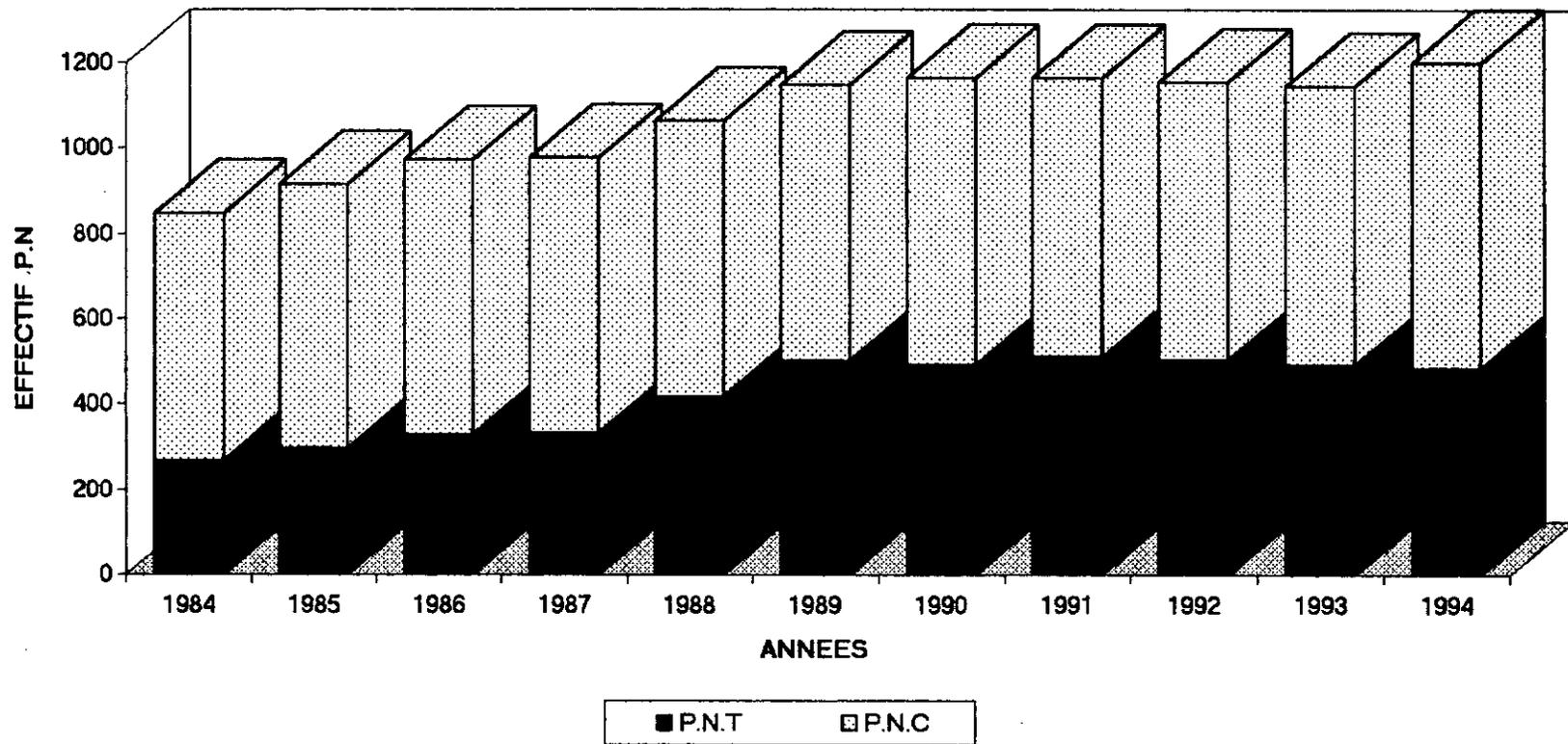
Nous présentons dans le tableau ci-dessous l'effectif du personnel navigant technique.

TAB.5 : REPARTITION DE L'EFFECTIF PNT.

GRADE	EFFECTIF	Effectif normal	INSTRUCTEUR
Co- pilote F27	40		-
Co-pilote B737	94	77	-
Co-pilote B727	57	55	-
Co-pilote A310	15		-
Co-pilote B767	22	18	-
Commandant de bord F27	35		06
Commandant de bord B737	74	77	19
Commandant de bord B727	56	55	14
Commandant de bord A310	15		04
Commandant de bord B767	20	18	05
Off. Mécanicien navigant	48	55	09
Off. Radio navigant	02		-

Source: Direction des Opérations Aériennes.

FIG . H1 : EVOLUTION DE L'EFFECTIF P.N.



Source: Direction des Opérations Aériennes.

L'effectif normal est calculé à la base d'informations fournies par le constructeur d'avions Boeing qui donne (en courbe) en fonction de la taille d'une flotte et de la productivité annuelle d'un avion le nombre d'équipages correspondant, pour exploiter cet avion.

1.4.3 Sous-Direction formation personnel navigant technique :

Son rôle est d'assurer au personnel navigant technique la formation, la qualification, le perfectionnement et le recyclage selon les normes et standards internationaux conformément à la réglementation en vigueur.

Elle gère également les affaires de formation sur le plan administratif et économique en suivant la réalisation des plans de formation qu'elle conçoit à court, moyen et long terme.

Les chefs de secteurs formation B727, B737 et officiers mécaniciens navigants assurent à leurs navigants respectifs une séance sur simulateur par an. Ils programment leurs passages au centre de simulateur de vols d'AIR ALGERIE se trouvant à Kouba.

Pour les gros porteurs (B767, A310) ils les programment auprès des centres de simulation de vols étrangers agréés.

Il est à noter que le secteur FOKKER 27 ne bénéficie d'aucun recyclage ou simulateur, car il n'existe que deux simulateurs FOKKER 27 dans le monde (en Nouvelle-Zelande et Pays-Bas).

Toutes ces opérations sont tenues manuellement par un système de fiches.

1.4.3.1 Centre de simulation de vol :

Le centre met à la disposition de la sous-direction formation PNT les simulateurs de vols pour le recyclage et le perfectionnement des navigants des secteurs B727, B737.

Pour cela, le centre exploite, entretient et assure la sécurité des simulateurs de vols.

Il gère également le stock de pièces de rechange, de l'outillage et des instruments de mesures.

Il assure les études techniques permettant l'élaboration des documents de fiabilité des accessoires. La gestion du magasin technique est sous sa responsabilité. Parmi les principales contraintes identifiées, on peut citer :

- Les moyens humains et matériels pour assurer les activités indispensables de maintenance et d'entretien des simulateurs sont à prévoir.
- Assurer une gestion des stocks pour les pièces de rechange.

1.5 Activités techniques et opérationnelles :

1.5.1 Introduction :

Les activités techniques et opérationnelles consistent essentiellement à élaborer les programmes de vol de chaque navigant, ainsi que de la flotte tout en assurant au personnel navigant les moyens et les mesures nécessaires de travail. Ces deux principales missions sont accomplies par deux sous-directions, représentant le centre nerveux de la direction des opérations aériennes :

1.5.2 Sous-direction études et exploitation :

Elle se charge des études opérationnelles liées à l'exploitation des avions et du réseau de l'entreprise en diffusant la documentation technique d'utilisation des avions, de navigation et d'infrastructures ainsi que le suivi de la politique d'import de carburant et l'analyse d'études de routes tout en respectant les réglementations aéronautiques. Les différentes études se répartissent à travers trois départements.

1.5.2.1 Département navigation :

Il s'occupe de la mise à jour des plans de vols, des données concernant les analyses des routes, du calcul des minimas opérationnels en :

- Exploitant les dossiers de vol .
- Analysant les paramètres de vol .
- Fixant la politique d'enlèvement du carburant .

1.5.2.2 Département traitement exploitation :

Il élabore les études opérationnelles et de performances sur l'utilisation des avions en ligne en mettant à jour des manuels de vol réduits, de changement et de limitation au décollage et l'établissement des rapports de pesées, de devis de poids et de centrage des avions.

1.5.2.3 Département réglementation et informations vols :

Il acquiert et gère la documentation technique d'utilisations des avions, de navigation, d'infrastructure des routes aériennes et celles concernant la réglementation aéronautique. Il met à la disposition des pilotes la documentation nécessaire à l'exécution des vols (météorologie, disponibilités du carburant...). Cette documentation est établit manuellement pour chaque vol .

1.5.3 Sous-Direction programmes et surveillance des vols :

Elle est chargée de la programmation du personnel navigant et de la flotte en se référant au programme de vol établi par la direction commerciale.

Elle s'occupe également de la régulation des programmes de vols, du contrôle et de l'exécution des vols.

1.5.3.1 Ramassage personnel navigant :

Le département de transport du personnel navigant a la charge de transporter le personnel navigant (technique & commercial) pour l'exécution de vols, stages, simulateurs et visites médicales à partir de leurs domiciles vers l'aéroport ou autres, selon la réglementation en vigueur.

Effectivement, la réglementation mentionne que le ramassage du personnel navigant se fait seulement sur un rayon de 25 Km et au delà le PN utilise ses propres moyens.

Pour cela nous relevons que les véhicules de transport sont en nombre insuffisant, de plus soumis à une gestion qui engendre des retards et/ou parfois des absences sur le lieu de travail et des perturbations dans l'exécution du programme de vol.

1.5.3.2 Programmation flotte et personnel navigant :

Le programme mensuel de vol du personnel navigant et de la flotte est élaboré sur la base d'un programme de vol, qui arrive en général un mois avant le début de la saison considérée, et déterminant la totalité des vols et les tranches horaires respectives, à effectuer durant une période donnée (saison).

Les sous-directions PNC et PNT transmettent à leurs tours, les données concernant le PN (congés, visites médicales, simulateurs, instructions...), ces données doivent être reçues au plus tard le dixième jour de chaque mois pour pouvoir réaliser la programmation du mois prochain.

La Direction Technique fournit toutes les informations et disponibilités relatives à la flotte.

Le département programme procède en premier lieu à la conception du programme mensuel de la flotte, mais il s'avère parfois que le programme saisonnier de la compagnie ne passe pas pour plusieurs raisons, le département le note et envoie les modifications qu'il pourrait suggérer.

Après avoir arrêté et adopté le programme de vol, le département passe à l'élaboration du programme PN qui se fait en deux parties:

1- Etablissement des rotations d'équipages : Elles représentent des séquences de segments de vol qui débutent à la base d'affectation P.N pour prendre fin à cette même base, ces rotations doivent recouvrir tous les vols du programme saisonnier, tout en satisfaisant un ensemble de restrictions déterminées par le règlement de travail.

Malheureusement, au niveau d'Air Algérie, ce travail est fait en début de période entièrement manuellement pour toute la saison (durée moyenne de trois mois), et prend ainsi deux à trois semaines de travail, ce qui fait que la programmation personnel navigant subit automatiquement des conséquences d'irrationalité et de non optimalité dès le départ.

2- Constitution des équipages (affectation PN) : En s'appuyant sur la programmation des routes d'équipages établies auparavant, des flux d'informations reçus (concernant le PN), et du règlement de travail, la programmation PN s'établit pour chaque corps (PNT&PNC), selon chaque type d'avion.

Le programme est conçu et réalisé manuellement pour cause de défection du logiciel AIMS qui était prévu à cet effet, ainsi les programmeurs prennent environ douze jours en moyenne chacun pour l'affectation des navigants. La machine n'est utilisée que pour l'impression des programmes. Ils sont présentés sous forme de matrices, les lignes représentant les différentes destinations et les colonnes les jours d'activités. Les programmeurs reportent dans la matrice vide le programme établi au préalable pour chaque PN.

On arrive ainsi à la fin du processus, chaque navigant reçoit son programme de vol pour chaque mois une semaine avant son lancement.

1.5.3.3 Surveillance des vols :

Le rôle de la surveillance des vols est de suivre le bon déroulement des vols et la position à tout moment des avions en vol et au sol au moyen de liaisons permanentes assurées grâce à un système de radio-communication.

Elle traite aussi toutes les irrégularités et problèmes de la journée ou de la nuit dans le respect des procédures en vigueur.

1.5.3.4 Cellule supervision équipages :

La cellule régule les programmes quotidiens, hebdomadaires et mensuels du personnel navigant. Après la conception du programme (équipage/avions), la cellule supervision équipage prend en charge ce programme et le gère manuellement (mise à jour, correctifs,...) pendant toute la durée du programme [un (01) mois] .

1.5.3.5 Cellule A . I . M . S :

En collaboration avec la compagnie grecque OLYMPIC, AIR ALGERIE a tenté d'automatiser le système : affectation du personnel navigant et de la flotte simultanément. Elles ont conçu ainsi le logiciel A.I.M.S (Airline Information Management Systeme), malheureusement ce logiciel ne répond pas à toutes les exigences d'Air Algérie, et présente plusieurs anomalies telles que :

- Déséquilibre dans l'équité horaire entre les navigants.
- N'effectue pas de roulements sur les destinations privilégiées (Afrique, Europe,...).
- Affecte des destinations dans des pays pour lesquelles les navigants n'ont pas le visa.
- Affecte des vols répétitifs au même navigant.
- Attribue plus de découchers que ne le tolère la réglementation.
- Attribue plus d'alertes que ne le tolère la réglementation.
- Attribue parfois toute une semaine de repos .
- Parfois les alertes pour certains vols n'existent pas.

De ce fait, le logiciel conçu ne s'adapte pas tout à fait à la compagnie AIR ALGERIE, il est utilisé uniquement pour reprendre la matrice vide que les programmeurs remplissent.

1.6 Gestion Administrative et financière :

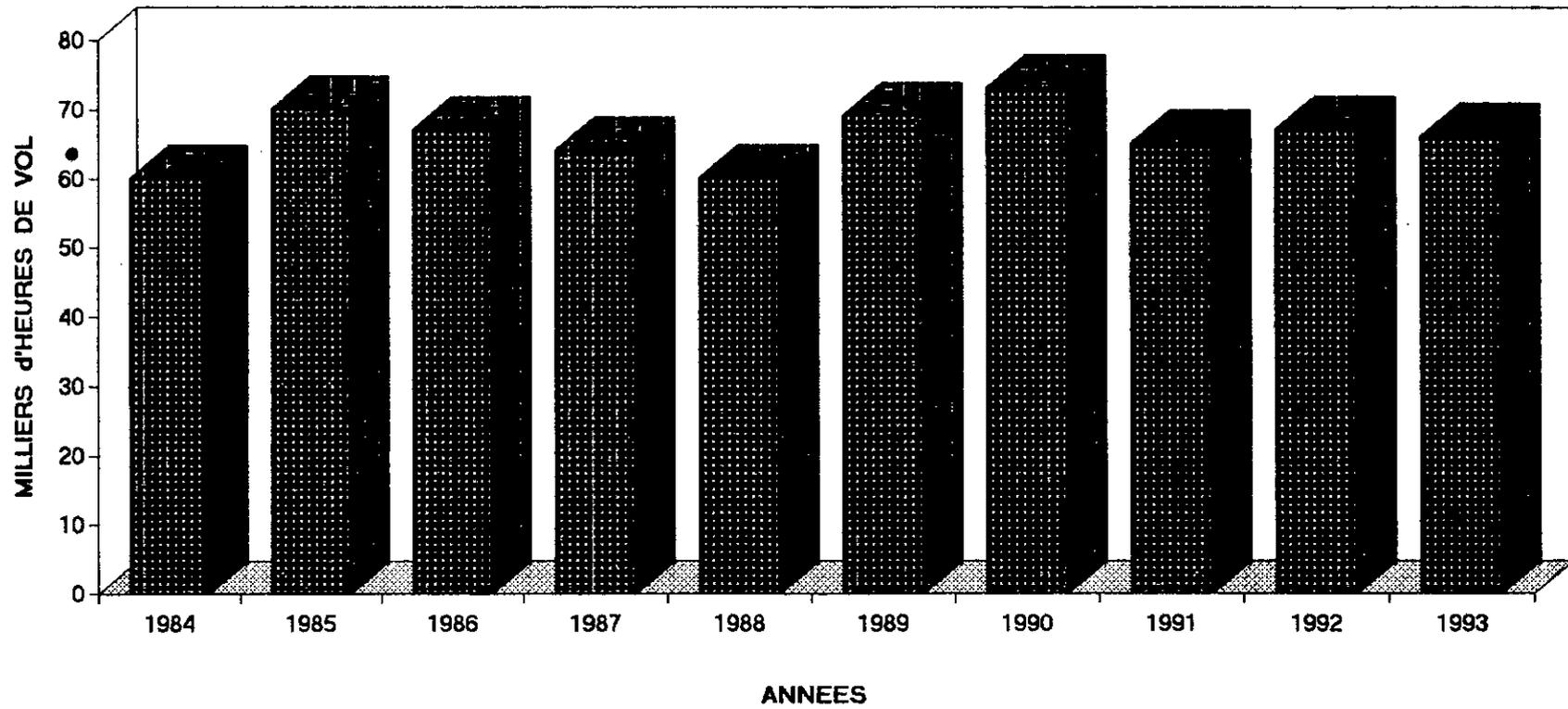
1.6.1 Sous-Direction Administration et finance :

Elle assure la gestion du personnel de la Direction des Opérations et traite les affaires d'ordre financier intéressant l'exploitation des avions, les questions économiques entre autres de la paie du personnel navigant que nous expliciterons dans la partie : Classification des coûts, ainsi que de la comptabilisation de tous les coûts liés directement et indirectement à la réalisation d'un vol.

1.6.1.1 Département administratif :

Pour pouvoir assurer la gestion administrative, le suivi de carrière des différents personnels et l'application des orientations et des instructions, il existe plusieurs services s'occupant de l'établissement de la paie du personnel navigant ainsi que des procédures

FIG . H3 : EVOLUTION DES HEURES DE VOL



EVOLUTION DU TRAFIC PAX (INTERNATIONAL + DOMESTIQUE)

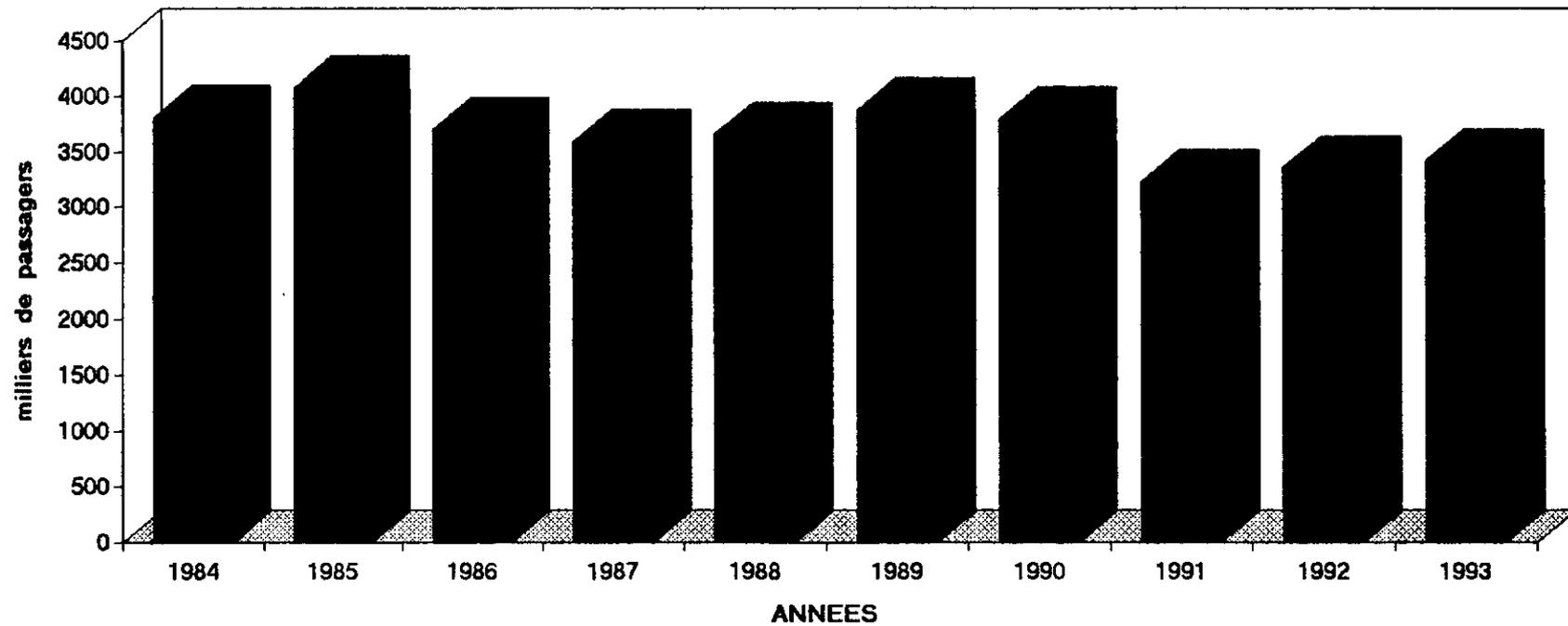
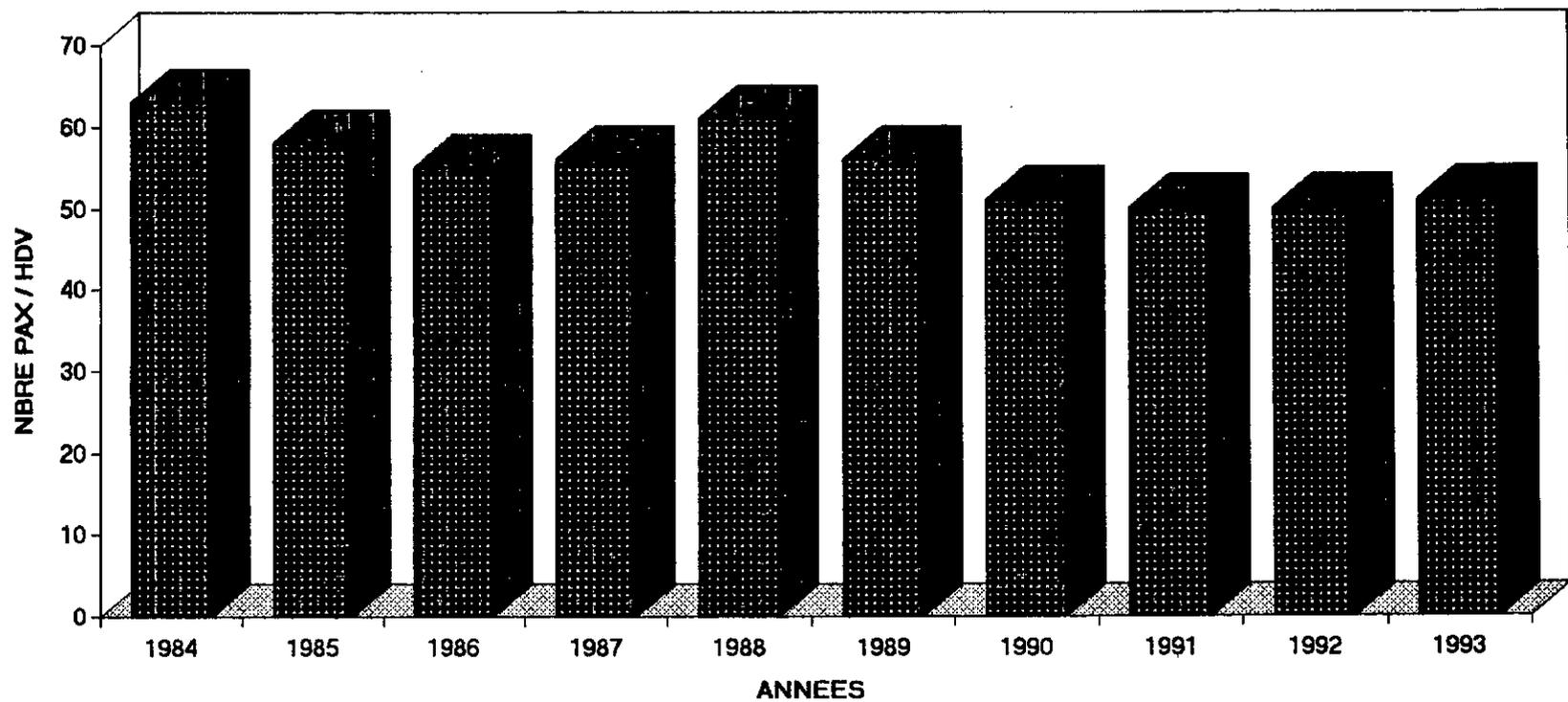


FIG . H4 : EVOLUTION DU RATIO : NBRE PAX / HDV



d'obtention de visas et de la gestion du personnel au sol (employés de bureau, entretien...) et un service de discipline s'occupant : des attributions de congés, sanctions pour retards répétés, avertissements pour travail non accompli .

1.6.1.2 Département carburant :

Le département carburant gère et négocie au plan économique les contrats carburants et ordonnance les factures d'enlèvement carburants en Algérie et à l'étranger.

1.6.1.3 Département économique :

Le département économique s'occupe de toutes les dépenses : factures d'hôtel du personnel navigant, redevances diverses... ainsi que du contrôle et l'ordonnancement des factures d'exploitation des avions (hors carburant) comptant les frais PN, taxe d'atterrissage, maintenance, taxe survol, assistances...pour établir la rentabilité de chaque vol.

Etant donné le flux très important des messages et de réception de factures, il est nécessaire de prévoir un terminal pour la gestion et le suivi dans de meilleures conditions ; d'autant plus que le travail est réalisé manuellement : pour l'établissement du nombre d'heures de vol par navigant par exemple, le département exploite les feuilles d'instructions et les traite feuille par feuille.

1.7 Classification des coûts :

1.7.1 Introduction :

Pour l'évaluation des coûts engendrés par le Personnel Navigant (les frais PN), il est nécessaire de procéder tout d'abord à l'évaluation des coûts variables directement liés à l'avion et au vol inclus dans le **coût d'exploitation**, dans le but de relever les dépenses affligées par ce corps et de déterminer sa contribution dans le coût d'exploitation.

Nous nous intéresserons, ensuite seulement au coût PN en explicitant les coûts de formation, et les méthodes de calcul pour la détermination des salaires.

Il est à noter que d'autres coûts sont inclus dans le coût d'exploitation, à savoir : un coût indirect représentant 25 % du total du coût d'exploitation, ainsi que des coûts fixes, représentant les coûts d'amortissement, intérêts et assurances.

Ce qui fait que nous ne considérerons dans notre analyse du coût d'exploitation que les coûts variables.

Cette analyse est concentrée sur le transport de passagers (domestique et international) puisque le transport de fret n'est pas vraiment important, car non seulement les volumes de frets sont faibles, mais en plus une grande partie est transportée comme activité marginale, par les vols mixtes.

1.7.2 Coût d'exploitation :

Le coût d'exploitation représente le coût par ligne (destination), par type d'avion et par réseau .Il est évalué pour l'étude de la rentabilité de chaque vol par la **Direction de la**

Planification et Contrôle de Gestion [DPCG]. Une de ses missions est d'établir mensuellement des états statistiques portant sur les coûts d'opération par type d'avion.

Le coût d'exploitation est obtenu à partir de l'évaluation des dépenses relatives aux différentes composantes :

Frais personnel navigant, frais de carburant, taxe d'atterrissage, frais d'assistance, frais d'entretien, taxe de survol.

Ce sont des frais dont le niveau varie avec le volume de la production horaire de la flotte (évaluer autrement pour les taxes d'atterrissage et frais d'assistance).

1.7.2.1 Frais personnel navigant :

La répartition des coûts d'exploitation par réseau et par type d'appareil élaborée par AIR ALGERIE, donne les salaires du personnel navigant (technique & commercial) ainsi que les dépenses de vols.

Les coûts du PN sont exprimés en heures de vol, en incluant une partie fixe par cycle (un mois). Pour ces calculs, il s'agit de prendre en compte les aspect suivants :

- 1- Les différences de rémunération qui existent entre les heures de travail de jour et les heures de travail de nuit.
- 2- Les différences de rémunération existant entre les heures de travail en vol et les heures de travail au sol.
- 3- Les différences dans le niveau de salaire du PN selon le type d'appareil et de son ancienneté dans l'entreprise.

Le calcul des frais PN fait intervenir trois variables à savoir la rémunération PN, les heures de vols et les caractéristiques avions.

Les frais PN horaires pour l'année 1994 sont donnés par le tableau suivant :

TAB. 6: FRAIS P.N PAR HEURE.

Avions	Frais PN Horaires (DA)	Dont Devises
B767	13049 DA	1839 FF
A310	14011 DA	1975 FF
B727	12227 DA	1754 FF
B737	7901 DA	1091 FF
F 27	4663 DA	-

Source: DPCG

1.7.2.2 Frais carburant :

Les frais carburant sont calculés selon les enlèvements théoriques, en fonction de la charge à transporter, le coefficient de remplissage et les prix appliqués.

TAB.7: FRAIS CARBURANT DE LA FLOTTE.

Type d'appareil	Consommation.Moy Horaire	Coût Horaire
B767	52.50 HI	37909.10 DA
A310	54.70 HI	39497.50 DA
B727	48.10 HI	34733 DA
B737	29.40 HI	21222.75 DA
F27	21.35 HI	10095.1 DA

Source: Direction technique.

1.7.2.3 Entretien :

Les frais d'entretien sont des coûts théoriques moyens qui tiennent compte des coefficients mature, du taux horaire de main-d'oeuvre (locale et sous-traitée), du coefficient qualification (type d'avion) main-d'oeuvre ainsi que le coût matière respectivement pour la cellule et moteur avion.

Ils sont calculés par la DPCG en tenant compte du taux de change et de l'inflation. Le tableau suivant représente les frais d'entretien horaires pour l'année 1994.

TAB.8: FRAIS D'ENTRETIEN D'AVION. PAR HEURE.

Avions	Frais entretien horaire	Dont Devises
B767	27105 DA	362 USD
A310	34573 DA	575 USD
B727	24656 DA	276 USD
B737	19489 DA	200 USD
FOK27	8002 DA	110 USD

Source:DPCG.

1.7.2.4 Frais d'atterrissage :

Les coûts relatifs aux redevances aéroportuaires sont basés sur des tarifs officiels émanant des A.I.P .

Aussi, ces mêmes coûts sont communiqués par les correspondances escales.

On signalera que les charges d'aérodromes constituées par les frais d'atterrissage, de stationnement et de balisage sont fonction de la masse maximale au décollage de l'avion et de la durée de stationnement.

1.7.2.5 Frais d'assistance :

Les tarifs d'assistance sont négociés avec les compagnies aériennes et sont communiqués ensuite à la Direction des Opérations au sol.

En Algérie, l'assistance est assurée par les services internes de la compagnie. Elle ne donne lieu à aucune facturation.

En l'absence d'une maîtrise de cette activité, la prise en charge du coût correspondant est

Assistance en Algérie = 50 % * Assistance à Paris.

1.7.2.6 Taxe de survol :

Les redevances de route sont calculées sur la base des tarifs officiels publiés par les gestionnaires des services de contrôle de la navigation.

Ces tarifs font intervenir la distance parcourue, le poids maximum au décollage et un taux unitaire.

Certains organismes utilisent un taux fixe par survol ou un pourcentage de la redevances d'atterrissage.

1.7.3 Coût de formation et rémunération du personnel navigant :

1.7.3.1 Coût de formation :

- Les coûts de passage d'une qualification avion à une autre pour un navigant technique et commercial sont représentés dans les tableaux suivants :

TAB.9: COÛT DE REVIENT DE LA FORMATION PNT.

Avions	Co-Pilote	CDB
F27	500000 DA	500000 DA
B737	663000 DA	663000 DA
B727	751000 DA	751000 DA
B767 - A310	1100000 DA	1100000 DA

Source: S/Direction formation PNT.

TAB.10: COUT DE REVIENT DE LA FORMATION PNC.

Avions	Hotesse-Steward	Chef de Cabine
-	Initial: 32804 DA	-
F27 - B737	7837 DA	-
B737-B727	2952 DA	12310 DA
B727-A310	2952 DA	12310 DA
B727-B767	2952 DA	12310 DA

Source:S/Direction PNC.

1.7.3.2 Rémunération du personnel navigant :

Les données nécessaires à l'élaboration de la méthode de calcul du coût Personnel Navigant comprennent :

- Les frais du PN.
- Les heures de vol PN.
- Les éléments de règlement de rémunération.
- Les caractéristiques avions.

La rémunération du personnel navigant se compose d'un coût fixe et d'un coût variable.

$$\text{COUT PN} = \text{COUT FIXE} + \text{COUT VARIABLE.}$$

Coût fixe :

Représente des charges fixes telles que le salaire de base défini par l'entreprise comme suit:

$$\text{Salaire de Base} = [\text{salaire de référence} * \text{coefficient d'ancienneté} * \text{coefficient de spécialité}] * j/30.$$

- Salaire de référence (PNT par exemple) = 12000 DA.
- Coefficient de spécialité : Représente les différentes fonctions existantes dans la compagnie. (tabulé)
- j : Nombre de jours d'activité.

Coûts variables :

C'est l'ensemble des frais qui suivent les variations de l'activité, celle-ci repose sur des paramètres pertinents que sont les volumes d'heures de vol effectués par la flotte et ceux effectués par les navigants, d'où la notion de prime horaire de vol : PHV représentant une base de calcul pour l'évaluation des rubriques du fichier coût PN.

La prime horaire de vol est déterminée comme suit:

$$\text{PHV} = \text{Taux de base} * \text{Coefficient d'ancienneté} * \text{Coefficient machine} * \text{Coefficient de spécialité et de classe.}$$

- Taux de base = $k * \text{Salaire de référence}$. $0 < k < 1$
- Coefficient machine : Représente le type d'appareil . (tabulé)
- Coefficient de spécialité et de classe : déterminé selon la fonction et le classement dans cette même fonction.

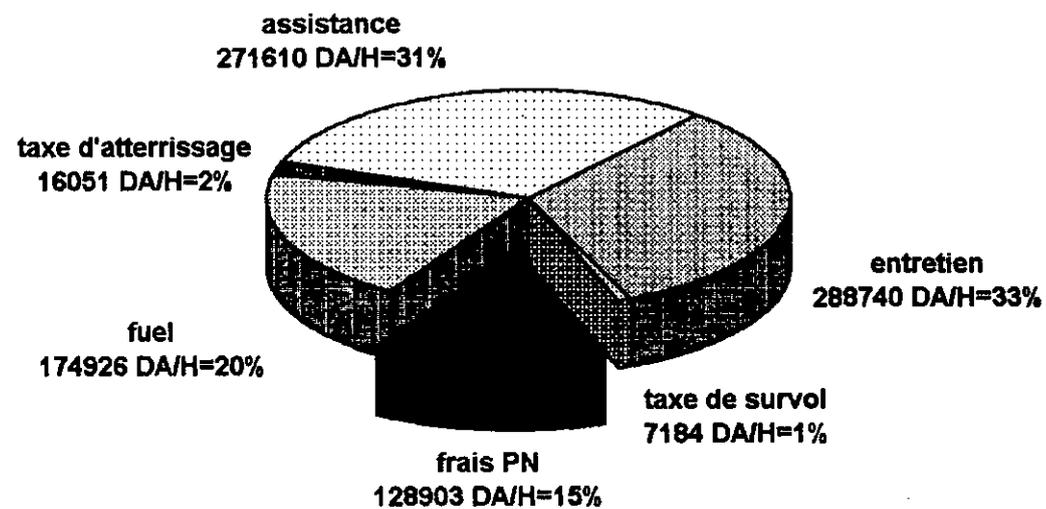
La PHV va ainsi déterminer le coût d'une heure de vol effectuée par un navigant. Le total d'heures de vol effectuées mensuellement par un navigant représente le temps de vol décompté, et chaque heure de vol est pondérée par un coefficient selon sa nature.

$$\text{CHV} = \text{TVD} * \text{PHV} \quad \text{avec:}$$

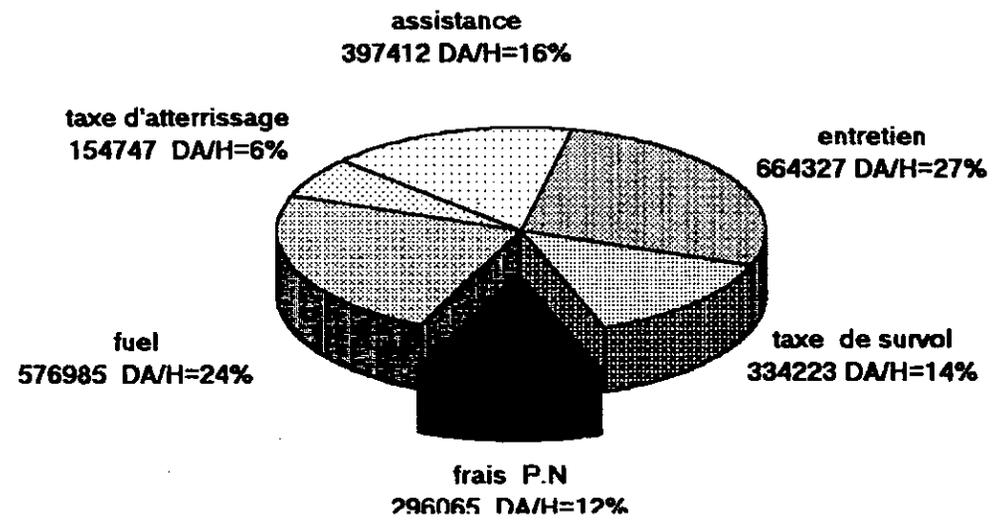
$$\text{TVD} = \text{HDV} + h1*0.5 + h2*k1 + x1*[H/30] + h3*0.4 + h4*0.6 + h5*k2 + h6*[75/720].$$

- CHV : Coût d'heures de vol.
- TVD : Temps de vol décompté.
- HDV : Total des heures de vol effectuées par un navigant sans les heures supplémentaires, alertes et mise en place.
- h1 : heures effectuées en nuit, jour férié et vendredi.
- h2 : heures d'instruction majorées selon l'instruction.

**FIG . C1 : COUTS DIRECTEMENT LIES A L'AVION ET AU VOL.
RESEAU DOMESTIQUE**



COUTS DIRECTEMENT LIÉS A L'AVION ET AU VOL RESEAU INTERNATIONAL



- k1 : jours d'immobilisation sur ordre.
- x1 : majoration selon l'instruction.
- H : nombre d'heures allouées par mois au navigant selon la fonction pour effectuer un encadrement au sol.
- h3 : nombre d'heures effectuées entre 41 et 60 heures.
- h4 : nombre d'heures effectuées au dessus de 60 heures.
- h5 : nombre d'heures effectuées en zone désertique majorées selon le jour ou la nuit.
- h6 : nombre d'heures d'absence hors base d'affectation.

Il est important de souligner que si le temps de vol décompté s'avère inférieur et même nettement inférieur au minimum garanti qui diffère entre le PNT et le PNC, le navigant perçoit l'équivalent du minimum garanti. Ce point là est le plus contestable dans la rémunération du personnel navigant.

La comptabilisation des heures supplémentaires, alertes, mise en place, congés et indemnités de représentation se fait respectivement comme suit :

$$HS * [SB * (1.5/75) + PHV * 0.25]$$

- HS : Nombre d'heures supplémentaires.
- SB : Salaire de base.

$$3 * Xa * PHV.$$

- Xa : Nombre d'alertes.

$$0.5 * Hm * PHV.$$

- Hm : Heures de vol passées en qualité de passager service.

$$Xc * Activité / 30.$$

- Xc : Nombre de jours de congé.
- Activité = SB + CHV. (CHV: Moyenne annuelle des CHV de l'année précédente.)

$$HDV * Coeff.mach. * S.$$

- S: Montant déterminé par l'employeur.

A tout cela on ajoute des primes mensuelles fixes telles que :

- Prime d'habillement : 2000 DA.
- Prime en devises : 2000 à 2500 FF.
- Indemnité compensatrice de transport : 2000 à 2500 DA.

Les règlements de rémunération du PNT et du PNC sont peu différents (mêmes méthodes de calcul de base), nous avons insisté sur les rubriques les plus significatives et communes aux deux corps. Il est aussi à savoir que le personnel navigant est payé selon la plus haute qualification (généralement la dernière obtenue).

2. CLASSIFICATION DES PROBLEMES RENCONTRES :

Après l'étude de la situation actuelle du personnel navigant, nous sommes arrivés à relever une variété de problèmes que nous avons rencontrés au cours de notre diagnostic, qui sont de complexités différentes.

Parmi les plus importantes défaillances à soulever et à traiter, pour un fonctionnement plus rationnel de la direction des opérations aériennes sont les suivantes :

• Au niveau de toutes les structures de la direction, la quasi-totalité des opérations techniques se fait manuellement :

- Elaboration du programme flotte.
- Elaboration du programme Personnel Navigant.
- Etablissement des plans de vol.
- Gestion du prélèvement du carburant.
- Gestion documentaire pour la préparation des vols.

• La gestion du personnel au sein de la direction souffre elle aussi, de plusieurs problèmes :

- Actualisation du fichier PN.
- Gestion de carrière du personnel navigant.
- Gestion des indisponibilités.
- Optimisation du ramassage PN.

3. CONCLUSION :

A travers le diagnostic, nous avons pu voir comment est entrain de vivre et de se comporter le personnel navigant dans son environnement, pour mieux comprendre les problèmes vécus par ce corps et analyser de manière rationnelle l'organisation des opérations aériennes.

Nous avons relevé plusieurs imperfections et dysfonctionnements dans la Direction des Opérations Aériennes (DOA) dus à plusieurs paramètres de différentes natures, mais le plus important à nos yeux est d'avoir conscience de ces problèmes, car leurs résolutions restera une question de volonté.

Parmi les plus importantes initiatives à considérer reste en premier lieu le management du personnel en établissant un processus de décision plus efficace, mais il faut savoir que le transport aérien a quelques caractéristiques spécifiques qui le distingue d'autres industries, comme par exemple les unités de productions sont géographiquement étendues, quelques unes sont en mouvements, les autres localisées en différents points dans le monde.

Toutefois la différence la plus remarquable entre les autres industries et le transport aérien est que les produits invendus ne sont pas stockables.

Dans les plus grandes compagnies aériennes au monde, des efforts considérables ont été fait pour rendre les processus de décision plus efficaces. Aujourd'hui, les modèles de recherche opérationnelle sont utilisés régulièrement pour des prises de décisions automatisées, ce qui ne voudra pas dire que la contribution humaine est absente, car un système de décision automatisé est plus dépendant de l'organisation que d'autres systèmes informatiques.

La seconde initiative qui intéresse notre travail de plus près est le management du personnel navigant qui inclut essentiellement cinq différentes catégories de problèmes chacune appelant à une approche méthodologique différente.

Trois catégories sont relatives à l'organisation de la force de travail : - De combien de navigants a-t-on besoin? - Comment peut-on assurer que l'offre va satisfaire la demande? - Comment peut-on satisfaire les exigences opérationnelles?.

Deux autres catégories concernant la structuration du volume de travail : Les vols qui forment le programme de vol de la compagnie sont enchaînés ensemble pour former les rotations des équipages, et ces rotations sont regroupées ensemble une seconde fois pour former les programmes de travail mensuel pour chaque navigant. Ce dernier processus peut être impersonnel, dans ce cas les programmes de travail résultants sont distribués entre les navigants par un processus bien ordonné.

Alternativement les programmes de travail mensuels pour les navigants sont construits en prenant en compte les requêtes et contraintes des membres du PN (Méthodes appliquées par la compagnie Australienne QANTAS)[Rich 89].

5.PROBLEMATIQUE :

Dans l'entreprise il existe toujours quelque chose à améliorer; lorsqu'il n'y a plus lieu de le faire, l'entreprise cesse de progresser.

Le problème de programmation du personnel navigant à AIR ALGERIE est un sujet qui n'a pas été traité auparavant, et c'est pourquoi il nous a fallu l'étudier sous ses différents aspects, pour trouver le problème qui nous intéresse.

Chaque compagnie aérienne doit affecter à un coût minimum ses équipages sur les vols qu'elle assure sur une certaine période. On a vu ainsi auparavant que le problème des horaires d'équipages est divisé en deux grandes parties :

- Génération d'un ensemble de rotations d'équipages,
- Groupement de ces rotations en horaires individuels (plannings).

Ainsi, il s'agit pour nous en premier lieu, de générer un ensemble de rotations qui recouvre tous les vols qui ont été prévus, et dont on a précisé les stations de départ et d'arrivée, leurs horaires respectifs, et le type d'appareil à utiliser. La rotation utilisée comme unité de base pour l'assignation des équipages est définie comme une séquence de tronçons (segments de vol) pouvant être effectués les uns à la suite des autres et dont le départ et le retour s'effectuent à une base d'affectation (Alger). La construction de ces rotations est évidemment soumise à un certain nombre de contraintes dues à la réglementation en vigueur (convention collective du personnel navigant, objectifs de la compagnie ...).

Un équipage complet (membres d'équipages techniques et commercial) est programmé pour assurer un vol. Etant donné que les membres d'équipages sont des êtres humains et pas des machines, la programmation de leurs déploiement est considérablement plus compliquée que la programmation d'utilisation des équipements.

Effectivement, la seconde partie du problème de programmation P.N, consiste à regrouper les rotations d'équipages, et à fournir pour chaque navigant son programme de travail du mois considéré. Cette tâche est difficile à réaliser complètement, vu que les programmes individuels se font dans le respect de la réglementation de travail, à savoir le temps total de vol par jour, par semaine, et le temps de repos entre les périodes de services, tout cela est fait en essayant de maximiser le profit de la compagnie. Les programmeurs sont chargés donc, de maximiser l'utilisation du P.N, distribuer

uniformément les heures de vol entre eux durant la période considérée, et minimiser les chances de vols ratés dûs à des indisponibilités de membres d'équipages.

L'élaboration manuelle des programmes individuels de vol requiert une grande connaissance, une maîtrise, et une expérience de la part des programmeurs [JON89], pour pouvoir gérer tous les flux d'informations nécessaires, contrôler toutes les contraintes, et arriver à atteindre les objectifs de la compagnie, en tenant compte de plusieurs décisions subjectives. De ce fait, cette seconde partie est généralement résolue par une méthodologie de conception de systèmes experts d'aide à la décision [JON89].

D'un point de vue de minimisation des coûts et de rentabilisation de la programmation personnel navigant, l'optimisation des rotations d'équipages est la phase la plus cruciale dans le processus, et offre la grande opportunité de réduire les coûts PN à travers l'application des techniques de recherche opérationnelle [GER89].

On pourrait donc résumer en disant que l'objectif de notre problème est d'optimiser les horaires d'équipages d'avions en minimisant le coût d'exécution du programme de vol initialement établi sous les contraintes suivantes :

- 1- Chaque vol doit être assuré une et une seule fois, quoique des vols de mise en place (transport de membres d'équipages comme passagers.) peuvent être permis dans quelques versions du problème.
- 2- Chaque rotation doit commencer à une base d'affectation PN, s'effectuer dans le système, et revenir à la même base.
- 3- Chaque rotation doit être conforme aux limitations de la direction de l'aviation civile (D.A.C), et au règlement de travail de la compagnie.
- 4- Le nombre de tâches à chaque base doit être à l'intérieur des limites minimales et maximales spécifiques, en accord avec le plan d'exploitation de la compagnie.

DEUXIEME PARTIE

Etat de l'art

Après avoir compris le problème qui consiste en l'optimisation des horaires d'équipages d'avions, une modélisation rigoureuse ne peut être envisagée sans avoir eu connaissance de l'état de l'art en la matière. Ce qui fait que dans cette partie plusieurs points de vue et méthodes de résolution du problème seront examinés.

INTRODUCTION

Le problème de programmation des horaires d'équipages d'avions est un problème qui a été étudié continuellement durant les quarantes dernières années [HOF93], et s'est posé dans la plupart des compagnies aériennes dans le monde.

Aujourd'hui le problème est spécialement important depuis que les coûts du personnel navigant dans la majorité des compagnies aériennes au monde ont sensiblement augmenté et représentent la seconde composante du coût d'exploitation [GRA 93], [HOF93], [GER93].

Toutefois les techniques de recherche opérationnelle ont réussi avec succès à réduire le coût du personnel navigant, sauf que d'un point de vue mathématique une résolution efficace représente un challenge pour l'optimisation de problèmes combinatoires [RY93].

Diverses méthodes sont utilisées pour résoudre le problème de programmation du personnel navigant, généralement classées en deux grandes catégories correspondant chacune à une partie du problème.

En effet, la plupart des compagnies aériennes continuent à traiter la résolution de la première partie du problème : la programmation des rotations d'équipages en utilisant des méthodes basées sur des modèles formulés comme des problèmes de partitionnement ou de recouvrement [LAV86], [GER93], [RY93].

La deuxième partie, consistant à l'élaboration des programmes individuels de membres d'équipages d'avions, est généralement résolue par l'utilisation des systèmes d'aides à la décision .

Nous essayerons de présenter les différentes méthodes de résolution étudiées au cours de notre recherche, afin de trouver une méthode d'approche pour le problème qui nous a été posé.

1. CONCEPTS DE BASE :

1.1 Notions fondamentales :

Avant de présenter les différentes méthodes de résolution du problème, nous donnons quelques définitions de termes techniques utilisés, que nous rencontrerons dans notre présent document.

1.1.1 Segment de vol - Service de vol - Rotation :

1.1.1.1 Segment ou Tronçon de vol (étape) : Un tronçon ou segment de vol représente une liaison aérienne entre une station de départ (origine) et une station d'arrivée (destination).

1.1.1.2 Temps de vol (T.V.) : Le temps de vol est décompté depuis le moment où l'avion quitte le bloc départ pour gagner l'aire de décollage, jusqu'au moment où il s'immobilise au bloc d'arrivée. On entend par bloc le point de stationnement de l'appareil.

1.1.1.3 Service de vol : Activité due à l'exécution d'un ou de plusieurs segments (tronçon de vol) entre deux temps successifs d'arrêt, par un équipage.

1.1.1.4 Rotation : Suite de services de vol et de temps d'arrêts pour un équipage, entre deux retours à la base.

1.1.1.5 Période de vol : Une période de vol représente la somme des temps de vol comptés dans un service de vol.

1.1.1.6 Temps de service de vol : Le temps de service de vol représente le temps compté depuis une heure avant l'heure programmée de début du premier temps de vol jusqu'à trente minutes après l'heure de la fin du dernier temps de vol dans un même service de vol.

1.1.1.7 Temps d'absence (TA) : Le temps d'absence représente le temps compté depuis le début du temps de service de vol éloignant le personnel navigant de sa base d'affectation jusqu'à la fin du temps de service de vol le ramenant à cette même base.

1.1.2 Temps de repos - Temps d'arrêt :

1.1.2.1 Temps de repos pré-courrier : Le temps de repos pré-courrier représente un temps de repos attribué au personnel navigant avant toute période d'activité.

1.1.2.2 Temps de repos post-courrier : Il représente le temps de repos attribué dès la fin du temps d'absence d'un courrier (après chaque fin de rotation) pendant lequel le personnel navigant doit être libéré de toute affectation de service.

1.1.2.3 Temps d'arrêt en escale : Temps en escale séparant deux segments de vol compté depuis l'heure bloc d'arrivée jusqu'à l'heure bloc programmée de départ.

1.1.2.4 Arrêt nocturne normal : Temps d'arrêt comportant au moins 09 heures consécutives entre 21h00 et 09h00 locale.

1.1.3 Autres définitions :

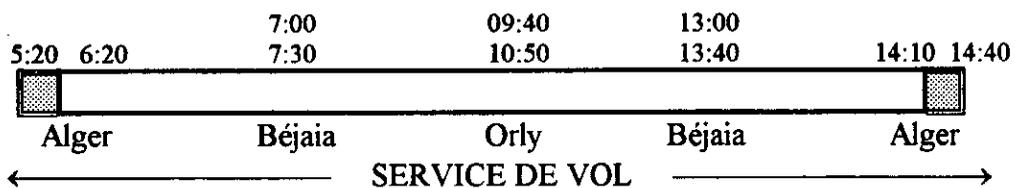
1.1.3.1 Vol de mise en place : Vol effectué en qualité de passager par un officier navigant, afin de reprendre ses fonctions, à partir de la station d'arrivée.

1.1.3.2 Vol de nuit : Temps de vol dont une partie se situe entre 21 heures et 05 heures du matin.

1.1.3.3 Astreintes : Temps d'attente en escale sur le terrain de la base d'affectation ou à la maison que doit assurer chaque navigant en cas de déclenchement d'alertes, d'où la notion d'alerte terrain et alerte maison.

Les quelques exemples qui suivent préciseront ces définitions.

Exemple n°1



[Alg-Bja] : Segment (étape-tronçon) Alg : station de départ, Bja : station d'arrivée.

7:00 - 7:30 : Temps d'arrêt en escale.

9:40 - 10:50 : Temps d'arrêt en escale .

13:00 - 13:40 : Temps d'arrêt en escale .

0:40 : Temps de vol (Alg-Bja).

2:10 : Temps de vol (Bja-Ory).

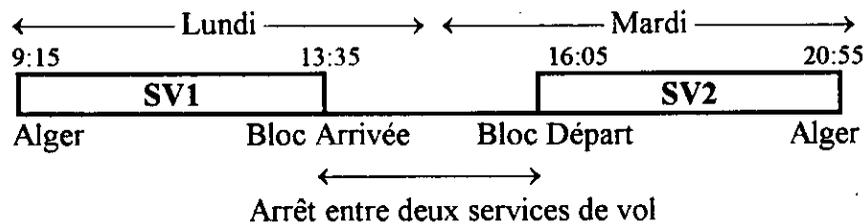
2:10 : Temps de vol (Ory-Bja).

0:30 : Temps de vol (Bja-Alg).

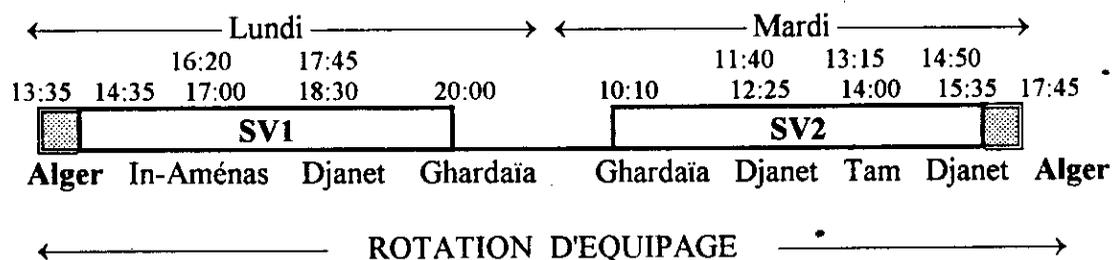
0:40+2:10+2:10+0:30 : Période de vol .

1+[0:40+2:10+2:10+0:30]+0:30 : Période de service de vol.

Exemple n°2



Exemple n°3



↔
Repos post-courrier

2. METHODES DE RESOLUTION :

Introduction :

Pour pouvoir bien comprendre les techniques de résolution du problème de programmation P.N ; il est nécessaire de comprendre quelques notions mathématiques sur lesquelles se basent les formulations utilisées dans la littérature pour approcher le problème.

2.1 Problèmes de recouvrement et de partitionnement :

Les problèmes de programmation linéaire en nombres entiers représentent une large classe des problèmes d'optimisation discrète. Le problème de recouvrement (Set Covering Problem : SCP) et le problème de partitionnement (Set Partitioning Problem : SPP) sont des problèmes bien connus dans le champ d'optimisation combinatoire et de théorie des graphes et représentent un large éventail des problèmes de programmation industrielle et d'organisation ; ceci inclus : la programmation d'équipages de bus, la programmation d'équipages d'avions, les problèmes de construction de tournées, les problèmes de localisation,...

Il est bien établi que ces problèmes et leurs méthodes de résolution représentent la majorité des exemples résolus avec succès à travers l'application de modèles discrets pour résoudre des problèmes de programmation industrielle. Malheureusement le principal obstacle dans la résolution de plusieurs problèmes réels de programmation et d'organisation est l'explosion combinatoire du fait que, ces problèmes appartiennent à la classe de problèmes NP-complets [DAR 92]. Aujourd'hui les seules voies efficaces pour affronter ces problèmes combinatoires difficiles sont les méthodes de recherche par arborescence qui fournissent une énumération systématique de l'espace d'état. Ces méthodes évitent une énumération complète par l'utilisation de bornes dérivées de l'exploitation de solutions de sous-problèmes relaxés avec un temps de calcul polynomial.

2.1.1 Notation et définition du problème :

Considérons l'ensemble $S = \{ 1, 2, \dots, m \}$ et une classe D de sous-ensembles de S , tel que : $D = \{ D_1, D_2, \dots, D_n \}$.

Soit $J = \{ 1, 2, \dots, n \}$ l'ensemble des indices de sous-ensembles qui forment la classe D . Une couverture de S est une sous-classe de D définie comme : $\{ D_j / j \in J_c \}$ où $J_c \subseteq J$ avec $\cup D_j = S (\forall j \in J_c)$.

Soit c_j le coût d'inclure D_j dans la couverture. Ainsi le problème de recouvrement à moindre coût se résume à la recherche d'une couverture $\{ D_j / j \in J_c^* \}$ tel que $\sum c_j$ soit minimum ($\forall j \in J_c^*$).

Le problème de recouvrement peut être aussi posé en un problème linéaire à variables binaires :

$$\text{MIN } \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \in \{ 0, 1 \}, \quad j = 1, \dots, n$$

où

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si } D_j \text{ est inclus dans la couverture.} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \in D_j. \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Il est pratique d'introduire les ensembles d'indices S_i , $i = 1, 2, \dots, m$, tel que pour chaque ligne i , S_i dénote les indices de colonnes avec éléments unités. De la même manière les ensembles d'indices D_j , $j = 1, 2, \dots, n$ dénotent les indices de lignes avec éléments unités dans la colonne j . Ainsi D_j et S_i sont relatifs à a_{ij} , tel que :

$$D_j = \{ i / a_{ij} = 1, i = 1, \dots, m \} \quad \forall j.$$

$$S_i = \{ j / a_{ij} = 1, j = 1, \dots, n \} \quad \forall i.$$

$$|D_j| = \sum_{i=1}^m a_{ij} \quad \text{et} \quad |S_i| = \sum_{j=1}^n a_{ij}$$

Une solution réalisable au SCP est appelée couverture. Une première couverture x^* est une couverture pour laquelle x_j prenant actuellement la valeur 1 ne peut être réduite à zéro sans la violation d'une contrainte. Une solution optimale au SCP est une première couverture si tous les coûts sont positifs.

Le problème de partitionnement SPP est définie comme suit :

$$\text{MIN} \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \in \{ 0, 1 \}, \quad j = 1, \dots, n$$

Et représente la sélection à coût minimum tel que chaque élément de S est inclus *exactement* une seule fois .

2.1.2 Algorithme général de génération de colonnes :

L'algorithme de génération de colonnes est utilisé pour résoudre des problèmes linéaires du type primal qui comportent un nombre de variables très largement supérieur au nombre des contraintes ($n \gg m$), et tellement élevé que la matrice A ne peut être intégralement explicitée (en pratique, cela signifie que l'on ne peut la stocker entièrement dans la mémoire du calculateur). On suppose simplement que la matrice A est connue implicitement, ses colonnes correspondant à des éléments mathématiques bien définis mais en nombre très grands. Le principe est de résoudre une suite de problèmes dans lesquelles ne sont explicitées qu'un nombre relativement petit de colonnes. Cette méthode peut s'expliquer par le fait qu'à l'optimum, le nombre de variables non nulles n'excède jamais m, le nombre de contraintes du problème, bien que le nombre de variables puisse être très supérieur [énoncé de l'algorithme annexe B].

2.2 Systèmes d'aide à la décision :

Le phénomène de systèmes d'aide à la décision (S.A.D.) a récemment émergé ; toutefois des bases théoriques pour la caractérisation, la conception et le développement de S.A.D. ont été difficilement élaborés.

Il existe plusieurs définitions de S.A.D., certaines ont un sens large et d'autres ont un sens plus étroit. Les définitions les plus larges les considèrent comme des outils informatiques utilisés pour soutenir la prise de décision. Une définition étroite est par exemple le fait qu'on considère le moteur d'inférence l'élément vital dans un S.A.D. [SPR 87]. Une définition plus révélatrice de l'image d'un S.A.D. est : un système d'organisation interactif.

Traditionnellement un S.A.D. est décrit par la définition de ses composantes : base de donnée, moteur d'inférence et l'interface utilisateur.

Il serait aussi intéressant de donner les conditions requises pour assurer qu'un S.A.D. soit approprié, c'est à dire répondre à la question : Quand et pourquoi un S.A.D. ?

2.2.1 Régularité et valeur :

Le besoin d'une situation d'organisation et de planification régulière combinée à des gains potentiels suffisant est vital, car sinon il n'est pas économique en termes de temps de calcul et d'argent, de développer un S.A.D.. Cette condition s'applique à tout système d'information.

2.2.2 Complexité :

Si une recette claire est disponible pour la description du chemin à suivre pour créer un plan acceptable, il est suffisant de développer seulement un plan générateur automatisé en suivant cette recette. Le fait qu'un nombre important d'objectifs et de contraintes existent, cela implique qu'il est improbable de trouver la solution optimale ou même une bonne solution sans l'aide de techniques et de modèles de recherche opérationnelle. Toutefois, si le fait que les objectifs et les contraintes soient difficiles à quantifier cela implique que le jugement humain et son expérience sont nécessaires pour obtenir un plan acceptable.

2.2.3 Programmeurs habiles :

Si les deux faits précédents ne sont pas remplis, on remplacera le S.A.D. par un système de décision automatisé ou encore mieux remplacer les programmeurs par d'autres plus habiles et qualifiés. On considère cette attitude trop rigide car elle exige un jugement a-priori sur la qualité des programmeurs et rejette le fait qu'un S.A.D. soit un outil scientifique.

Ce qui fait qu'un S.A.D. doit viser une combinaison optimale entre les qualités des stratégies de solutions formelles et les qualités d'un programmeur professionnel et habile, car dans plusieurs situations de décisions complexes, des stratégies de solutions formalisées sont d'une grande aide, sauf que dans certains cas il est difficile d'énumérer tous les objectifs et restrictions qu'un outil efficace doit contenir, ce qui fait appel ainsi à une intervention humaine par la présence de programmeurs professionnels, qualifiés et habiles.

3. Division du problème :

Le problème de programmation d'équipages d'avions est subdivisé en deux parties :

- Programmation des rotations d'équipages d'avions.
- Programmation individuelle des membres d'équipages d'avions.

PREMIERE PARTIE :

3.1 Programmation des rotations d'équipages :

Il existe quatre approches possibles pour le problème de programmation des rotations d'équipages d'avions. Nous pouvons les regrouper comme suit :

- Approche d'optimisation locale.
- Approche par sous-problème (séquentielle).
- Approche globale.
- Approche par la méthode de génération de colonnes.

3.1.1 Historique:

Il existe deux principales composantes au problème de rotations d'équipages :

- Génération de rotations réalisables.
- Optimisation de problèmes de partitionnement ou de recouvrement.

La méthode la plus ancienne et utilisée le plus souvent par les compagnies aériennes pour générer un ensemble de rotations et en dériver le programme final, est celle qui a été élaborée par IBM. Cette méthode est basée sur les travaux de Rubin (1973) qui consiste à résoudre une série de sous-problèmes, générer des programmes optimaux pour un grand nombre de combinaisons de problèmes relativement petits, ayant quelques centaines de rotations et moins de trente segments de vol, et de combiner ensuite les solutions. Cette méthode fournit une solution réalisable utilisable en pratique, mais on ne possède pas assez d'information sur la différence qui nous sépare de l'optimum.

important de se rappeler la distinction entre "tronçon" (étape ou segment de vol) et "service de vol".

Une rotation se compose d'une suite de services de vol séparés par des temps d'arrêt hors base, et chaque service de vol se compose d'une suite de tronçons.

1- Contraintes considérées lors de la constructions des services de vol à partir de tronçons

- Les limitations par service de vol sont fixées auparavant.
- Le nombre maximal d'étapes (tronçon) pouvant être effectuées en fonction au cours d'un même service de vol est limité à 04.

2- Contraintes considérées lors de la construction des rotations à partir de service de vol

• 2.(a) Un premier ensemble de contraintes sur les temps d'arrêt en escale séparant deux services de vol sv_i et sv_j d'une rotation (données en annexe). ces contraintes rendent le problème fort complexe. La difficulté tient ici du fait que la valeur minimale admissible du temps d'arrêt en escale ne dépend pas seulement des deux services de vols sv_i et sv_j mais également des services de vol ayant précédé sv_i . En raison de cela, nous disons de ces contraintes qu'elles sont des contraintes de second ordre.

• 2.(b) Dans le cas particulier où le temps d'arrêt en escale séparant deux services de vol sv_i et sv_j est un arrêt nocturne réduit, le total des étapes pouvant être effectuées, tant en fonction qu'en mise en place pendant les deux temps de service de vol est limité à 05. Il est facile d'introduire cette contrainte dans le modèle car elle est une contrainte du premier ordre. En effet cette contrainte dépend seulement des deux services de vol sv_i et sv_j .

• 2.(c) Il n'est pas programmé plus de 02 nuits consécutives de vol en fonction ou en mise en place.

Les résultats d'utilisation de la méthode de génération de colonnes a été développé pour la construction d'un ensemble optimal de rotations d'équipages, dans le contexte particulier du personnel navigant commercial long courrier.

Nous pouvons conclure et dire que cette méthode ne peut être utilisée que pour un nombre de rotations limité, car la représentation d'un très grand nombre de segments à assurer sur un réseau s'avèrera plus difficile.

Historiquement il existe deux grandes approches pour la génération de sous-ensembles des programmes réalisables. La première approche utilisée dans le logiciel TRIP (Trip Reevaluation and Improvement Program) d'American Airlines consiste à fournir premièrement une solution initiale réalisable conçue manuellement ou en utilisant une procédure automatisée, puis on choisit aléatoirement un ensemble de rotations recouvrant un certain nombre de segments. Pour ces derniers segments on génère toutes les rotations possibles. On définit ainsi le nouveau problème de partitionnement, et on le résout ensuite. Si la solution obtenue est meilleure que la précédente, on remplace les rotations obtenues dans la solution courante et on refait le processus jusqu'à ce que le temps de calcul soit épuisé.

Un autre logiciel utilisée par Northwest Airlines, US Air et Continental Airlines est mathématiquement similaire à TRIP sauf qu'on démarre d'une solution initiale très coûteuse qui affecte un équipage pour chaque segment de vol. Le générateur génère premièrement tous les services de vol possibles, et l'optimiseur est un algorithme d'énumération intelligent.

Une approche alternative à la sélection de sous-problèmes est de considérer l'ensemble complet de segments, mais une génération exhaustive de toutes les rotations possibles et réalisables n'est pas possible. On génère alors, aléatoirement un ensemble de rotations qui soit représentatif de l'ensemble complet, en utilisant des règles d'échantillonnage en faveur des rotations à faible coût. Une fois qu'un nombre représentatif soit généré on résout le sous-problème, et on réitère le processus jusqu'à ce qu'on ait expiré le temps de calcul ou jusqu'à l'atteinte de la convergence.

Une plus récente approche à la génération de rotations est basée sur la théorie des graphes, et consiste à générer en premier lieu tous les services de vol à partir des segments de vol fournis, on crée ainsi un réseau où chaque noeud représente un service de vol, et des arcs reliant les services de vol de telle manière à avoir des rotations valides. On démarre d'une solution initiale faite en général manuellement et un problème de recouvrement est résolu, puis à chaque ligne du problème, c'est à dire à chaque segment un multiplicateur du simplexe (variable duale optimale) est associée, ce qui fait qu'on calcule pour chaque noeud une longueur qui est égale à la somme négative des multiplicateurs des segments du service de vol concernant le noeud. Un problème de plus court chemin sur le réseau est résolu pour avoir des coûts réduits négatifs des rotations d'équipages, quelques sous-ensembles de ces rotations sont ajoutées et le problème de recouvrement est re-optimisé. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'on n'est plus de coûts réduits négatifs.

3.1.2 Première approche : Approche d'optimisation locale :

3.1.2.1 IBM:

Une solution initiale est établie manuellement (en se référant généralement au programme du mois précédent). Cette solution est améliorée grâce au programme TPACS (Trip Pairing And Crew Scheduling) développé par IBM qui accomplit des stratégies d'optimisation locale (2-opt ou 3-opt). Deux ou trois rotations sont choisies préalablement. On procède à un réarrangement des segments (tronçons), composant ces

rotations dans le but d'obtenir de nouvelles rotations à plus faible coût que les précédentes. Si c'est le cas on les remplace dans la solution courante, et on continue le processus jusqu'à ce que toutes les combinaisons soient effectuées. Les solutions obtenues sont de même qualité que des optimums locaux 2-opt (3-opt).

3.1.3 Deuxième approche : Approche par sous-problème

3.1.3.1 *American Airlines*:

Le problème à American Airlines a été soulevé à cause des coûts élevés du PN (le salaire moyen d'un pilote dans la majorité des compagnies américaines est de 80.000\$ / an). C'est parcequ'il existe toujours une marge entre les **heures de vol réellement effectuées** et les **heures payées** : cette différence est désignée par le **crédit time**. Ce dernier devient encore plus important pour des rotations s'étalant sur plusieurs jours ; où le montant de temps de vol est faible.

Le problème débute à partir de la publication du programme de vol de la compagnie qui inclut le nombre de vols, leur nature ce qui veut dire : type d'appareil utilisé, station de départ et d'arrivée et les horaires. Les rotations sont construites sur la base d'un ensemble de vols assurés par un type d'appareil bien spécifié. Les rotations sont établies de telle façon à ce qu'elles recouvrent tous les vols programmés, une et une seule fois (on peut admettre des vols de mise en place). Chaque rotation doit commencer et se terminer à une base d'affectation PN, doit respecter les limitations de la direction de l'aviation civile et du protocole d'accord, et, l'inclusion du nombre d'heures de travaux au sol à l'intérieur des limites.

Pour une flotte donnée une solution initiale est établie pour couvrir les segments (tronçons) quotidiens (plus de 04 fois par semaine) ; ceci est nécessaire car les programmes sont plus souples et les tailles du problème plus petites lorsqu'on considère seulement les vols quotidiens, puis on isole les vols non quotidiens (04 fois au plus par semaine), les autres vols sont annulés du groupe car ils opèrent sur différents jours dans la semaine ou opèrent qu'une seule fois, ou parfois en des dates spécifiques. L'optimisation des rotations "non" quotidiennes est similaire à l'optimisation des rotations quotidiennes, mais les gains sont moins importants.

Approche de modélisation et de résolution :

Une fois que les règles de travail et les paramètres du coût sont fixés et définis de manière suffisante, l'optimisation des rotations d'équipages peut être formulée en PLNE en problème de partitionnement (SPP).

$$\text{MIN } \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

sous contraintes :

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = 1 \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \in \{ 0, 1 \}, \quad j = 1, \dots, n$$

où

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{si la rotation (colonne) } j \text{ est dans la solution optimale} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la rotation } j \text{ recouvre le segment } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Presque tous les programmes existants d'optimisation des rotations utilisent la formulation en SPP. Une formulation en SCP est aussi bonne mais présente des difficultés d'interprétation, quand un segment est recouvert plus d'une fois. Dans de telles circonstances une occurrence de la ligne représentera un segment de vol, et les autres comme des vols de mise en place. Mais le fait que le générateur de rotations traite toutes les occurrences comme des vols, les coûts des colonnes (rotations) peuvent être mal estimés, et la solution optimale peut être sous optimale. La formulation en problème de recouvrement est valide lorsque la différence de coût entre un segment de vol et un segment de mise en place est faible [BOR82].

En réalité on ne peut atteindre l'optimum que pour de petites flottes (moins de 200 segments). On sera confronté à des problèmes combinatoires complexes lorsque le nombre de segments dépasse ce chiffre. Il est donc nécessaire de diviser le problème en sous problèmes aussi grands que le permet les ressources micro dans la résolution (puissance du processus, stockage de contraintes, conception du logiciel).

La procédure d'optimisation est comme suit : en utilisant une heuristique le programme d'optimisation, choisit un sous ensemble de rotations à résoudre parmi la solution initiale fournie, les rotations ainsi sélectionnées forment un sous problème à résoudre. On génère donc toutes les rotations (colonnes) possible couvrant tous les segments du sous ensemble sélectionné. L'optimiseur est chargé donc de résoudre ce sous problème en trouvant l'ensemble de rotations recouvrant à moindre coût les vols correspondants. S'il y'a amélioration, les nouvelles rotations remplacent les anciennes, et sont donc assemblées ensuite avec les rotations précédentes non incluses dans la résolution du sous problème. L'ensemble de rotations ainsi obtenu forme la solution du moment, le processus est répété une seconde fois en choisissant un nouvel sous ensemble de rotations, jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint, par exemple limite de temps de calcul ou toutes les combinaisons ont été essayées [RUB73].

Une sélection intelligente de rotations pour résoudre un sous problème a été étonnamment difficile, et une sélection aléatoire n'est pas biaisée et assure qu'une rotation peut être utilisée dans plusieurs sous problèmes, l'aspect perplex est qu'il n'a pas été trouvé mieux qu'une stratégie de sélection aléatoire.

La génération de colonnes est accomplie par une recherche lexicographique en arborescence ; les segments sont ordonnés par rapport au temps et par rapport aux

stations. Commenant par le premier départ d'une base de personnel navigant, l'algorithme cherche la première connexion légale à faire à l'arrivée du dernier segment ajouté. Si l'arrivée du dernier segment ajouté est la même que le départ du premier segment de départ, alors une rotation a été créée et écrite dans un fichier. Si de plus, le rajout d'un segment particulier résultera à une illégalité de n'importe quelle nature, alors la recherche est terminée dans cette branche, quand toutes les branches sont stériles alors toute colonne possible a été créée.

Pour avoir une bonne solution le développement de la partie génération de colonnes est le pas le plus crucial dans la construction d'un système d'optimisation efficace.

Les capacités du programme d'optimisation dépendent de la qualité du générateur de colonnes et de l'algorithme de résolution. Le générateur doit être écrit pour chaque application de rotations d'équipages en veillant à incorporer correctement toutes les règles de travail et les contraintes de prédecession, alors que le logiciel de résolution est commun.

Il est à remarquer que des gains en frais PN (même de petites améliorations) justifient largement l'utilisation d'un cycle informatique pour traiter les problèmes de programmation d'équipages.

Quelques firmes seulement ont délaissé les techniques de R.O. pour des heuristiques à grande étendue, ou des approches d'intelligence artificielle. L'avantage de cette approche est qu'on n'a plus besoin de résoudre des sous-problèmes mais directement le problème en entier.

Toutefois les techniques d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour trouver quel sous-problème résoudre ; se basant sur la réussite ou l'échec dans le calcul précédent. Ce qui pourra faire gagner en efficacité.

L'implémentation de la formulation théorique est rarement un travail simple, et souvent les problèmes de réalisation sont plus difficiles à résoudre que le problème d'origine. En utilisant une approche de programmation linéaire, on est exposé à des solutions non entières, les techniques d'énumération peuvent éviter ceci, mais sont incapables de résoudre de larges problèmes comme le peut la programmation linéaire.

A chaque fois que la taille d'un sous-problème grandit, les chances de résoudre le problème dans son intégralité grandit aussi.

A AMERICAN AIRLINES pour des problèmes de moins de trente segments, la probabilité d'avoir des solutions non entières est proche de zéro, pour 50 à 75 segments la probabilité est de 2 à 7 %, pour 100 segments elle est de 20 %, et dans les cas où on a résolu de grands problèmes la probabilité est certaine d'avoir des solutions non entières.

Dans une autre optique de résolution du problème, il a été essayé de voir comment résoudre le problème en entier. Mais il a fallu appliquer des heuristiques pour assurer que le nombre de colonnes générées est représentatif de l'espace d'état des solutions (car sinon on aurait à générer des millions de colonnes pour tous les segments). D'autres heuristiques sont employées pour trouver un ensemble de colonnes qui recouvrent un ensemble disjoint de lignes, puis chercher seulement l'ensemble optimal de rotations pour les lignes non incluses dans l'ensemble disjoint, ceci produit une borne inférieure réalisable de la solution qui peut être améliorée en ciblant les rotations à coût important. Les résultats obtenus n'ont pas été compétitifs (car prendre l'ensemble entier de lignes

exige la génération d'un bon mais non exhaustif ensemble de colonnes), et il y'a clairement plus de problèmes d'implémentation avec cette approche.

Si on inclut aussi les contraintes de base (considérer plusieurs bases d'affectation P.N) dans la matrice des contraintes, le problème n'aura plus les caractéristiques d'un SPP, ce qui rendra certain l'obtention d'une solution non entière, et la solution de la non intégralité sera difficile.

Il a été utilisé donc une heuristique avec facteurs de pondérations pour déplacer dynamiquement la solution à une autre qui satisfait les contraintes de base .Si par exemple une base exigerait 100 à 150 heures de vol sur une durée, mais le programme d'optimisation en a prévu seulement 90, alors on réduira les coûts des rotations de cette base pour augmenter les chances d'en avoir plus dans la solution optimale, et au contraire si on a plus de rotations qu'il n'en faudrait dans une base, on appliquerait une surcharge sur les coûts correspondants. Le programme va réitérer à travers des ensembles de facteurs de pondération jusqu'à ce qu'il trouve l'ensemble qui rencontrera les contraintes à toutes les bases. (ces facteurs varient de 0.9 à 1.1)

Les résultats obtenus grâce à l'application de TRIP ont permis de faire passer le 'credit time' de 14.7 % à 5.2 %, le gain est ainsi de 45 millions \$.

Pour de petites ou moyennes flottes, il est évident que le programme courant arrive à une solution optimale. Il est à noter que la résolution des premiers sous-problèmes pour un problème donné présente une grande amélioration en changeant un grand nombre de rotations. Les sous-problèmes suivants présentent de petites améliorations suivies d'aucune modification, ce qui suggère qu'on est arrivé à un optimum global. Pour les grandes flottes présentant des problèmes de grande taille, les améliorations apparaissent ça et là, d'où on voit que d'autres gains sont encore à trouver dans de telles flottes. Ce qui fait qu'un travail futur à envisager sera concentré sur la résolution de problèmes de rotations d'équipages de grande taille.

Même si le problème d'optimisation est résolu, il reste toujours de sérieuses opportunités pour réduire les coûts PN à travers des manipulations créatives de programmation. On remarque que par exemple la légalisation d'un vol en l'ajoutant à une rotation alors que normalement ça aurait été illégal, peut réduire considérablement les coûts PN. La recherche de telles opportunités s'est avérée difficile car elle peut toucher la réglementation PN.

3.1.3.2 United Airlines :

United a presque 2000 vols à assurer par jour. Près du coût carburant, les coûts d'équipages représentent la composante la plus importante pour une compagnie aérienne. La programmation d'équipages d'avions inclut l'assemblage des segments de vol sur plusieurs jours en des itinéraires de voyage ou "rotations" qui deviennent les affectations de base des navigants.

Une construction non étudiée pour les rotations entraîne l'apparition du "credit time", pour lequel le PN est payé en addition de l'actuel montant de vol, de plus ce credit time est compté dans le temps de travail mensuel du navigant.

Des économies de 0.1 % dans le credit time entraînent des gains de 500.000 \$ / mois pour la compagnie.

Le problème est ainsi réduit à la recherche d'un ensemble de rotations qui recouvrent tous les segments de vol à coût minimum.

Le problème est formulé en problème de partitionnement intégrant les contraintes de bases (voir annexe B).

Le nombre possible de rotations est astronomique pour de grandes flottes, qui est un des facteurs qui rend les problèmes de programmation d'équipages difficiles à résoudre.

• Approche de modélisation et de résolution :

Le système utilisé pour la résolution du problème précédent est doté d'un optimiseur qui a recours à son tour à un générateur. Le générateur crée les rotations et les envoie comme variables pour la résolution du modèle. L'optimiseur cherche un ensemble disjoint de rotations qui recouvre tous les segments de vol à coût minimum. Pour améliorer la solution le générateur utilise les informations données par l'utilisateur ou par le déroulement du processus d'optimisation.

Le générateur :

Le générateur crée des rotations représentatives du réseau réel, à partir du réseau de vol, qui comprend tous les départs, arrivées et connexions. En considérant un ensemble de segments, le générateur crée le réseau correspondant en représentant les départs et les arrivées comme des noeuds, et les connexions (des couples origine-dédestination) comme des arcs.

Le générateur énumère sur le réseau toutes les possibilités. Ce processus est contrôlé par : le temps, la réglementation, et les règles d'heuristiques. Le générateur peut utiliser une énumération : avancée ou interne.

Les règles d'heuristiques sont surtout utilisées pour avoir : des solutions disjointes, la limitation du nombre de fois qu'un segment soit utilisé, le temps de connexion, le nombre de services de vol, le nombre de rotations, le temps d'énumération, ou bien pour se concentrer sur un certain ensemble de segments.

L'optimiseur :

Au lieu de résoudre le problème relaxé en entier, on résout un ensemble de sous-problèmes. Un sous-ensemble de variables est sélectionné pour créer un sous-problème, le solveur résout le sous-problème relaxé. Si la solution n'est pas entière on utilise les méthodes de coupes de Gomory. La décision d'arrêter les coupes est basée sur le nombre de coupes générées, et/ou les tailles maximales des coefficients de coupe, ou encore si la valeur objective optimale du sous-problème est supérieure à la valeur de la fonction objective courante, ou bien sûr si la solution est entière. Si les coupes de Gomory n'arrivent pas à stériliser le sous-problème, on utilise l'énumération en bloc qui consiste à classer les rotations en groupes ayant le même segment de départ, ce qui fait qu'on obtient la solution optimale en prenant une rotation de chaque bloc.

Après qu'un sous-problème soit résolu, l'ensemble de toutes les rotations est retenu, et un autre sous-problème est créé. De cette manière on résout une séquence de sous-problèmes ayant chacun jusqu'à 1700 contraintes, et en prenant compte les améliorations quand elles apparaissent.

1. Stratégies de résolution :

Mode 1 :

Démarrant de zéro le générateur prend tous les segments pour faire une énumération interne pour chaque segment ; un autre coût est associé aux rotations qui dépend du montant de la période de service de vol dans la rotation, si ce coût est inférieur au coût estimé alors la rotation est écartée.

Du générateur on passe à l'optimiseur qui cherche à trouver une solution disjointe, mais généralement ceci n'est pas possible en un premier passage. On prend donc une portion de la solution obtenue qui recouvre juste une partie des segments, le reste des segments constitue l'ensemble résidu.

Mode 2 :

Le générateur se concentre sur l'ensemble résidu de la meilleure solution obtenue auparavant. Le générateur accomplit une énumération interne en prenant chaque segment de l'ensemble résidu comme segment principal, on retourne après à l'optimiseur et on obtient un nouveau ensemble résidu. On continue le processus jusqu'à ce que l'ensemble résidu soit vide.

Mode 3 :

Le programmeur peut accomplir des minimisations locales 2-opt ou 3-opt sur des sous-ensembles de rotations optimales, ici une énumération complète est effectuée en prenant 2 ou 3 rotations à chaque fois. Ces améliorations diffèrent de l'approche d'IBM car les rotations améliorées ne sont pas directement remplacées dans la solution mais sont retenues et envoyées comme variables à l'optimiseur pour résolution.

On peut aussi accomplir des minimisations n-opt en sélectionnant aléatoirement n rotations de l'ensemble des rotations optimales.

Mode 4 :

On accomplit des minimisations n-opt sur des sous-ensembles des rotations optimales, la meilleure solution est mise à jour à chaque fois qu'un essai fournit une amélioration, ceci est similaire à ce qu'accomplit TRIP.

Mode 5 :

S'il y'a des changements à cause de différents facteurs, le générateur peut vérifier la validité des rotations établies auparavant, puis on utilise mode 2 pour avoir une solution disjointe pour les segments associés aux rotations non valides.

3.1.4 Troisième approche : Approche globale

L'approche globale au contraire de l'approche séquentielle tente de résoudre le problème en entier dès le début pour essayer de palier à la sous-optimalité qui peut être engendrée en divisant le problème, parmi les plus intéressantes méthodes rencontrées on observe :

- TRIP amélioré.
- Branch and Cut.

3.1.4.1 TRIP amélioré :

Plusieurs millions de rotations sont tout d'abord générées, un programme linéaire correspondant peut être construit en créant une colonne pour chaque rotation, et une ligne pour chaque segment. Les contraintes exigent que chaque segment doit être recouvert une seule fois exactement, le coût d'une variable associée à une rotation est le total du coût excédentaire de la rotation incluant les pénalités. Le problème linéaire en nombres entiers résultant est formulé comme un problème de partitionnement.

La relaxation de ce programme linéaire relaxé $x_j = 0$ ou 1 à $0 \leq x_j \leq 1$, donne des valeurs fractionnelles aux variables, ainsi un segment peut être recouvert par des valeurs fractionnelles de deux ou plusieurs rotations. Pour cette raison la solution est inutilisable en pratique, en plus ce problème linéaire de partitionnement est largement connu pour être une classe de problèmes linéaires difficiles à résoudre.

La méthode consiste à générer en 1^{er} lieu un grand nombre de variables (plusieurs millions de rotations), ce qui rend le problème plus difficile à résoudre, puisqu'on sait que même des petits problèmes de partitionnement sont difficiles à résoudre.

La méthode exige ensuite de résoudre une série de sous problèmes dont la taille moyenne est de cinq mille colonnes.

Ces 5000 colonnes sont sélectionnées à partir des variables de la base optimale du sous problème précédent. La sélection de ces colonnes se fait en triant les variables en paquets en se basant sur les coûts réduits ; puis on remplit le sous problème par les meilleurs paquets.

Avec l'application de cette méthode, il a été obtenu des solutions faiblement dégénérées (25%), alors que pour les sous méthodes classiques la dégénérescence a été de près de 80%.

Solutions entières :

Le problème de trouver une solution entière a été plus difficile de ce qui avait été envisagé. Pour de petits problèmes, en arrondissant (en se rapprochant de la valeur "une") et résoudre ensuite, a permis d'avoir des solutions entières pour le programme linéaire. Toutefois cette approche ne s'applique pas pour des problèmes de grande taille, car les petits sous-problèmes résultants deviennent éventuellement irréalisables. Les techniques de Branch and Bound se sont avérées aussi insuffisantes même pour de petits sous-problèmes, car l'arbre de branch and bound développe un déséquilibre dans le mécanisme des bornes, il est rarement efficace, spécialement au niveau de la branche où la variable lui est affectée la valeur zéro.

Ce qui fait qu'il a fallu développer un programme spécial qui exploite la connectivité du programme de vol pour verrouiller les segments connectés. Quand chaque segment peut être connecté à un unique segment, une solution entière a été trouvée.

La nouvelle structure de branchement qui a été utilisée est celle de *Ryan*.

Les branches de Ryan représentent des branches de contraintes. Ces dernières ont été particulièrement efficaces dans la résolution des solutions fractionnelles dans les problèmes de partitionnement. Ce type de branches étaient aussi discutées, traitées dans le contexte de problème de recouvrement. Le principe est de désigner au niveau de chaque solution fractionnelle optimale de n'importe quel noeud de l'arbre de Branch and bound, une paire de contraintes.

conclusion :

Cette approche globale tend à éviter une optimalité locale et permet à TRIP de faire plus d'améliorations. On a observé que pour les problèmes tests résolus la valeur objective a été nettement améliorée par rapport à la solution de l'ancien programme.

Ainsi cette nouvelle approche s'est prouvée par elle même et ouvre les possibilités d'obtenir une optimalité globale pour les problèmes de rotations d'équipages.

3.1.4.2 Branch and Cut :

L'approche de Branch and Cut contient : une phase de prétraitement qui réduit et étudie la formulation donnée du problème en utilisant, une heuristique qui fournit de bonnes solutions réalisables rapidement, une procédure de génération de coupes qui ressère la relaxation du P.L, et une stratégie de branchement qui sélectionne à chaque fois la prochaine variable à brancher. Les recherches antérieures ont montré que l'incorporation de ces composantes dans l'algorithme de résolution (solver) a résolu des classes de problèmes difficiles d'optimisation combinatoire.

L'optimiseur a été conçu pour résoudre des problèmes de partitionnement avec contraintes de base, ayant un grand nombre de variables 0-1, et peut être utilisé comme heuristique pour rechercher des solutions réalisables raisonnables et de correctes bornes inférieures à la valeur de la solution optimale.

L'algorithme de Branch and Cut [*présenté en annexe B*] a été utilisé sur 55 problèmes réels (dont 13 avec contraintes de bases) fournis par 04 compagnies aériennes. On conclut (d'après la qualité des résultats obtenus) qu'il est possible de résoudre jusqu'à l'optimum des problèmes de partitionnement de grandes tailles. Et en plus de la technologie d'aujourd'hui, il est possible de résoudre le problème en entier en un seul problème d'optimisation, et que la génération de colonnes similaire à celle employée pour le T.S.P (Padberg 91) peut être développée pour la résolution des problèmes de rotations d'équipages. Ceci permet de prendre en entier des problèmes de grande dimension par une manière itérative qui garantit une convergence globale, mais n'exige pas de générer toutes les colonnes et les utiliser dans la résolution.

3.1.5 Quatrième approche : Approche par génération de colonnes

AIR FRANCE a adopté une toute nouvelle approche pour la résolution du problème d'optimisation des rotations d'équipage d'avions : utilisation de la technique de génération de colonnes [LAV88]. Le problème est formulé comme un problème de programmation linéaire en nombre entier correspondant à un problème de recouvrement : chacune des colonnes de la matrice de contraintes de ce problème linéaire représente une rotation recouvrant un ensemble de tronçons. Il s'agit de générer un ensemble de rotations qui recouvre chaque segment (tronçon-étape) au moins une fois, et cela à un coût minimum. A cause du très grand nombre de rotations, ce problème de recouvrement ne peut être résolu directement. Le nombre de colonnes de la matrice des contraintes A est tellement élevé qu'elle ne peut être complètement explicitée a-priori. La matrice A est considérée connue implicitement, et la résolution du problème se fait par un algorithme de génération de colonnes [*défini en annexe B*].

Cet algorithme ne diffère de l'algorithme "ordinaire" de la programmation linéaire que par la méthode de sélection de la variable (colonne) entrant dans la base. On utilise un

algorithme : **algorithme générateur** [défini en annexe B] pour déterminer la variable (colonne) entrante dans la base. L'algorithme de génération de colonne consiste alors à rechercher parmi l'ensemble de toutes les rotations, une rotation s de coût minimum, pour devenir une variable de base. Or, ce minimum peut être obtenu sans qu'il soit nécessaire d'énumérer toutes les colonnes (rotations), par la recherche d'un plus court chemin sur un graphe G (défini plus bas). Il s'agit en fait d'un **problème de plus court chemin avec coûts non linéaires et contraintes supplémentaires**. Ce type de méthodologie a déjà été utilisé dans d'autres contextes comme les problèmes de générations de routes de véhicules, satisfaisant des contraintes d'horaires ou les problèmes de roulage dans les réseaux de télécommunication.

3.1.5.1 Définition du graphe :

Considérons le réseau $G = (N, A)$

Dont la source et l'extrémité représente une même base d'affectation, et les noeuds intermédiaires représentent les tronçons. L'arc $(i, j) \in A$ si et seulement si le lieu d'arrivée du tronçon i est le même que le lieu de départ du tronçon j , et l'heure d'arrivée du tronçon i précède l'heure de départ du tronçon j [en annexe construction du réseau].

t_i = Temps de vol associé au noeud i .

t_{ij} = Temps d'arrêt entre les noeuds i et j .

Le coût d'une rotation est défini de la façon suivante :

$$TA + RPC(TA, \sum PV)$$

où

TA : Temps d'absence associé à la base.

$\sum PV$: Somme des périodes de vol des services de vol constituant la rotation.

RPC : Repos post-courrier qui est une fonction non linéaire de TA et $\sum PV$.

3.1.5.2 Contraintes supplémentaires :

Nous devons considérer tout un ensemble de contraintes pour la construction d'une rotation.

D'abord une séquence de tronçon ne peut constituer une rotation que si elle obéit à un certain nombre de règles simples du type :

- Dans une rotation donnée, le tronçon j est effectué immédiatement après le tronçon i , alors la base de départ du tronçon j doit être la même que la base d'arrivée du tronçon i , et l'heure de départ de j doit être postérieure à l'heure d'arrivée de i .
- La rotation doit vérifier un ensemble de règles plus complexes limitant le nombre d'étapes (tronçons) de la rotation et assurant des temps d'arrêts en escales suffisants.
- D'autres contraintes sont prises en considération, lors de la construction de la rotation : le règlement de travail lié au personnel navigant. Pour comprendre ces règles, il est

DEUXIEME PARTIE

3.2 Programmation individuelle du PN :

3.2.1 Le bidline système :

Chaque mois à American Airlines (et dans la majorité des compagnies aériennes américaines) le personnel navigant choisit le programme qu'il souhaiterait effectué le mois prochain, selon le classement professionnel (liste de séniorité). Les programmeurs doivent assembler pour le P.N des paquets de vols. Ces derniers ou "bidlines" sont construits de telle manière à garantir un personnel adéquat pour l'exécution de tous les vols programmés. Les blocs de base utilisés pour construire les bidlines sont des séquences de vols connues sous le nom de rotations. Chaque bidline représente un mois de travail pour un ou plusieurs membres d'équipages, et doit être conforme aux règles légales et contractuelles d'aviation. Les règles légales sont conçues pour minimiser le risque d'accidents dûs à la fatigue et au surmenage des membres d'équipages. Ces règles fixent le temps de vol maximal par jour, par semaine, et le temps de repos entre des périodes de service .

Les règles contractuelles généralement traitent avec les salaires garantis et les conditions de travail. Elles contrôlent le montant du temps de vol payé par mois et garantir un nombre fixe de jours de repos par mois.

En plus de la conformité aux règles, les programmeurs doivent construire les bidlines en tenant compte de plusieurs critères, par exemple : maximiser l'utilisation de chaque navigant ; distribuer uniformément le travail à travers un mois pour chaque bidline, et minimiser les chances de vols manqués dus à des erreurs du P.N en distribuant les jours de service et de repos uniformément.

Ce travail de programmation était fait manuellement à American Airline mais avec les exigences d'aujourd'hui, American Airline a décidé de créer un système automatisé qui construit les bidlines interactivement.

En développant un système expert, on doit tout d'abord acquérir des connaissances suffisantes sur le processus à automatiser, pour faire des décisions conçues intelligemment, après être arrivé à une compréhension initiale du problème. Deux parties fonctionnelles ont été identifiées.

La première section "DEAL" crée un ensemble initial de bidlines à partir des rotations obtenues du programme TRIP. Ces bidlines sont construites en conformité avec la réglementation en vigueur. Elles ressemblent au schéma des rotations et sont utilisées comme point de départ dans le processus de construction des bidlines.

La seconde section "SWAP" utilise les bidlines produites dans DEAL comme une solution initiale ; à travers une série de mouvements et d'arrangements. On ajuste le temps de vol de chaque bidline jusqu'à ce qu'elles soient à l'intérieur de limites minimales et maximales.

Après plusieurs itérations suivies de corrections, il a été créé un modèle consistant en deux sections fonctionnelles opérant comme une boîte noire, sauf que ce modèle lui

manque encore une interface utilisatrice qui permettra aux programmeurs de construire les bidlines et altérer les résultats manuellement.

Section DEAL :

La génération de bidlines est le processus qui utilise les rotations d'équipages comme les blocs de base pour construire les programmes mensuels de travail pour chaque navigant. Des familles sont créées d'un groupe de rotations ayant des caractéristiques similaires et opèrent en des jours différents sur le mois. Un exemple d'une famille serait une succession de rotations de telle façon à couvrir chaque jour du mois. Occasionnellement une famille peut opérer sur une partie du mois, à cause de changement de programmes. Deux techniques sont utilisées pour combiner des familles incomplètes : la première technique examine chaque paire de famille pour déterminer la meilleure et exclusive combinaison, cette combinaison existe quand chaque rotation des deux familles débute sur un ensemble de jours mutuellement exclusif. Les deux familles peuvent être combinées en une seule ; la seconde technique examine les combinaisons possibles qui ne sont pas mutuellement exclusives mais résultent en des familles qui sont plus uniformément réparties sur le mois. Une fois qu'un ensemble de bidlines a été construit, chaque famille est utilisée pour construire un ensemble initial de bidlines.

La section DEAL détermine le nombre de bidlines possibles qu'on peut produire d'une famille de rotations en tenant compte d'un but d'utilisation à atteindre (le nombre moyen d'heures dans toutes les bidlines). On traite, ensuite les rotations dans cette famille comme un jeu de cartes, distribuant une rotation à chaque bidline possible. Plusieurs scénarios de bidlines sont construits pour chaque famille. Ces scénarios sont créés en variant le nombre de bidlines produits dans la famille et variant le nombre de rotations.

En utilisant plusieurs critères, règles et coûts fournis par l'utilisateur, DEAL tente d'évaluer la qualité des bidlines.

Section SWAP :

La section SWAP utilise les bidlines produites dans DEAL comme une solution initiale. Les temps de vol pour ces bidlines sont ajustées à travers une série de changements, jusqu'à ce qu'elles tombent à l'intérieur des limites minimales et maximales de temps de vol permis, ceci est fait en essayant d'améliorer ces bidlines par des arrangements avec des rotations d'autres bidlines. Chaque arrangement possible est considéré et comptabilisé, en utilisant un ensemble de règles et de coûts fournis par l'utilisateur, ces critères dépendent essentiellement de :

- Pureté :

Une bidline composée d'itinéraires de vol identiques, permettra au navigant d'avoir un programme consistant le long du mois, et diminue aussi les chances de rater un voyage à cause d'un programme confus .

- **Cadence** : Un modèle consiste en jours de services et de repos qui seront étalés uniformément durant le mois .

- **Légalité** : Les restrictions gouvernementales et contractuelles ne peuvent pas être violées et gouvernement : les tranches horaires des vols de la semaine, le nombre de jours

repos sur une ligne, et plusieurs autres facteurs. Aucune bidline n'est construite en violant les règles.

- **Problèmes de détérioration** : Rendant le problème plus difficile en faisant des changements, des sauvegardes sont ainsi construites dans des fonctions marquées, pour s'immuniser contre des changements qui n'améliorent pas la solution.

L'utilisateur fournit des coûts associés à ces critères et aux règles de légalité à travers un ensemble de paramètres qui sont introduits dans le programme. En ajustant ces paramètres l'analyste peut bien régler des bidlines résultant pour ressembler encore plus étroitement à celles produites par le processus manuel.

Deux paramètres contrôlent la taille de chaque problème. Le premier définit le nombre maximum de jours de différence en temps de départ pour deux rotations à arranger. Par exemple si une bidline contient une rotation qui débute le cinquième jour du mois et le paramètre est fixé à un, seulement les rotations débutant le 04, 05, ou le 06 jour du mois peuvent être transférées à cette bidline pour faire un échange de rotations. L'autre paramètre définit la différence minimale en temps de vol entre deux rotations si elles vont être échangées.

En ajustant ces paramètres, l'analyste peut contrôler le processus d'arrangement, en se basant sur sa connaissance du problème. Utilisant des règles et les coûts définis par l'utilisateur, chaque mouvement possible est considéré par SWAP. Le mouvement qui donne la meilleure amélioration dans la solution générale est choisi et exécuté. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les bidlines soient acceptables. Etant donné que SWAP tente de fixer seulement l'existant, il est important que la section DEAL produit des bidlines initiales de grande qualité.

Pour améliorer encore le modèle, plusieurs tests ont été effectués en essayant toutes les combinaisons possibles entre les paramètres du système (règles et coûts), pour avoir une bonne qualité de la solution et les effets sur le temps de calcul et de la réalisation de l'exécution.

Le développement de l'interface a été nécessaire pour rendre le prototype accessible aux utilisateurs et établir un chemin interactif pour pouvoir changer à la main les bidlines produites par le système. Il a été aussi développé un environnement interactif qui permet aux utilisateurs d'accomplir manuellement les fonctions exécutées par la section SWAP.

Finalement, un système de menus qui consiste en un ensemble d'écrans où l'utilisateur permet de choisir une fonction désirée, pour l'implémentation finale du système a été utilisé par les programmeurs d'American Airlines ; et plusieurs suggestions ont été prises en compte pour rendre le système opérationnel.

Résultats

Le système a permis à American AIRLINES un gain en productivité très important puisque la construction de bidlines est passée de 10 à 60, et a aussi permis aux managers d'éliminer les heures supplémentaires des programmeurs pour générer les bidlines. Ils ont senti que le système fournit une marge de sécurité qui permet de produire des bidlines de qualité.

3.2.2 Approche par partitionnement :

L'approche de résolution de problème de programmation individuelle de membres d'équipages d'avions utilisée par les compagnies nord-Américaines est basée sur le "bidline system". A partir de l'affichage du programme de vol, le personnel navigant choisit son programme en respectant l'ordre de séniorité. Le "bidline system" peut engendrer ainsi, une inéquité considérable entre les navigants .

Mis à part les compagnies nord-Américaines, plus particulièrement les petites compagnies aériennes essayent de produire des plannings satisfaisant une équité entre tous les membres d'équipages affectés dans un même type d'appareil. L'établissement des plannings de vol individuels en tenant compte de l'équité, représente un problème plus difficile avec une plus grande complexité combinatoire.

Pour cette raison, la plupart des compagnies adoptent pour la résolution d'équité entre les navigants des méthodes heuristiques séquentielles [RYA92] .

3.2.2.1 Modélisation mathématique :

- Il est clair que chaque membre d'équipage doit être affecté exactement une seule fois sur une ligne de travail, et que chaque vol doit être recouvert par un certain nombre suffisant de membres d'équipages .
- Pour chaque membre d'équipage pour un type d'avion donné, nous pouvons générer un groupe de quelques lignes de travail où une et une seule doit être choisie. Il est évident que pour chaque ligne de travail est affecté un coût.

Le problème de planning des membres d'équipages, peut être modélisé mathématiquement en utilisant des versions généralisées de modèle de partitionnement .
Considérons p membres d'équipages pour un même type d'appareil et t voyages (rotations), le modèle est divisé dans un groupe de p contraintes d'équipages [*formulation en annexe B*].

Le principe pris en compte est :

- Etablir un programme optimal pour chaque navigant .
- Couvrir toutes les rotations programmées.
- Avoir un équipage complet pour chaque rotation .

3.2.2.2 Génération et coût des lignes de travail :

La génération des lignes de travail est réalisée par des processus d'énumération direct pour chaque membre d'équipage. Pour chacun d'eux, la construction du programme de vol individuel, commence par l'établissement du squelette qui compte les congés préalables, séances de simulateurs, instruction au sol, formation, visite médicale, les jours de repos obligatoire, et les destinations dont il est sollicité spécialement ; ensuite d'autres vols sont ajoutés au squelette jusqu'à l'impossibilité d'insérer d'autres vols. Le processus d'énumération continue jusqu'à ce que toutes les lignes de travail programmées aient été toutes considérées. Il existe plusieurs règles et conditions de travail que les

programmes de vol doivent satisfaire. Une restriction particulière et importante à soulever est que le programme doit contenir au moins 10 jours de repos à la base, pour une période de service de 28 jours .

Pour des problèmes de programmation d'équipages, le modèle généralisé de partitionnement peut avoir jusqu'à 700 contraintes, et plusieurs dizaines et même des centaines de millions de variables. Puisque chaque membre d'équipage peut avoir plusieurs milliers de lignes de travail possibles. Heureusement qu'il existe des techniques pour réduire la taille du problème. Ces techniques sont basées sur le principe que chaque navigant doit lui être alloué le prochain voyage, le plus tôt possible après l'accomplissement de son dernier voyage, et le repos légal. Le problème réduit à un nombre de variable entre 20.000 et 200.000, et chaque navigant en moyenne a 500 lignes de travail possible.

La définition de la fonction objective n'est pas évidente, par ce que les compagnies aériennes opèrent souvent sur le premier programme qui a été construit. Il n'y a pas de mesures objectives traditionnelles avec lesquelles nous pouvons comparer alternativement les programmes. D'un point de vue minimisation des coûts, il est important de minimiser le nombre de navigants exigés pour couvrir toutes les rotations et de préserver une marge de sécurité en cas de rupture dans la solution. D'un point de vue des navigants, une préférence particulièrement importante est que la rotation de même type soit espacée par un nombre suffisant de jours. La séparation idéale, entre des rotations de même type peuvent être calculer en fonction : du nombre de membre d'équipages exigé pour couvrir de tels rotations, la fréquence avec laquelle apparaissent ces rotations, dans la période de programmation, et le nombre de personnel navigant dans ce secteur.

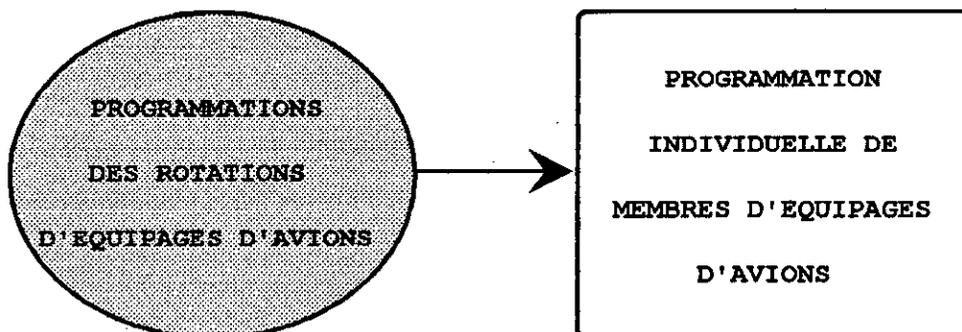
Lors de la construction d'une ligne de travail, si une rotation est allouée avant l'écoulement de l'intervalle de séparation idéale, depuis la dernière allocation de rotation de même type, le nombre de jours historiques violés représentent ainsi, le nombre de jour manquant de la séparation désirée. Une mesure de qualité d'un programme individuel, est donné par la somme des jours historiques violés de chaque rotation de la ligne de travail. La valeur objective, peut aussi refléter quelques préférences pour des lignes de travail, qui présentent un certain nombre de jours de repos (égal à la moyenne de jours de repos dans un secteur), et quelques rotations (égal au nombre moyen de rotation à accomplir pour chaque navigant). Ces deux valeurs moyennes peuvent être calculer avant que le processus de génération commence.

4. Conclusion :

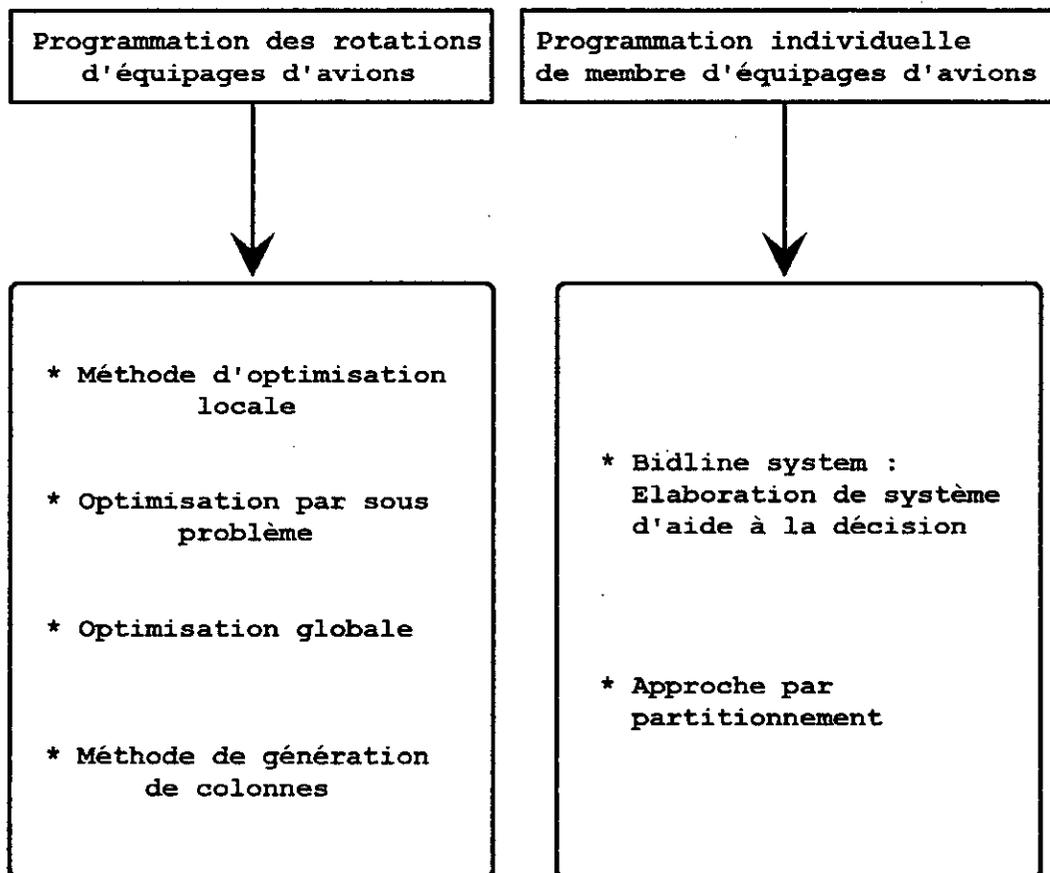
A travers notre revue de la littérature du problème de programmation des équipages d'avions qui n'est pas complète, mais du moins on a vu les méthodes les plus importantes, qui ont été implémentées dans les plus grandes compagnies aériennes au monde (American Airlines, United Airlines, Air France...), qui ont permis de réduire réellement les coûts, et qui sont encore utilisées par ces mêmes compagnies. On a constaté ainsi l'existence de deux classes de méthodes pour approcher et résoudre le problème ; chacune correspondant à une partie du processus de programmation du personnel navigant qui comme on le sait est constituée de deux phases qui s'exécutent en série. Ce qui fait que chacune des deux phases s'exécute, et se résoud séparément l'une de l'autre, même s'il y'a une grande interactivité entre les deux, car chacune concerne un problème précis ce qui nous laisse à conclure que le problème de programmation du personnel navigant est constitué de deux (02) problèmes différents.

Le premier est le problème d'optimisation des rotations d'équipages, et le second est la programmation individuelle des membres d'équipages. Puisque le premier problème se trouve en amont, sa résolution doit se faire en premier lieu car sa solution constitue l'input principal pour résoudre le second problème. Etant donné que la résolution du premier problème se fait manuellement à Air Algérie, il est à nos yeux nécessaire de commencer par résoudre le premier problème avant d'entamer le second, car ce dernier constitue un sujet pour un second projet de fin d'études, ce qui fait que pour nous il est impossible de résoudre les deux problèmes en l'espace d'une seule année. A la suite de notre mémoire on ne traitera que le problème d'optimisation des rotations d'équipages, étant donné qu'aussi la résolution du second problème ne constitue qu'une procédure de gestion, et que la phase optimisation où il y'a des gains et des économies à accomplir pour réduire les coûts est dans la première phase [GER 89].

Programmation du personnel navigant :



Méthodes de résolution :



TROISIEME PARTIE

La modélisation

Dans cette partie, nous modélisons le problème d'optimisation des rotations d'équipages d'avions en un problème de partitionnement, car c'est la formulation qui se rapproche le plus de la définition du problème.

Nous avons rejoint cette approche et présentons un modèle qui intègre trois sortes de contraintes qui sont les suivantes :

- *Les contraintes de recouvrement,*
- *Les contraintes de base,*
- *Les contraintes de réglementation.*

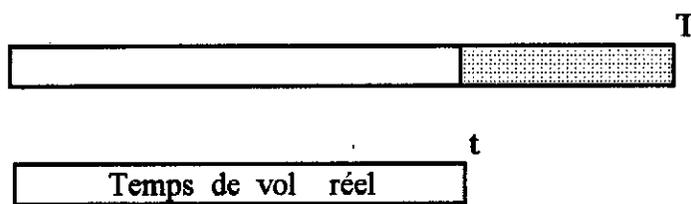
INTRODUCTION :

Aucun problème de l'univers ne peut être suffisamment simple pour être compris sans avoir recours à l'abstraction. L'abstraction consiste à remplacer le phénomène qu'on étudie par un modèle de structure semblable, mais moins complexe. Les modèles sont donc une nécessité fondamentale de la démarche scientifique.

Le modèle que nous proposons dans notre présent travail vise en premier plan à réduire les coûts du personnel navigant, et en second plan à automatiser une procédure de programmation qui se fait manuellement donc engendre certaines difficultés.

La question qui se pose alors est de savoir comment réduire à travers notre modèle le coût personnel navigant.

Il est à savoir par la nature de la rémunération Personnel Navigant que lors de l'exécution d'une rotation (voir la première partie), le personnel navigant est payé pour un certain montant d'heures de vol, alors que réellement il n'a effectué qu'un temps de vol nettement inférieur.



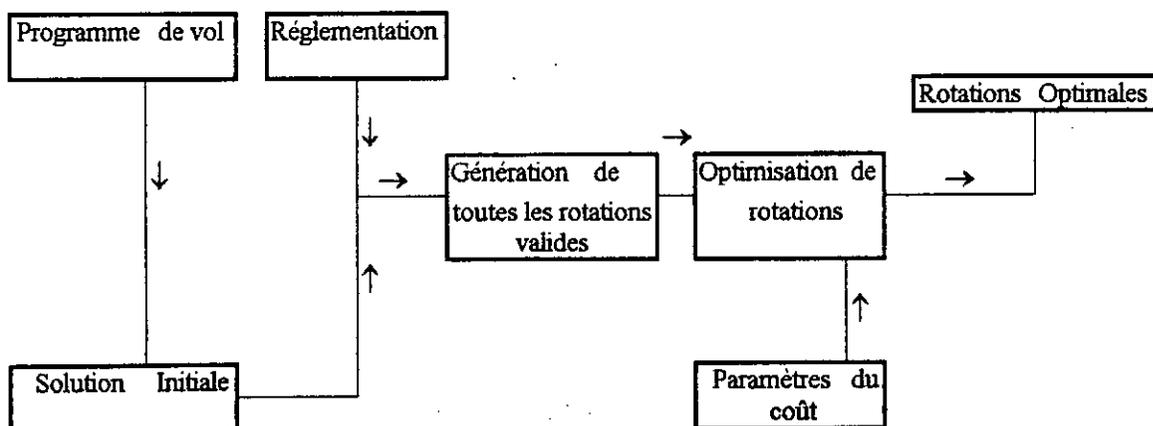
T : Temps de vol payé pour l'exécution de la rotation.

t : Temps de vol effectué lors de rotation.

Notre modèle repose essentiellement sur l'idée de ramener la limite "T" à celle de "t".

Il a été prouvé que pour diminuer les coûts personnel navigant d'une manière efficace, il faut faire une élaboration minutieuse des rotations équipages [GER89], [HOF93], [LAV88]. Ainsi l'application de modèles d'optimisation d'équipages d'avions dans plusieurs compagnies aériennes au monde, a permis d'obtenir des économies dans les dépenses du personnel navigant de plusieurs millions de dollars \$ (résultat reporté dans la bibliographie).

En réalité le modèle construit est la partie principale du processus de programmation des rotations équipages, qui est présenté comme suit :



1. Hypothèses du modèle :

La modélisation du problème d'optimisation des rotations d'équipages nécessite un ensemble d'hypothèses : propres à AIR ALGERIE, et communes avec d'autres compagnies aériennes. Pour ce qui est de notre étude, elles concernent les éléments suivants :

- Secteurs,
- Programme de vol,
- Réglementation,
- Fonction coût.

1.1 Secteurs :

On a vu au cours de notre 'diagnostic', que chaque secteur regroupait les appareils (avions) présentant une grande similitude, où ils leurs sont affectés des membres d'équipages d'avions, qualifiés sur les appareils du secteur considéré, vu que les caractéristiques techniques, les aptitudes, et les capacités de conduite, diffèrent d'un secteur à un autre. Il est important de relever que chacun des secteurs doit assurer un certain nombre de destinations déterminé préalablement par la compagnie.

Depuis que les pilotes sont formés pour voler sur des appareils spécifiés, et que chaque type d'appareil doit desservir des destinations bien précises, **la programmation d'équipages est faite par type d'appareil.**

Généralement, le problème de programmation des routes d'équipages, est traité de la même manière pour chaque type d'appareil.

1.2 Programme de vol :

La programmation des rotations consiste en fait, en la construction d'un ensemble de rotations désigné par **J**, à partir de l'ensemble de segments **I**. Cet ensemble est fourni chaque saison par la Direction Commerciale d'Air Algérie, où on précise pour chaque segment : la station de départ i_1 et celle d'arrivée i_2 , les horaires de départ et d'arrivée, ainsi que le type d'appareil utilisé.

L'ensemble **I** comptant plus d'une centaine de segments, présente deux classes de segments :

- Les segments qui apparaissent plus de quatre fois par semaine sont considérés comme quotidiens (vols quotidiens).
- Les segments qui apparaissent moins de quatre fois par semaine sont considérés comme opérant une fois par semaine (vols non quotidiens).

1.3 Réglementation :

Il est évident, que nous devons considérer la réglementation du personnel navigant comme une hypothèse de base pour la construction des rotations d'équipages d'avions, afin de respecter les limitations en heures de travail du personnel navigant.

Une rotation $j \in J$ est constituée d'un ensemble i de segments $\in I$ avec la particularité : que le premier segment composant la rotation j doit avoir pour origine la base d'Alger (dans le cas où nous considérons Alger comme base d'affectation), et que le dernier segment ait pour base d'arrivée Alger également.

Les limitations concernant la réglementation en vigueur ont été considérées, pour que les navigants accomplissent leurs tâches dans les meilleures conditions.

Les limitations par service de vol sont fixées à :

- 08 heures de vol au maximum (Période de vol $\leq 08h$).
- 12 heures de temps de service de vol au maximum (Période de service de vol ≤ 12).

1.4 Fonction coût :

Le coût d'une rotation est considéré comme une valeur de temps. Dans le sens que le personnel navigant est payé à l'heure de vol, ainsi plus le temps d'absence de la base d'affectation est long plus la rémunération devient plus importante. Aussi le temps de repos post courrier (repos accordé après chaque rotation dont la durée est assez importante, puisqu'il est en fonction du temps d'absence), engendre des coûts, du fait que les navigants sont rémunérés malgré leur indisponibilité au travail.

Nous définissons alors le coût d'une rotation de la façon suivante :

$$TA + TRPC$$

où

TA : Temps d'absence associé à la rotation.

TRPC : Temps de Repos post- courrier qui est une fonction non linéaire.

2. Paramètres du modèle :

Pour que le modèle fonctionne, il nécessite l'introduction de données (input), et doit à son tour fournir des résultats (output). En somme le modèle manipule des paramètres qui sont généralement liés aux rotations et à leurs construction.

D'après la figure précédente, les paramètres peuvent être ainsi divisés en :

- Paramètres liés à la réglementation.
- Paramètres du coût.

2.1 Paramètres liés à la réglementation :

Ces paramètres concernent directement l'élaboration de rotations, limitant pour des raisons de sécurité, le nombre de combinaisons possibles.

2.1.1 Segment de vol :

Le nombre de segments à assurer est toujours donné par le paramètre " NSeg ", un segment quelconque de ces segments est noté par l'indice " i " (i = 1, ..., NSeg).
Un segment de vol " i " est caractérisé par les paramètres suivants :

- I (Origine) : Station de départ du segment " i ".
- I (Arrivée) : Station d'arrivée du segment " i ".
- I (HD) : Heure de décollage du segment " i ".
- I (HA) : Heure d'arrivée du segment " i ".
- I (TV) : Temps de vol du segment " i ".

2.1.2 Service de vol :

Un service de vol est noté par l'indice " k ", et est constitué d'un ou de plusieurs segments. Le nombre de segments dans un service de vol est noté " NSEGV (k) ".

2.1.3 Période de vol :

La période de vol d'un service de vol " k " est notée " PV(k) ".

$$PV(k) = \sum_{i=1}^{NSEGV(k)} tv_i$$

tv_i : Temps de vol du segment " i ".

2.1.4 Période de service de vol :

La période de service de vol d'un service de vol est notée " PSV (k) ".

$$PSV(k) = 1 + PV(k) + \sum_{i=1}^{NSEGV(k)-1} TESC(I, I+1) + 0.5$$

TESC (I, I+1) : Temps d'arrêt en escale entre le segment i et le prochain segment (i+1)

avec : $TESC(I, I+1) = I+1(HD) - I(HA)$

Comme noté auparavant, la période de service de vol est décomptée à partir d'une heure avant le début du premier vol d'un service de vol, et 30 min après le dernier vol du même service de vol.

2.1.5 Rotation :

Une rotation est notée par l'indice " j ", elle est constituée de plusieurs segments groupés en services de vol. Le nombre de services de vol dans une rotation " j " est noté " NSV (J) ". Par exemple en réseau moyen courrier, une rotation est constituée de deux ou trois services de vol, ce qui veut dire qu'une rotation peut s'effectuer pendant deux à trois jours consécutifs.

- Le temps d'absence associé à une rotation " j " est noté " TA (J) ".

$$TA (J) = \sum_{k=1}^{NSV(J)} PSV (k) + \sum_{k=1}^{NSV(J)-1} TESV (k , k+1)$$

$$TESV (k , k+1) = I (HD) + (m+1) * 24 - L (HA)$$

TESV : Temps de repos hors de la base entre le service de vol " k " et le prochain service de vol " k+1 " d'une même rotation J .

I : Premier segment du service de vol " k+1 ".

L : Dernier segment du service de vol " k ".

m : Nombre de jours séparant " k " et " k+1 ".

- Le temps de repos post-courrier associé à une rotation " j " est noté " TRPC (J) " et est défini en fonction du temps d'absence " TA (J) " .

2.2 Paramètres du coût :

Comme défini précédemment le coût d'une rotation " j " est noté " C (J) " qui est une fonction non linéaire :

$$C (J) = TA (J) + TRPC (J) .$$

TA (J) : Temps d'absence de la rotation " j ".

TRPC (J) : Temps de repos post-courrier de la rotation " j ".

2.3 Période d'optimisation :

La période d'optimisation qu'on doit considérer diffère selon la nature des segments, c'est à dire qu'ils soient quotidiens ou non.

- Pour les segments quotidiens, si par exemple une rotation peut durer trois jours au maximum, la période d'optimisation sera d'une durée égale, car les possibilités de branchement des segments ne vont varier que dans cette durée, et en dehors on aura une répétition de la même construction.

- Pour les autres segments, on est obligé de considérer chaque segment comme opérant une seule fois par semaine, ce qui fait que la période d'optimisation va être la semaine, du

fait qu'à Air Algérie aussi on traite par semaine, et ce qui est valable pour une semaine l'est aussi pour toutes les autres semaines du mois.

3. Variables du modèle :

Le modèle comporte deux sortes de variables, des variables de décision binaires (prenant la valeur "0" ou la valeur "1") notées " $X (I , J)$ " et une variable continue " Z ", représentant le coût total des rotations générées .

3.1 Objectif :

L'objectif est de minimiser les coûts du personnel navigant, ceci sera atteint en minimisant le coût total " Z " des rotations recouvrant les segments de vol donnés par le programme de vol. Il faudrait donc retrouver parmi toutes les rotations possibles, celles qui recouvrent à moindre coût notre programme de vol .

3.2 Variables de décision :

Les variables de décision sont des variables binaires, qui nous indiquent si oui ou non une rotation " j " est incluse dans la solution optimale.

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{Si la rotation "j" est dans la solution optimale.} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

4. FONCTION OBJECTIF :

La fonction objectif du modèle est de minimiser le coût total des rotations générées.

$$Z = \text{Min} \sum_{j=1}^N C_j X_j$$

N : Nombre de rotations générées .

5. CONTRAINTES DU MODELE :

Les contraintes prises en compte dans notre modèle sont classées selon leurs nature en 03 catégories :

- Contraintes de recouvrement .
- Contraintes de base
- Contraintes de réglementation .

5.1 Contraintes de recouvrement :

Chaque vol du programme de vol d'un secteur donné doit être assuré une et une seule fois, quoique des vols de mise en place peuvent être permis dans certaines versions du problème .

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = 1$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la rotation "j" recouvre le segment "i".} \\ 0 & \text{Sinon.} \end{cases}$$

5.2 Contraintes de base :

Une rotation doit débuter obligatoirement d'une base d'affectation (base mère : Alger).

$$I(\text{ORIGINE}) = \text{Alger} ; \quad I : \text{Premier segment de la rotation "j" .}$$

Une rotation doit se terminer à une base d'affectation .

$$I(\text{ARRIVEE}) = \text{Alger} ; \quad I : \text{Dernier segment de la rotation "j" .}$$

Pour connecter deux segments " i " et " l " dans une rotation, il faut que :

$$I(\text{ARRIVEE}) = L(\text{DEPART})$$

Si dans une rotation le tronçon " l " doit être effectuer immédiatement après le tronçon " i " , il faudrait alors que la station de départ du tronçon " l " soit la même que la station d'arrivée du tronçon " i " et que l'heure de départ de " l " doit être postérieure à l'heure d'arrivée de " i ".

5.3 Contraintes de réglementation :

Chaque rotation doit être conforme aux limitations internationales et nationales qui sont présentes dans : le règlement de la direction de l'aviation civile (D.A.C), et le règlement de travail de la compagnie. Il est à noter que ce dernier règlement diffère du Personnel Navigant Technique et commercial .

- $NSV (J) \leq NSV \text{ Max}$

NSV max : Nombre maximum de services de vol dans une rotation.

- $TESC (I , I+1) \geq TESC \text{ Min}$

TESC Min : Temps d'arrêt en escale minimum.

- $NSEGV (k) \leq NSEGV \text{ Max}$

NSEGV Max : Nombre maximum de segments dans un service de vol.

- La période de service de vol diminue en fonction du nombre de segments programmés, et de l'heure prévue de début du service de vol suivant le tableau ci-dessous :

$$PSV \leq PSV \text{ Max}$$

PSV Max : Période de service de vol maximale dans un service de vol.

Heure locale programmée en début de PSV(k)	PSV MAX				
	NOMBRE		DE	SEGMENTS	
	1	2	3	4	5
05h00 à 21h00	12h00	11h15	10h30	09h45	09h00
21h00 à 05h00	10h00	09h15	08h30	07h45	-

Source : Règlementation personnel navigant.

- La période de vol maximale d'un service de vol se réduit à son tour en fonction du nombre de segments programmés et des tranches horaires de début et de fin du service de vol.

$$PV(k) \leq PVMAX$$

PVMAX : Période de vol maximale d'un service de vol, définie comme suit.

NOMBRE DE SEGMENTS	TRANCHES	HORAIRES /	PVMAX	
	06h00	18h00	00h00	06h
1	08h00	07h30	06h30	
2	08h00	07h00	06h00	
3	07h30	06h30	05h30	
4	07h00	06h00	05h00	
5	06h30	05h00	-	

Source : Règlementation personnel navigant.

Le cinquième segment est exceptionnel, utilisé surtout pour des raisons de sécurité, de dépannage ou pour des impératifs opérationnels imprévus.

- $TESV(k, k+1) \geq TESV \text{ Min}$

TESV Min : Temps d'arrêt récupérateur minimum hors base entre deux services de vol défini comme suit :

Onze heures si Ce repos comprend la période de 21h à 05h.

TESV Min =

quatorze heures si tout ou une partie de ce repos n'est pas comprise dans la période de 21h00 à 05h00.

- $TRPC(J) \geq TRPC \text{ Min}$

TRPC Min : Temps de repos post-courrier minimum à la base défini comme suit :

- Si la rotation effectuée contient deux services de vol au plus, alors le TRPC est :

Si la dernière PSV excède onze heures alors le repos est de :

- 12 heures avec un arrêt nocturne normal.
- 24 heures s'il n'y a pas d'arrêt nocturne normal.

Sinon le repos est de :

- onze heures avec la tranche de 21h00 à 05h00.
- quatorze heures si ça n'inclut pas la partie de 21h00 à 05h00.

Si la rotation contient plus de 02 services de vol alors le TRPC est défini comme suit :

TEMPS D' ABSENCE	TRPC MIN
inférieur à 72H00	14h dont un ANN 24h lorsqu'il n'y a pas d'ANN
supérieur ou égal à 72h00	48h avec 02 nuits (21h à 05h00)

Source : Règlementation personnel navigant.

(ANN : arrêt nocturne normal)

QUATRIEME PARTIE

La validation

En réalité, juger la qualité d'un modèle, c'est juger la qualité des résultats obtenus (output), à travers son utilisation. Ces résultats sont de différentes natures, et peuvent avoir des répercussions plus étendues qu'on en prévoit.

Nous présenterons dans cette partie les éléments d'application numérique du modèle élaboré.

1. APPROCHE UTILISEE :

L'application d'un modèle passe automatiquement par le choix d'une approche de résolution. Le choix de la meilleure approche n'est pas pensable dès fois, car elle se heurte à certaines difficultés pratiques, qui nous pousse à revoir notre raisonnement pour le choix d'une approche plus appropriée et qui s'intègre le mieux à la réalité.

L'approche de résolution utilisée pour la résolution de notre modèle est une **approche exacte**.

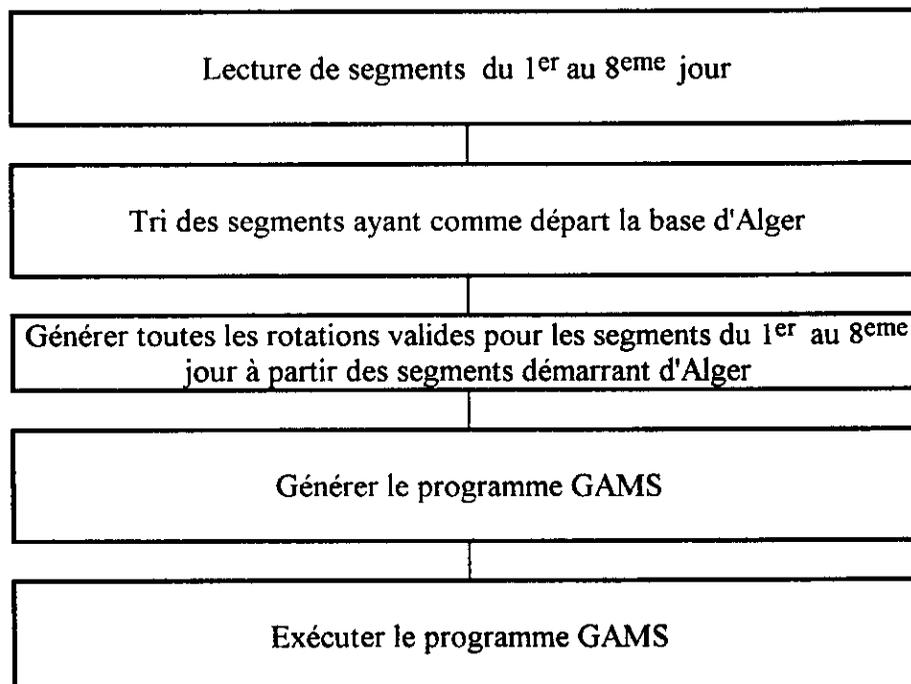
Nous avons opté pour une telle approche du fait, qu'elle nous garantisse d'atteindre la solution optimale alors que d'autres, nous permettent seulement d'approcher la valeur optimale et montre des fois des contradictions avec la réalité lors de leurs applications.

Les arguments qui nous ont poussé à choisir une telle approche sont :

- L'évolution des équipements informatiques et la technologie d'aujourd'hui, permettent de traiter des problèmes de tailles de plus en plus grande.
- La souplesse des logiciels d'optimisation d'aujourd'hui permettent d'intégrer les approches exacte dans des environnements riches.
- La taille de la compagnie AIR ALGERIE est relativement petite, ce qui rend le problème plus tractable.

2. LANGAGE DE PROGRAMMATION :

L'application de notre modèle se fait selon le processus suivant :



- La génération des rotations réalisables se fait de la manière suivante : on considère un segment démarrant d'Alger, on génère toutes les rotations légales à partir de ce segment, on refait le processus pour tous les autres segments démarrant d'ALGER jusqu'à leur épuisement.

On a élaboré un algorithme qui représente une recherche en arborescence intégrant toutes les contraintes de réglementation.

La complexité de cet algorithme dépend du nombre maximum de services de vol dans une rotation, si par exemple on considère une rotation de trois jours au plus, la complexité est de $O(n^{12})$ (12 segments au plus dans la rotation).

Pour l'implémentation de cet algorithme, on a utilisé un langage de programmation structurée : le Turbo Pascal pour sa grande souplesse, la richesse de son environnement, et sa capacité d'adaptation avec des algorithmes très complexes.

Les résultats du programme de génération nous fournissent toutes les rotations valides et possibles ainsi que le coût de chacune d'elles.

- Ayant l'ensemble de rotations générées précédemment, on peut ainsi écrire notre problème d'optimisation, pour le résoudre ensuite.

Nous avons traduit notre problème d'optimisation en un langage de modélisation spécialisé en programmation mathématique à savoir le GAMS, qui représente un des logiciels de résolution de problèmes de programmation linéaire et non linéaire, que nous regroupons selon leur caractéristiques dans le tableau suivant :

Caractéristiques diverses des logiciels d'optimisation

Logiciel	Version	Distributeur	Prix	Mémoire minimale	Coprocasseur mathématique
EUREKA : The solver	1.0	Borland International	99.95 \$	384 K	non requis
GAMS	2.02 A	The scientific Press	1600 \$ 75 \$ *	512 K	requis
MP6-NLPROG	3.0	SCICOM Inc.	80 \$	256 K	requis
NLPSOVE	1.0	3i Corporation	795 \$ 495 \$ *	512 K	non requis
OPTISOLVE	1.00	Optisoft	195 \$	128 K	non requis
SUPER-GINO	5/9/86	LINDO Systems Inc.	995 \$ 650 \$ *	512 K	non requis

* Prix spécial pour l'enseignement

Ces logiciels utilisent différents algorithmes de résolution de programmation linéaire et non linéaire résumés dans le tableau suivant :

Le logiciel	Type de problème	Taille maximale		Algorithme	Commentaires
		lignes	colonnes		
EUREKA The solver	GP, SN	20	20	VM	fonctions graphiques solutions 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 racine complexes
SUPER GINO	GP, SN	50	100	GRG	valable pour IBM et DEC

Les caractéristiques de programmation mathématique

FP : point fixe, GRG : gradient réduit général, PI : 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)

On a opté pour le logiciel GAMS, pour sa disponibilité au laboratoire de génie industriel de l'école nationale polytechnique, sa facilité d'utilisation, et la disponibilité d'une gamme très variée de solvers, dont nous citons parmi eux : MINOS 5, ZOOM, OSL qui résolvent des problèmes de différents types (allant jusqu'à 32767 colonnes et lignes).

Nous regroupons les solvers qui traitent les mêmes types de problèmes :

Type de problème	PL	PNL	PLNE
SOLVER	MINOS 5 ZOOM OSL	MINOS 5	OSL ZOOM

Solvers GAMS

Pour la résolution de notre problème (formulé en PLNE), on a utilisé les solvers MIP à savoir OSL et ZOOM.

La méthode de résolution d'un problème en PLNE par les solvers MIP du logiciel GAMS (OSL-ZOOM) procède de la manière suivante :

ZOOM	OSL
- Résoudre le problème relaxé par la technique XMP. -Utilisation de l'heuristique P&C pour trouver une solution entière - Branch and Bound	- Résoudre le problème relaxé (simplexe primal) -Branch and bound

Procédé de résolution de solvers

3. SYSTEME INFORMATIQUE :

Une démarche nécessaire pour la validation d'un modèle et son expérimentation sur des équipements informatique.

En ce qui nous concerne, on a utilisé les équipements suivants :

- Un PC i80486 DX2 40 MHertz doté de 8 MO de RAM et 250 MO de disque dur.

Les temps d'exécution du prototype du modèle sur cet équipement sont :

- Temps de génération exhaustive de rotations : 1 à 2 minutes.
- Temps de compilation : 30 à 43 secondes.
- Temps d'exécution : 46,190 secondes.

4. DONNEES

La résolution du problème d'optimisation des rotations d'équipages d'avions se fait par type d'appareil (revoir partie modèle). On a ainsi considéré un type d'appareil à savoir le **B737** car il est le plus exploité d'AIR ALGERIE (16 avions).

Du côté de la réglementation on a tenu compte de celle **du personnel navigant technique**, et non celle du personnel navigant commercial (légerement différente), mais la résolution se fait strictement de la même manière.

Les premières données à intégrer dans notre modèle sont : les segments de vol du plan de vol de la compagnie, pour le type d'appareil spécifié. Ce qui veut dire pour nous ; la **récolte de tous les segments de vol à assurer par le B737.**

Nous avons considéré une période d'une semaine allant du 10 au 16 juin de cette année. Tous les segments opérant dans la semaine, ont été traité comme **des segments non quotidiens** (vu que le volume de segments quotidiens assurés par AIR ALGERIE est faible) [*Voir en annexe liste de segments*].

Jour	Nombre de segments démarrant d'Alger	Nombre d'autres segments	Total
1 ^{er} jour	13	18	31
2 ^{eme} jour	22	28	50
3 ^{eme} jour	13	35	48
4 ^{eme} jour	16	24	40
5 ^{eme} jour	20	29	49
6 ^{eme} jour	21	35	56
7 ^{eme} jour	22	39	61
8 ^{eme} jour *	3	7	10
Total	130	215	345

* : le 8^{eme} jour assure le retour à la base des segments des 02 derniers jours de la semaine

Recapitulatif des données

5. INTERPRETATION :

Le premier résultat obtenu est une énumération exhaustive de rotations, s'étalant au maximum sur une période de trois jours, recouvrant tous les segments de la semaine considérée (10 au 16 juin).

Par exemple, à partir du segment Alger-Ghardaïa du 1^{er} jour de la semaine, nous avons construit l'ensemble suivant de rotations.

Segment d'origine de la rotation	Les différentes combinaisons possibles générées par le programme
	[Gha - Alg] / jour 2
[Alg-Gha] / jour 1.	[Gha-Alg] / jour 3
	[Gha-Djg] [Djg-Tmr] [Tmr-Djg] [Djg-Alg] /jour 3
	[Gha-Djg] [Djg-Alg] / jour 3

Alg : Alger, Gha : Ghardaïa, Djg : Djanet, Tmr : Tamanrasset.

jour 1 : 10/06, jour 2 : 11/06, jour 3 : 12/06

Nous obtenons ainsi pour tous les segments, le nombre total de rotations possible qui est de 1558, qui représente toutes les variables de notre modèle.

Il faudra trouver à partir de cet ensemble, l'ensemble optimal de rotations qui recouvrent exactement une fois chaque segment introduit.

Ainsi la taille de notre problème est de 1558 variables, et de 345 contraintes.

Nous avons ainsi modélisé le problème avec le langage GAMS version 2.5 utilisant le solveur OSL version 2.

L'ensemble optimal que nous avons obtenu regroupe 135 rotations avec un coût total de '3207.83'.

On peut ainsi faire une comparaison entre les résultats obtenus par l'application de notre prototype du modèle et les résultats d'Air Algérie.

Résultats obtenus

	Résultats du programme	Résultats d'Air Algérie
nombre de rotations finales	135	130
valeur objective	3208.83*	3480.54*

On voit que la solution optimale obtenue par notre programme est inférieure à la valeur réelle qui a été exploitée par Air Algérie, ce qui fait qu'une réduction a été réalisée.

Cette réduction réside dans le fait d'avoir réduit le temps d'absence global et le temps de repos post-courrier, où le P.N n'est pas à la disponibilité de la compagnie.

* : exprimées en heures centièmes.

CINQUIEME PARTIE

Conclusion

La conclusion porte sur deux principaux axes :

- *L'apport pratique de notre présent travail,*
- *Les domaines de recherche future envisagés.*

1. L'APPORT PRATIQUE :

Les questions qu'on pourrait se poser maintenant sont :

- Quel est l'apport pratique de l'approche étudiée ?
- Est ce que par rapport aux buts pré définis, on est arrivé à atteindre notre objectif ? ou on s'est écarté de lui ?

D'après les résultats obtenus dans le dernier chapitre, on pourrait dire qu'on est arrivé à notre premier objectif qui était de réduire les coûts PN. On remarque bien sûr qu'on s'est penché sur un seul type d'appareil pour la validation de notre modèle, donc si on appliquait notre modèle à tout les autres secteurs, les gains cumulés seraient beaucoup plus importants, et on a ainsi répondu aux attentes d'Air Algérie.

L'autre apport de base qu'on a fourni est qu'on a présenté une approche différente pour regarder le processus de programmation d'équipages en général, et l'optimisation de rotations en particulier. Cette différence réside dans le fait : d'avoir réétudié le processus de programmation d'équipages, et d'avoir déterminé les principes de base pour l'optimisation de rotations et de programmation individuelle, ce qui fait que notre approche en plus d'être différente est plus logique, puisqu'elle permet de refléter et de maîtriser mieux la réalité.

Notre approche constitue ainsi un élément d'aide à la décision plus efficace.

2. RECHERCHE FUTURE :

La recherche future est axée sur trois directions :

- Application plus étendue du modèle,
- Utilisation de nouveaux solveurs,
- Adaptation du modèle à d'autres domaines d'activités.

2.1 Application plus étendue du modèle :

En intégrant l'optimisation de rotations pour tous les secteurs, on maîtrisera mieux la réalisabilité des problèmes pour chaque secteur, car en pratique arrive souvent le cas qu'un segment de vol soit ajouté ou enlevé complètement, ou qu'il soit transféré d'un type d'appareil vers un autre. Il faudra ainsi étudier le problème pour chaque secteur, pour voir les combinaisons possibles de transfert de segments d'un secteur vers un autre pour atteindre une optimalité globale.

Pour une application plus étendue, il faudra aussi étudier de près :

- la différence de réglementation entre PNT et PNC pour un passage plus rapide et plus souple entre les deux corps.
- l'impact de réglementation sur la réalisabilité ou l'optimalité du problème, c'est à dire que peut être en ajustant mieux les paramètres de réglementation, on arriverait à de meilleurs résultats.

2.2 Utilisation de nouveaux solvers :

Dans notre validation actuelle, on a utilisé un seul solveur, et comme on sait que la nature des problèmes de partitionnement les rend difficiles à résoudre, on va essayer l'application de nouveaux solvers utilisant des procédés de résolution différents.

— 2.3 Adaptation aux autres domaines :

Notre dernier axe de recherche sera l'adaptation de notre modèle à d'autres domaines d'application, par exemple pour les équipages de bus, le problème est traité de manière analogue, la différence réside seulement dans le processus de génération de rotations, qu'il faudra revoir.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- RICH89** **HELMUT RICHTER 1989**, Thirty years of airline Operations Research, INTERFACES 19, pp 3-9
- ZAR90** **PASCALE ZARATE 1990**, The process of designing a DSS : A case study in planning management, LAMSADE, Université Paris dauphine, European Journal of Operational Research
- LAV85** **SYLVIE LAVOIE 1985**, Optimisation des horaires d'équipages d'avions, Centre de Recherche sur les transport, Université de Montréal
- FER92** **JACQUES A. FERLAND 1992**, Vehicle crew scheduling to complete specific tasks and bulk- tasks at depots, Theory and Methodology, European journal of Operational Research, VOL 57, pp 316-322
- CUR93** **JOHN CURRENT 1993**, Multiobjective transportation network design and routing problems : Taxonomy and annotation, European Journal of Operational Research, VOL 65, pp 4-19
- VOH88** **RAKESH V. VOHRA 1988**, A Quick Heuristic for some cyclic staffing problems with Breaks, Academy Faculty of Management Sciences, The Ohio State University, USA, J.Opl.Res.Vol 39, n° 11, pp 1057-1061
- TEO84** **DUSAN TEODOROVIC 1984**, Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation, Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade, European Journal of Operational Research, VOL15, pp 178-182
- GRA93** **GLEEN W. GRAVES 1993**, Flight Crew Scheduling, MANAGEMENT SCIENCE, VOL 39, n°6
- RYA92** **D.M. RYAN 1992**, The solution of Massive Generalized Set Partitionning problems in Aircrew Rostering, Journal Operational Research, VOL 43, pp 459-467
- CAT92** **DIRK G. CATTRYSSE 1992**, Theory and Methodology, European Journal of Operational Research, VOL 60, pp 260-272

VER91 **PETER J. VERBEEK 1991**, decision Support Systems-An application in strategic manpower planning of airline pilots, European Journal of Operational Research, VOL55, pp368-381

HOF93 **KARLA L. HOFFMAN 1993**, Solving airline Crew Scheduling problems by Branch and Cut, MANAGEMENT SCIENCE, VOL39, n°6

CAR83 **P. CARRARESI 1983**, Network models for vehicle and crew scheduling, European Journal of Operational Research, VOL16, pp139-151

DAR92 **ELIA EL-DARZI 1992**, Solution of Set-Covering and Set-Partitioning Problems Using Assignment Relaxations, Journal Operational Research, VOL43, pp483-493

LAV88 **SYLVIE LAVOIE 1988**, A new approach for crew pairing problems by column generation with an application to air transportation, European Journal of Operational Research, VOL35, pp 45-58

JON92 **E.L. JOHNSON 1992**, A global approach to crew-pairing optimization, IBM SYSTEMS JOURNAL. VOL 31

HEI93 **KURT HEIDENBERGER 1993**, A system dynamics model for AIDS policy support in Tanzania, European journal of operational research, pp 167-176

AND89 **SVEN ERIC ANDERSSON 1989**, Operational planning in airline business- Can science improve efficiency ? Experiences from SAS*, european journal of operational research, VOL 43 pp 3-12

JON89 **RUSSELL D. JONES 1989**, Development of an automated airline crew bid generation system, INTERFACES, volume 19, n° 4

JOURNAL OFFICIEL de la république Algérienne : Décret n° 88-142 du 10 juillet 1988 portant sur le statut du personnel navigant de l'aéronautique civile

PROTOCOLE D'ACCORD sur le régime de travail du Personnel Navigant Technique et Commercial, à Alger le 19 Mai 1992

ANTHONY BROOK, DAVID KENDRICK, MANUEL DU GAMS

ROSEAUX, EXERCICES ET PROBLEMES DE RECHERCHE OPERATIONNELLE, Tome 3, edition MASSON 85

RAVINDRAN OPERATIONS RESEARCH : Principles and Practice
New York 1987

M.SAKAROVITCH OPTIMISATION COMBINATOIRE, Méthodes mathématiques et algorithmiques : programmation discrète

ANNEXES

ANNEXE A

- **FIGURE P1.** Profil de carrière du personnel navigant commercial
- **FIGURE P2.** Profil de carrière du personnel navigant technique
- **Organigramme de la direction des opérations aériennes**
- **Flight crew productivity**

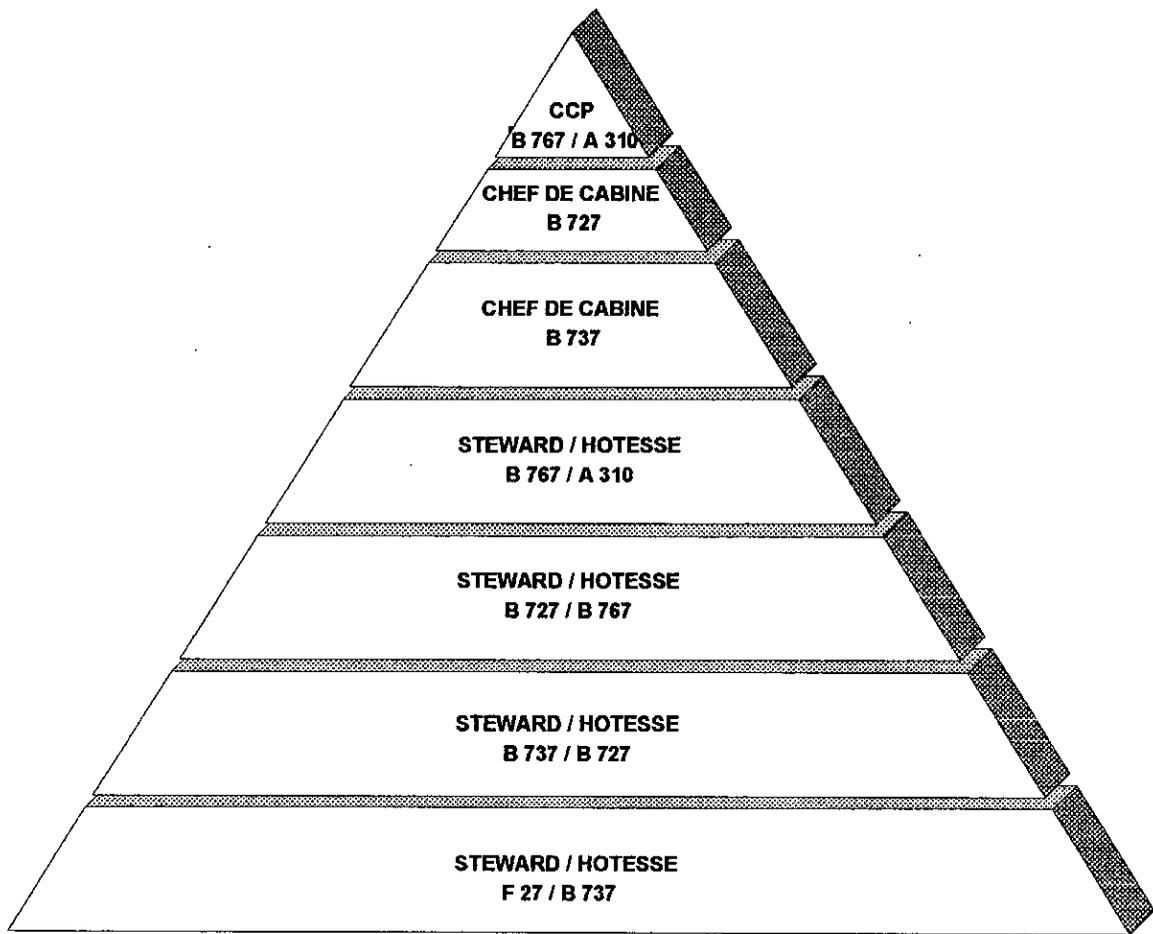


Fig.P1 : PROFIL DE CARRIERE P.N.C

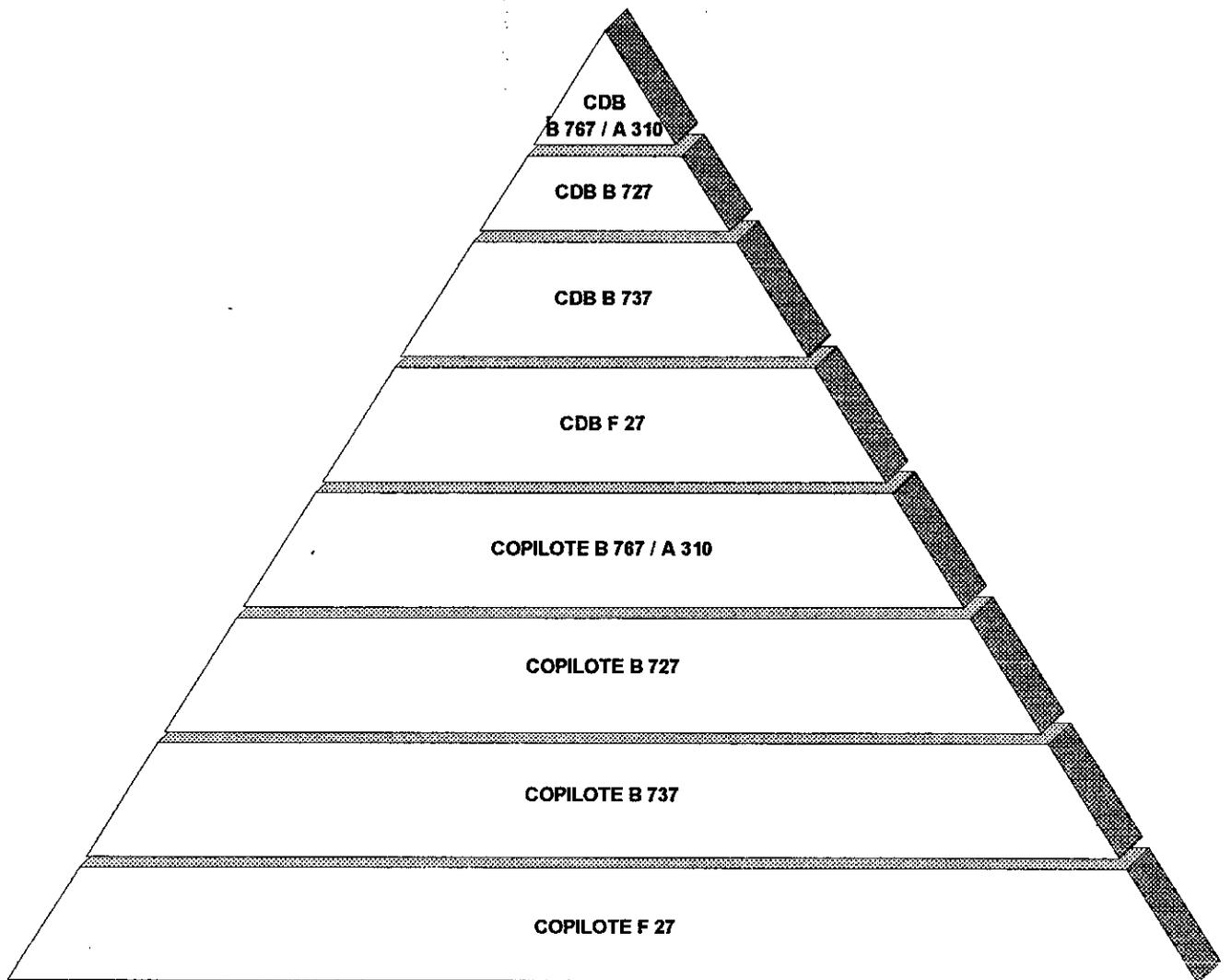
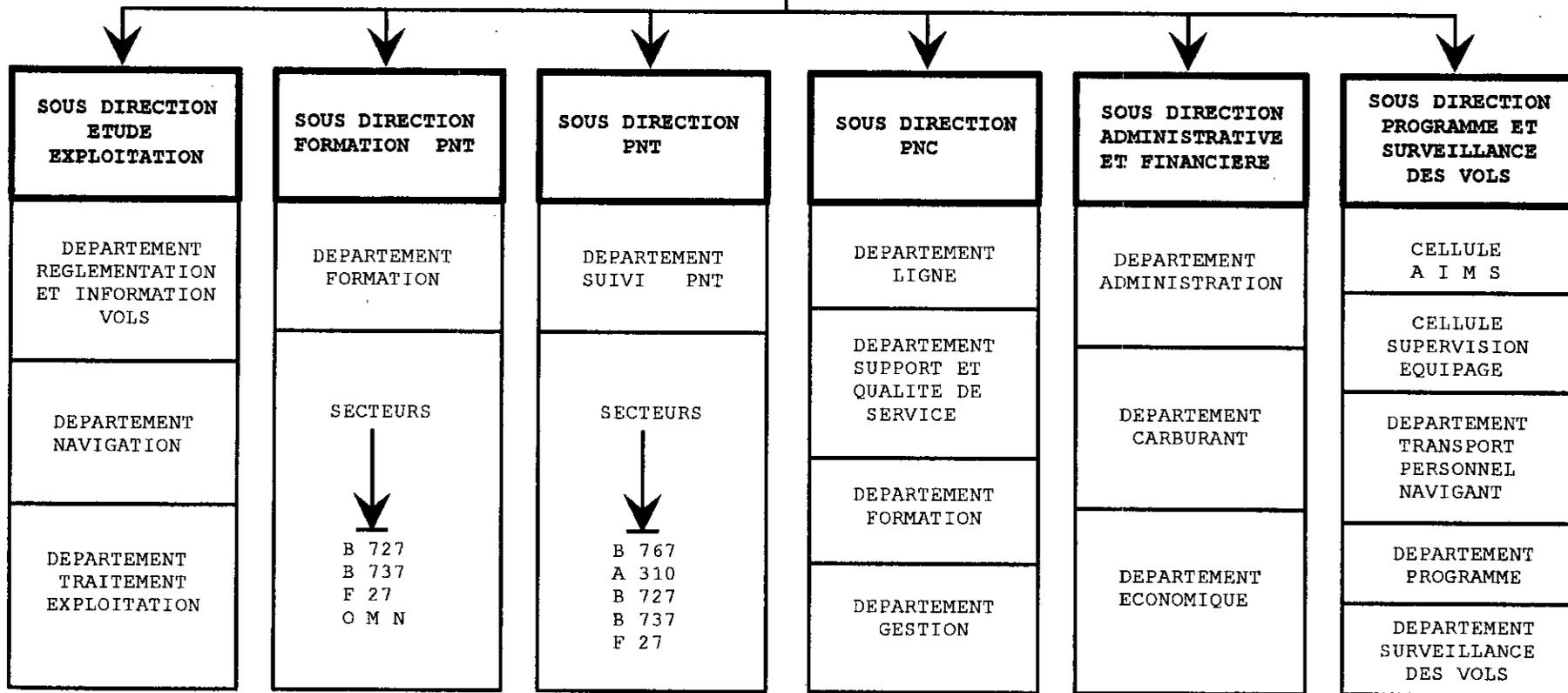


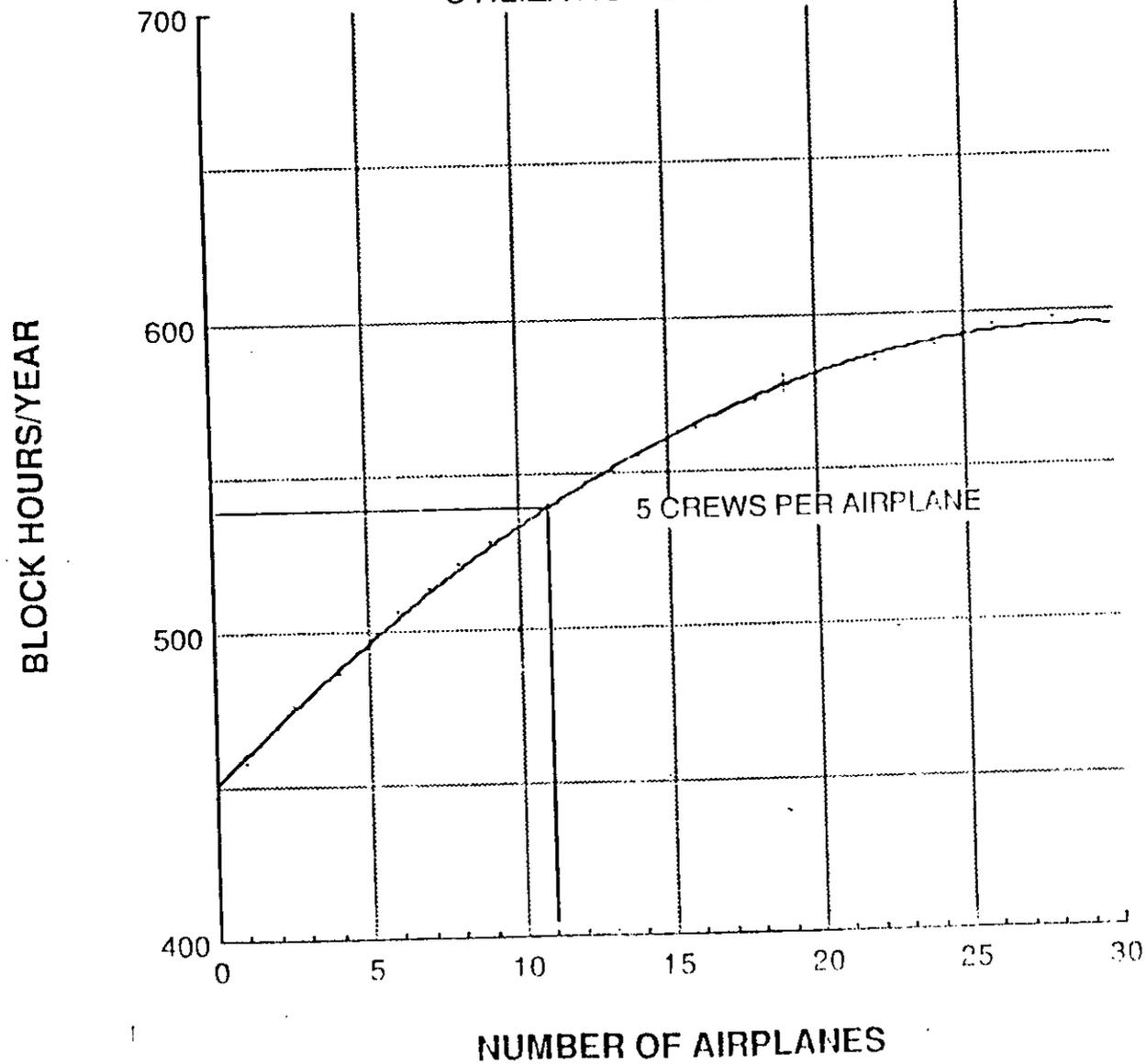
Fig .P2 : PROFIL DE CARRIERE P.N.T

DIRECTION DES OPERATIONS AERIENNES



FLIGHT CREW PRODUCTIVITY

UTILIZATION 2700 BH/YR



ANNEXE B

Complément de l'état de l'art

ANNB 1. Réseau d'AIR ALGERIE

ANNB 2. Enoncé de l'algorithme de génération de colonnes et de l'algorithme générateur

ANNB 3. Modèle intégrant les contraintes de base. (United Airlines)

ANNB 4. TRIP AMELIORE

ANNB 5. Présentation de l'algorithme de BRANCH and CUT

ANNB 6. Formulation du modèle de Ryan (Approche par partitionnement, seconde partie du problème)

ANNB 1. RESEAU D'AIR ALGERIE

Chaque compagnie aérienne présente des caractéristiques propres à elle : type de flotte, intensité du trafic, et la diversité de destinations à assurer.

Une compagnie aérienne est considérée comme exploitée en court et moyen courrier lorsque'elle vérifie les trois propriétés suivantes :

- Temps moyen d'étapes (vol) programmé est inférieur ou égal à 02 heures.
- La Longueur moyenne des lignes, pondérée par les fréquences inférieure ou égale à 1300 milles nautiques.
- Eloignement de l'escale de bout de ligne par rapport à la base d'affectation mesuré en distance orthodromique inférieur ou égal à 3000 milles nautiques.

Si l'une des trois propriétés n'est pas respectée alors le réseau est considéré comme long courrier.

La compagnie aérienne AIR ALGERIE est considérée comme exploitée en court, moyen, et long courrier.

- Le réseau court courrier représente le réseau domestique d'AIR ALGERIE, qui assure tous les vols à l'intérieur du pays.

- Le réseau moyen courrier représente les destinations telles que : quelques pays d'Europe, les pays frontaliers...

- Le réseau long courrier représente les destinations telles que : l'Afrique, le Moyen Orient...

ANNB 2. ENONCE DE L'ALGORITHME DE GENERATION DE COLONNES

Considérons le problème linéaire général : **Minimiser** $Z = C \cdot X$

$$\text{sous les contraintes : } \begin{aligned} A \cdot X &= b \\ X &\geq 0 \end{aligned}$$

Notons que :

n : Nombre de variables

m : Nombre de contraintes

A : Matrice $m \times n$ de coefficients (a_{ij})

C : (c_1, \dots, c_n) vecteur ligne des coûts

b : (b_1, \dots, b_m) vecteur colonnedes seconds membres

z : fonction objective

L'algorithme est alors le suivant :

(a) B^0 = Base réalisable de départ. Itération $k=0$

(b) $k = k+1$

(c) A l'itération courante, B est la base courante (matrice de dimension $m \times m$) c_B est le m - vecteur- ligne des coûts des variables en base.

Calculer :

$$\bar{b} = B^{-1} \times b \quad (\text{la solution de base courante est } x_B = \bar{b}, x_N = 0)$$

$$\Pi = c_B \times B^{-1} \quad (\text{le vecteur des multiplicateurs du simplexe})$$

(d) Déterminer, en utilisant l'algorithme générateur, la colonne A_S de A telle que :

$$\bar{c}_S = c_S - \Pi \times A_S = \text{MIN}_{j=1, \dots, n} \{ C_J - \Pi \times A_j \}$$

(e) Si $\bar{c}_S \geq 0$ Terminé : la solution courante $x_B = \bar{b}$, $x_N = 0$ est optimale

Si $\bar{c}_S < 0$ alors :

(f) Calculer $\bar{A}_S = B^{-1} \times A_S$

Si $\bar{A}_S \leq 0$, alors terminé : l'optimum est non borné ($-\infty$). Sinon calculer :

$$x_S = \frac{\bar{b}_r}{\bar{A}_{rs}} = \text{Min}_{i / \bar{A}_{is} > 0} \frac{\bar{b}_i}{\bar{A}_{is}}$$

(g) Soit x_t la variable correspondant à la r^{ieme} ligne de la base, c'est à dire telle que

$B^{-1} \times A_t = e_r$ (m - vecteur à composantes toutes nulles sauf la composante r égale à 1)

Définir la nouvelle base B en remplaçant la colonne t par la colonne s . Calculer B^{-1} et retourner en (b).

- On utilise l'algorithme générateur pour déterminer la variable (colonne) entrante en base.

ALGORITHME DE RESOLUTION DU SOUS PROBLEME : ALGORITHME GENERATEUR

Pour résoudre le sous-problème (générateur de colonnes) écrit comme un problème de plus court chemin avec coûts non-linéaires et contraintes supplémentaires, nous définissons, dans un premier temps une étape de PRECALCUL dans laquelle nous développons un nouveau réseau que nous notons " réseau développé " à partir du graphe G défini dans l'état de l'art. Les noeuds de ce réseau correspondent aux services de vol et les arcs entre deux services de vol correspondent à des temps d'arrêt réglementaires c'est à dire, vérifiant les contraintes définies précédemment dans l'état de l'art. Le sous problème décrit sur le réseau développé se ramène alors à un problème de plus court chemin avec coûts non- linéaires mais sans contraintes supplémentaires.

Dans un deuxième temps, nous décomposons ce problème de plus court chemin sur le réseau développé en plusieurs problèmes et nous approximons la fonction de coût pour nous ramener à la résolution d'une suite de sous-problèmes étant de simples PROBLEME DE PLUS COURT CHEMIN sur notre réseau développé.

Enfin nous résolvons par programmation dynamique, ces problèmes de plus court chemin.

PRECALCUL : CONSTRUCTION DU RESEAU DEVELOPPE

D'abord, dénotons " RESEAU INITIAL", le graphe G sur lequel nous avons défini notre problème.

Pour chaque noeud " i " du réseau initial, nous pouvons dresser une liste des services de vol qu'il est possible de construire en prenant le tronçon " i " comme premier tronçon du service de vol. Pour déterminer ces services de vol, nous devons considérer les contraintes définies auparavant dans l'état de l'art. Dans le cas de l'étude de SYLVIE LAVOIE, elle ne considère que le personnel navigant long courrier (ce qui l'intéresse dans cette étude), le temps de vol des tronçons est assez grand et les heures de départ des différents tronçons partant d'une même ville sont relativement éloignées. Ainsi, le nombre de service de vol possibles est relativement faible (pour le personnel navigant "moyen courrier", nous ne retrouvons pas nécessairement ces propriétés. Dans ce cas, il est donc possible que les listes de services de vol soient de grande taille).

A partir de la liste de tous les services de vol possibles, elle considère un deuxième réseau où les noeuds correspondent maintenant aux services de vols. Elle veut bien porter sur ce réseau les arcs de liaisons entre deux services de vol correspondant à des temps d'arrêt en escale réglementaires. Cependant, les contraintes sur le temps d'arrêt en escale entre deux services de vol sont fonction non seulement de ces services de vol mais

des services de vol les précédant sur la rotation. Pour contourner ce problème, Lavoie utilise la notion de statut introduite d'abord par M. MINOUX.

La notion de statut sert en fait à résumer et à garder en mémoire les informations sur les services de vol et temps d'arrêt précédent, dans la rotation le service de vol considéré. Une partie importante du stage a porté sur l'étude de la réglementation et sur la précision de cette notion de statut de façon à représenter le plus fidèlement la réglementation sur les temps d'arrêt en escale. De façon pratique, l'introduction de la notion de statut a pour effet de multiplier les noeuds du réseau par 03, pour résumer les informations nécessaires à la vérification des contraintes de temps d'arrêt en escale. En multipliant les noeuds du deuxième réseau par 03, un troisième réseau est construit. Chaque noeud correspond à un service de vol et un statut fixé. Les arcs du réseau correspondent maintenant à des temps d'arrêt en escale réglementaires. Nous déterminons ces arcs en considérant les contraintes supplémentaires (2.a), (2.b), (défini dans l'état de l'art).

Pour introduire dans le modèle la dernière contrainte supplémentaire (2.c), nous introduisons la notion d'état pour les services de vol de nuit. Il est possible de définir deux états pour résumer les informations nécessaires à la vérification de la contrainte (2.c). En effet, l'état 1 peut être défini comme un premier service de vol de nuit, c'est à dire que le premier service de vol le précédent dans la rotation est un service de vol de jour. Et l'état 02 peut être défini comme un deuxième service de vol de nuit c'est à dire que le service de vol le précédent dans la rotation est un service de vol de nuit. L'introduction de cette notion d'état a pour effet de multiplier par 2 les noeuds du réseau correspondant à des services de vol de nuit et de multiplier par 2 les arcs reliant un service de vol de nuit et un service de vol de jour.

Un quatrième réseau est construit, en multipliant par 2 les noeuds du troisième réseau correspondant à des services de vol de nuit. Ce quatrième réseau est dénoté " réseau développé ". La rotation à coût minimum peut être obtenue en résolvant un problème de plus court chemin sur le réseau développé.

ANNB 3. MODELE INTEGRANT LES CONTRAINTES DE BASE.

$$\text{Min } rx + ps^- + ps^+ + ev^+$$

sous contraintes :

$$Ax + Is^- - Is^+ = 1$$

$$Dx - Iv^+ \leq M$$

$$x = 0, 1$$

$$s^-, s^+, v^+ \geq 0$$

D = matrice de limitation de l'utilisation des ressources humaines à chaque base.

s^- , s^+ = vecteur de variables qui permettent de relaxer la contrainte de recouvrir une seule fois chaque segment en payant une pénalité p .

v^+ = vecteur de variables qui permettent de relaxer les limitations de personnel en payant une pénalité e .

ANNB 4. TRIP AMELIORE

L'étude d'IBM et d'American airlines débute par la génération de 12 millions de rotations, ces rotations sont transformées pour entrer au solver IBM.OSL. Ce problème présente un double défi, du fait que les problèmes de petites tailles formulés en problème de partitionnement sont difficile à résoudre, celui-ci présente 12 millions de variables. En enlevant les colonnes en double et gardant celles qui ont un coût plus faible parmi elles, a réduit le problème à 5.5 millions de variables (colonnes).

En 1989 ce problème a été résolu à IBM jusqu'à l'optimalité en utilisant différentes approches, la méthode qui a marché est celle de J.FORREST. Cette méthode exige la résolution d'un sous problème, cela veut dire la considération d'un petit sous-ensemble de colonnes et utilisant les variables duales optimales des sous-problèmes pour quantifier les 5.5 millions de colonnes. Un nouveau sous-problème est formé en retenant seulement les colonnes dans la base optimale de l'ancien sous-problème et collectant un petit ensemble de bonnes colonnes basé sur les nouveaux coûts réduits.

Un bon nombre de colonnes pour les sous-problèmes a été de 5000, l'idée de choisir plus d'une colonne évaluée pour entrer à la base est vieille idée, sauf qu'ici 5000 de ces colonnes ont été introduites. Le principal résultat est toutefois empirique. Cette méthode fonctionne pour des problèmes de partitionnement avec un grand nombre de variables, cependant le facteur critique est d'évaluer toutes les 5.5 millions de colonnes à chaque fois qu'un sous-problème est créé.

L'idée de la sélection de colonnes est de les collecter en paquets en se basant sur les coûts réduits et de présenter le sous-problème, par les meilleurs paquets jusqu'à ce que le nombre de colonnes exigé soit excédé par un paquet, à ce stade les rotations sont

choisies aléatoirement du dernier paquet. Pour améliorer la performance Forrest a perturbé significativement le second membre pour éviter d'avoir une solution dégénérée.

On a ainsi résolu des problèmes avec 2 à 12 millions de variables. Le temps de résolution ne dépasse pas une heure et lorsqu'une bonne base de départ est trouvée le temps de calcul ne dépasse pas 20 minutes. La bonne performance de cette approche est due en partie au nombre remarquablement petit de sous-problèmes à résoudre pour arriver globalement à l'optimum de larges problèmes. Dans le cas de problèmes à 5.5 millions de variables seulement 25 sous-problèmes ont été résolus.

Une autre raison pour que le temps de résolution soit faible, est que les sous-problèmes à 5000 colonnes sont relativement rapidement solvables, même si ces problèmes sont des programmes linéaires difficiles étant du type de partitionnement pour lequel la dégénérescence conduit à une faible performance, particulièrement en utilisant une résolution avec le simplexe primal. Une surprise a été constatée du fait que dans les grands problèmes qui ont été résolus, la dégénérescence (25%) a été plus faible que pour les problèmes de partitionnement classiques (80%), sauf que ces problèmes restent difficiles à résoudre. Depuis qu'on a trouvé que les problèmes à 25% de dégénérescence sont plus difficiles que les problèmes dégénérés à 80%. Le problème faiblement dégénéré est généralement associé avec une meilleure valeur de la fonction objective et une grande différence entre la valeur objective du problème et la valeur de la solution initiale.

ANNB 5. PRESENTATION DE L'ALGORITHME DE BRANCH AND CUT

Le logiciel commence par le prétraitement de la formulation du problème. Le prétraitement veut dire la simplification et l'amélioration d'une formulation donnée, en une représentation réduite équivalente, en :

- Fixant des variables 0 ou 1.
- Supprimant des lignes inactives ou redondantes.
- Rendant les différences très faibles entre la valeur de la fonction objective du problème relaxé et du programme linéaire en nombres entiers, en garantissant que la solution optimale du problème n'est pas perdue.

Après le prétraitement, on passe à l'optimisation du problème relaxé, en déterminant une borne inférieure au problème. Une borne supérieure au problème est obtenue en appelant une heuristique de programmation linéaire, en posant des variables à 0 et 1, examinant les implications logiques sur les autres variables et envoie successivement de petits problèmes à l'optimiseur (en nombre de variables actives) qui indique le prochain montage. En résumé l'heuristique trouve rapidement de bonnes solutions entières réalisables au problème sans les contraintes de base, si elle échoue elle la borne supérieur à ∞ .

Ayant une borne supérieure et inférieure au problème, on utilise la fixation de coûts réduits aux variables fixes en permanence, ce qui va influencer sur les autres variables, on retourne donc à la base de prétraitement toutes les fois que qu'un pourcentage spécifié de variables ne peuvent être fixées, on obtient une bonne formulation du problème. Après avoir résolu le problème relaxé, on commence la génération de contraintes, ces contraintes sont basées sur la théorie polyédrique et sont appelées coupes polyédrique. En particulier des inégalités de facettes (cliques) ou cycles impairs (odd cycles) sont

généérés à garantir la validité de tous les ponts réalisables du SPP entier (pour les contraintes de base, on génère les contraintes basées sur la théorie polyédrique aux problèmes de sac à dos).

Les contraintes violées sont enlevées du problème original, et l'optimiseur est appelé.

On réitère dans cette optique jusqu'à ce qu'un des cas suivants arrive :

- La solution est entière. Si on est à la racine de l'arborescence → la solution est optimale → STOP

Sinon on sature le noeud, on actualise la borne supérieure de la fonction objective et on continue la recherche arborescente.

-Le PL est irréalisable : Si on est à la racine de l'arborescence, le problème tout entier est irréalisable → STOP. Sinon on sature le noeud et on le quitte pour continuer à un autre noeud.

- Pas de contraintes ne sont générées ou même si des contraintes sont générées la valeur objective reste stagnante → on développe l'arborescence, mais on appelle l'heuristique avant pour essayer d'actualiser la valeur supérieure de la fonction objective.

ANNB 6 MODELISATION MATHEMATIQUE POUR LE PROBLEME DE PROGRAMMATION INDIVIDUELLE DU P.N

On considère p membres d'équipages et t rotations. Le modèle (dont les variables représentent les programmes de vol) est divisé dans un groupe de ' p ' contraintes d'équipages. Le problème peut être formulé comme suit :

$$\text{Min } Z = C^T X$$

$$AX = b \quad \text{ou} \quad x_i = \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix}$$

où A est une matrice en 0-1, se présentant comme suit :

$$A = \begin{matrix} c_1 & c_2 & \dots & c_p \\ L_1 & L_2 & \dots & L_p \end{matrix}$$

C_i : Assurer pour le i^{eme} navigant le programme optimal

L_i : Assurer la i^{eme} rotation r_i fois

C_i : $e_i e^T$ est une matrice ($p \times n_i$) avec e_i : i^{eme} vecteur unité, et $e^T = (1, 1, 1, \dots, 1)$

n_i : série de programmes pour le i^{eme} membre d'équipage.

ANNEXES C

Données et listing du programme et des résultats obtenus sur GAMS

N° de la rotation	Segments	horaires	jour
1	Alger-Marseille Marseille-Alger	9:30-10:45 11:45-13:00	13/06
2	Alger-Biskra Biskra-Alger	14:45-15:30 16:15-17:00	11/06
3	Alger-Ghardaïa Ghardaïa-Alger	18:15-19:15 5:30-6:30	11/06 12/06
4	Alger-Lyon Lyon-Alger	7:30-9:05 10:10-11:45	12/06
5	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	14:45-15:45 16:30-17:30	14/06
6	Alger-Annaba Annaba-Alger	18:15-19:05 5:30-6:20	14/06 15/06
7	Alger-Lyon Lyon-Alger	7:30-9:05 10:10-11:45	15/06
8	Alger-Nice Nice-Alger	7:40-8:55 9:40-11:05	10/06
9	Alger-Annaba Annaba-Alger	16:45-17:35 5:30-6:20	16/06 17/06
10	Alger-Nice Nice-Alger	7:40-8:55 9:40-11:05	17/06
11	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	12:35-13:35 14:20-15:20	10/06
12	Alger-Toulouse Toulouse-Alger	8:00-9:25 10:10-11:35	15/06
13	Alger-Lille Lille-Alger	9:00-11:30 12:15-14:35	15/06
14	Alger-Tlemcen Tlemcen-Alger	15:30-16:30 6:15-7:15	15/06 16/06
15	Alger-Oran Oran-Lyon Lyon-Oran Oran-Alger	18:30-19:20 13:00-14:55 15:40-17:35 18:30-19:20	14/06 15/06 - -
16	Alger-Constantine Constantine-Lyon Lyon-Constantine Constantine-Oran Oran-Alger	8:00-8:45 9:30-11:15 12:00-13:45 14:30-15:50 6:25-7:15	12/06 - - - 13/06
17	Alger-Bejaïa Bejaïa-Lyon Lyon-Bejaïa Bejaïa-Alger	9:00-9:30 10:10-11:55 12:40-14:25 15:15-15:45	
18	Alger-Annaba Annaba-Orly Orly-Annaba Annaba-Alger	16:45-17:35 6:30-8:35 9:25-11:30 12:50-13:40	11/06 12/06
19	Alger-Annaba Annaba-Orly Orly-Annaba Annaba-Alger	16:45-17:35 6:30-8:35 9:25-11:30 12:15-13:05	14/06 15/06
20	Alger-Bejaïa Bejaïa-Marseille Marseille-Bejaïa Bejaïa-Alger	9:20-9:50 10:35-11:50 12:50-14:05 14:50-15:20	10/06
21	Alger-Palma Palma-Alger	16:00-16:45 17:30-18:15	16/06

N° de la rotation	Segments	horaires	jour
22	Alger-Madrid	11:25-12:50	10/06
	Madrid-Alger	13:35-15:00	
23	Alger-Ghardaïa	16:45-17:45	10/06
	Ghardaïa-Alger	6:00-7:00	11/06
24	Alger-Tebessa	8:00-9:00	11/06
	Tebessa-Alger	9:45-10:45	11/06
25	Alger-Madrid	8:55-10:25	13/06
	Madrid-Alger	11:20-12:45	
26	Alger-Barcelone	14:00-15:10	12/06
	Barcelone-Alger	16:00-17:05	
27	Alger-Oran	18:00-18:50	16/06
	Oran-Alger	6:10-7:00	17/06
28	Alger-Annaba	7:45-8:35	17/06
	Annaba-Alger	9:20-10:10	17/06
29	Alger-Oran	16:00-16:50	16/06
	Oran-Alger	17:30-18:15	
30	Alger-Annaba	16:45-17:35	15/06
	Annaba-Alger	5:30-6:20	16/06
31	Alger-Geneve	8:15-10:05	16/06
	Geneve-Alger	10:55-12:45	
32	Alger-Zurich	9:40-11:45	12/06
	Zurich-Geneve	12:25-13:10	
	Geneve-Alger	13:50-15:40	
33, 34 et 35	Alger-Londres	12:00-14:45	11/06, 13/06 et 16/06
	Londres-Alger	15:30-18:00	
36	Alger-Bruxelles	8:30-11:00	16/06
	Bruxelles-Alger	11:45-14:20	
37 et 38	Alger-Francfurt	9:45-12:15	11/06 et 14/06
	Francfurt-Alger	13:00-15:30	
39	Alger-Berlin	7:20-10:20	16/06
	Berlin-Francfurt	11:10-12:15	
	Francfurt-Alger	13:00-15:30	
40 et 41	Alger-Casablanca	13:45-15:25	11/06 et 16/06
	Casablanca-Alger	16:15-17:55	
42	Alger-Annaba	7:45-8:35	12/06
	Annaba-Hassi messaoud	9:20-10:30	
	Hassi messaoud-Annaba	11:05-12:05	
	Annaba-Alger	12:50-13:40	
43	Alger-Annaba	7:45-8:35	14/06
	Annaba-Alger	9:20-10:10	
44	Alger-Oran	11:20-12:10	14/06
	Oran-Alger	13:00-13:50	
45	Alger-Annaba	12:45-13:35	10/06
	Annaba-Alger	14:20-15:10	
46	Alger-Annaba	12:45-13:35	14/06
	Annaba-Oran	14:20-15:35	
	Oran-Annaba	16:30-17:45	
	Annaba-Alger	18:30-19:20	
47	Alger-Annaba	18:35-19:25	12/06
	Annaba-Alger	6:15-7:05	13/06
48	Alger-El oued	8:15-9:15	13/06
	El oued-Alger	10:00-11:00	
49	Alger-Ghardaïa	18:00-19:00	12/06
	Ghardaïa-Alger	6:00-7:00	13/06
50	Alger-Oran	17:45-18:35	15/06
	Oran-Alger	5:30-6:20	16/06

N° de la rotation	Segments	horaires	jour
51	Alger-Annaba Annaba-Alger	7:15-8:05 8:50-9:40	16/06
52	Alger-Constantine Constantine-Alger	13:00-13:45 14:35-15:25	13/06
53	Alger-Constantine Constantine-Lyon Lyon-Constantine Constantine-Alger	8:00-8:45 9:30-11:15 12:00-13:45 5:15-6:00	15/06 16/06
54	Alger-Constantine Constantine-Tindouf Tindouf-Constantine Constantine-Alger	8:30-9:15 10:00-12:45 13:30-16:15 5:30-6:15	10/06 11/06
55	Alger-Adrar Adrar-Alger	7:30-9:10 10:00-11:40	11/06
56	Alger-Constantine Constantine-Alger	17:15-18:00 8:30-9:15	13/06 14/06
57	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	10:00-11:00 11:45-12:45	14/06 14/06
58	Alger-Constantine Constantine-Oran Oran-Constantine Constantine-Alger	13:30-14:15 15:00-16:15 17:00-18:15 5:30-6:15	14/06 15/06
59	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	11:15-12:15 13:00-14:00	13/06
60	Alger-Biskra Biskra-Alger	14:45-15:30 16:15-17:00	15/06
61	Alger-Annaba Annaba-El oued El oued-Annaba Annaba-Alger	18:15-19:05 7:00-7:50 8:35-9:20 10:10-11:00	15/06 16/06
62	Alger-Oran Oran-Bechar Bechar-Alger	6:45-7:35 8:25-9:40 10:40-12:00	11/06
63	Alger-Oran Oran-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	6:45-7:35 8:20-9:40 10:25-11:25	16/06
64	Alger-Oran Oran-Alger	12:00-12:50 13:40-14:30	11/06
65	Alger-Tlemcen Tlemcen-Alger	15:30-16:30 6:15-7:15	11/06 12/06
66	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	8:15-9:15 10:00-11:00	12/06
67	Alger-Oran Oran-Adrar Adra-Oran Oran-Alger	12:00-12:50 13:35-15:10 15:55-17:30 18:30-19:20	12/06
68	Alger-Oran Oran-Alger	12:35-13:25 14:10-15:00	15/06
69	Alger-Oran Oran-Alger	16:15-17:05 17:50-18:40	15/06
70	Alger-Oran Oran-Alger	16:15-17:05 17:50-18:40	13/06
71	Alger-Oran Oran-Bechar Bechar-Alger	13:30-14:20 15:05-16:35 17:20-18:55	12/06

72	Alger-Oran	15:00-15:50	13/06
	Oran-Hassi messaoud	16:35-17:55	
	Hassi messaoud-Oran	18:40-20:00	
	Oran-In amenas	10:20-12:05	14/06
	In amenas-Adrar Adrar-Alger	12:50-13:55 14:40-16:20	
73	Alger-Oran	11:20-12:10	10/06
	Oran-Alger	13:00-13:50	
74	Alger-Ouargla	15:00-15:50	10/06
	Ouargla-Alger	16:35-17:35	
75	Alger-Tlemcen	15:30-16:30	16/06
	Tlemcen-Alger	6:15-7:15	17/06
76	Alger-Hassi messaoud	8:15-9:15	17/06
	Hassi messaoud-Alger	10:00-11:00	
77	Alger-Bechar	13:30-15:00	11/06
	Bechar-Oran	15:45-17:15	
	Oran-Alger	18:00-18:50	
78	Alger-Bechar	13:45-15:15	12/06
	Bechar-Oran	16:00-17:30	
	Oran-Alger	18:15-19:05	
79	Alger-Bechar	8:05-9:35	13/06
	Bechar-Tindouf	10:20-11:35	
	Tindouf-Bechar	12:20-13:35	
	Bechar-Alger	14:20-15:50	
80	Alger-Bechar	8:05-9:35	14/06
	Bechar-Constantine	10:20-11:35	
	Constantine-Bechar	12:20-13:35	
	Bechar-Alger	14:20-15:50	
81	Alger-Bechar	7:00-8:30	15/06
	Bechar-Tindouf	9:20-10:50	
	Tindouf-Bechar	11:35-12:50	
	Bechar-Alger	13:50-15:20	
82 et 83	Alger-Adrar	7:30-9:10	11/06 et 13/06
	Adrar-Alger	10:00-11:40	
84	Alger-Adrar	12:45-14:25	15/06
	Adrar-Alger	15:10-16:50	
85, 86 et 87	Alger-Tindouf	6:30-9:00	11, 14 et 16/06
	Tindouf-Alger	9:45-12:15	
88	Alger-Tindouf	14:15-16:35	13/06
	Tindouf-Alger	17:15-19:35	
89	Alger-Timimoun	13:45-15:05	16/06
	Timimoun-Oran	15:50-17:10	
	Oran-Alger	18:00-18:50	
90	Alger-Annaba	16:45-17:35	11/06
	Annaba-Oran	12:30-13:45	
	Oran-Annaba	14:30-15:45	
	Annaba-Alger	17:00-17:50	
91	Alger-Oran	13:30-14:20	12/06
	Oran-Constantine	16:35-17:50	
	Constantine-Alger	18:30-19:15	
92	Alger-Ghardaia	17:30-18:30	13/06
	Ghardaia-Alger	6:00-7:00	14/06
93	Alger-Biskra	8:15-9:00	14/06
	Biskra-Alger	9:45-10:30	
94	Alger-El oued	14:00-15:00	14/06
	El oued-Alger	15:45-16:45	
95	Alger-Ghardaia	17:30-18:30	14/06
	Ghardaia-Alger	6:15-7:15	15/06

96	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	8:30-9:30 10:15-11:15	15/06
97	Alger-Ghardaia Ghardaia-Adrar Adrar-Ghardaia Ghardaia-Alger	8:10-9:10 9:55-11:10 11:55-13:10 13:55-14:55	14/06
98	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	13:45-14:45 15:15-16:15	10/06
99	Alger-Annaba Annaba-Alger	17:00-17:50 18:35-19:25	10/06
100	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	13:45-14:45 15:30-16:30	15/06
101	Alger-Ghardaia Ghardaia-Alger	17:30-18:30 6:00-7:00	15/06 16/06
102	Alger-Biskra Biskra-Alger	8:00-8:45 9:30-10:15	16/06
103	Alger-Ouargla Ouargla-In amenas In amenas-Ouargla Ouargla-Alger	6:30-7:30 8:15-9:15 10:00-11:00 11:45-12:45	12/06
104	Alger-Ouargla Ouargla-In amenas In amenas-Ouargla Ouargla-Alger	11:15-12:15 13:00-14:00 14:45-15:45 16:30-17:30	16/06
105 et 106	Alger-Tamanrasset Tamanrasset-Alger	12:50-15:20 16:05-18:25	11 et 14/06
107	Alger-In amenas In amenas-Djanet Djanet-Ghardaia Ghardaia-Djanet Djanet-Tamanrasset Tamanrasset-Djanet Djanet-Alger	13:00-14:45 15:30-16:15 17:00-18:15 6:00-7:30 8:15-9:05 9:50-10:40 11:25-13:35	11/06 12/06
108	Alger-In amenas In amenas-Alger	14:00-15:45 16:30-18:15	13/06
109	Alger-In amenas In amenas-Ouargla Ouargla-Oran Oran-Ouargla Ouargla-In amenas In amenas-Alger	14:00-15:45 16:30-17:30 18:15-19:40 7:05-8:30 9:15-10:15 11:00-12:45	15/06 16/06
110	Alger-El oued El oued-Alger	15:20-16:20 17:05-18:05	11/06
111	Alger-El oued El oued-Alger	13:15-14:15 15:00-16:00	16/06
112	Alger-Ghardaia Ghardaia-Alger	17:30-18:30 6:00-7:00	16/06 17/06
113	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	8:00-9:00 9:45-10:45	17/06
114	Alger-Ghardaia Ghardaia-Tamanrasset Tamanrasset-Oran Oran-Alger	11:30-12:30 13:15-15:00 15:45-18:15 6:10-7:00	10/06 11/06
115	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	8:15-9:15 10:00-11:00	11/06
116	Alger-Ghardaia Ghardaia-Tamanrasset Tamanrasset-Ghardaia Ghardaia-Alger	10:30-11:30 12:15-14:00 14:45-16:30 17:15-18:00	15/06

117 et 118	Alger-Ouargla Ouargla-Tamanrasset Tamanrasset-Ouargla Ouargla-Alger	6:30-7:30 8:15-10:00 10:45-12:30 13:15-14:15	14/06 et 16/06
119 et 120	Alger-El Golea El Golea-Tamanrasset Tamanrasset-El oued El oued-Alger	10:00-11:15 12:00-13:30 14:15-15:45 16:30-17:45	10/06 et 13/06
121	Alger-Ouargla Ouargla-vvz vvz-Ouargla Ouargla-Alger	7:45-8:45 9:30-10:45 11:30-12:45 13:30-14:30	13/06
122	Alger-Ouargla Ouargla-Djanet Djanet-Ouargla Ouargla-Alger	6:30-7:30 8:15-9:45 10:30-11:55 12:35-13:35	15/06
123	Alger-Constantine Constantine-Ouargla Ouargla-Constantine Constantine-Alger	15:45-16:30 14:30-15:30 16:15-17:15 5:15-6:00	14/06
124	Alger-In amenas In amenas-Constantine Constantine-Alger	7:00-8:45 9:30-11:00 11:45-12:30	11/06
125	Alger-In amenas In amenas-Alger	9:00-10:45 11:30-13:15	15/06
126	Alger-Constantine Constantine-In amenas In amenas-Alger	13:00-13:45 14:30-16:00 16:45-18:30	11/06
127	Alger-In amenas In amenas-Alger	14:00-15:45 16:30-18:15	14/06
128	Alger-Hassi messaoud Hassi messaoud-Alger	10:40-11:40 12:25-13:25	16/06
129	Alger-Tebessa Tebessa-Alger	14:30-15:30 16:15-17:15	16/06
130	Alger-Hassi messaoud Hassi mess.-Constantine Constantine-Hassi mess. Hassi messaoud-Alger	8:30-9:35 10:15-11:15 12:00-13:00 13:45-14:45	11/06

RESULTATS OBTENUS PAR LE GAMS ROTATIONS OPTIMALES

Les heures sont exprimées en
heures centièmes

segment	heure	n° segment
la rotation numéro 1		
alg nce	7.66 8.91	1
nce alg	9.66 11.08	2
la rotation numéro 2		
alg tee	12.58 13.58	3
tee alg	14.33 15.33	4
la rotation numéro 5		
alg bja	9.3333 9.83	5
bja mrs	10.58 11.83	6
mrs bja	12.83 14.08	7
bja alg	14.83 15.33	8
la rotation numéro 7		
alg mad	11.41 12.83	9
mad alg	13.58 15.00	10
la rotation numéro 8		
alg gha	16.75 17.75	11
gha alg	6.00 7.00	36
la rotation numéro 10		
alg gha	16.75 17.75	11
gha djg	6.00 7.50	119
djg tnr	8.25 9.08	120
tnr djg	9.83 10.66	121
djg alg	11.41 13.58	122
la rotation numéro 12		
alg aae	12.75 13.58	12
aae alg	14.33 15.16	13
la rotation numéro 30		
alg czl	8.50 9.25	14
czl tin	10.00 12.75	15
tin czl	13.50 16.25	16
czl alg	5.50 6.25	45
la rotation numéro 38		
alg orn	11.33 12.16	17
orn alg	13.00 13.83	18
la rotation numéro 58		
alg ogx	15.00 15.83	19
ogx alg	16.58 17.58	20

la rotation numéro 61		
alg hme	13.75 14.75	21
hme alg	15.25 16.25	22
la rotation numéro 74		
alg aae	17.00 17.83	23
aae alg	18.58 19.41	24
la rotation numéro 102		
alg gha	11.50 12.50	25
gha tnr	13.25 15.00	26
tnr orn	15.75 18.25	27
orn alg	6.17 7.00	69
la rotation numéro 131		
alg elg	10.00 11.25	28
elg tnr	12.00 13.50	29
tnr elg	14.25 15.75	30
elg alg	16.50 17.75	31
la rotation numéro 133		
alg bsk	14.75 15.50	32
bsk alg	16.25 17.00	33
la rotation numéro 134		
alg gha	18.25 19.25	34
gha alg	6.00 7.00	140
la rotation numéro 135		
alg aae	16.75 17.58	35
aae ory	6.50 8.58	89
ory aae	9.41 11.50	90
aae alg	12.83 13.67	91
la rotation numéro 171		
alg lhr	12.00 14.75	39
lhr alg	15.50 18.00	40
la rotation numéro 173		
alg fra	9.75 12.25	41
fra alg	13.00 15.50	42
la rotation numéro 174		
alg cmn	13.75 15.41	43
cmn alg	16.25 17.91	44
la rotation numéro 175		
alg azr	7.50 9.17	46
azr alg	10.00 11.66	47

la rotation numéro 181 alg orn 6.75 7.58 48 orn cbh 8.41 9.91 49 cbh alg 10.67 12.00 50
la rotation numéro 217 alg orn 12.00 12.83 51 orn alg 13.67 14.50 52
la rotation numéro 235 alg tlm 15.50 16.50 53 tlm alg 6.25 7.25 103
la rotation numéro 236 alg cbh 13.50 15.00 54 cbh orn 15.75 17.25 55 orn alg 18.00 18.83 56
la rotation numéro 254 alg azr 7.50 9.17 57 azr alg 10.00 11.67 58
la rotation numéro 259 alg tin 6.50 9.00 59 tin alg 9.75 12.25 60
la rotation numéro 293 alg aae 16.75 17.58 61 aac alg 17.00 17.83 114
la rotation numéro 295 alg tnr 12.83 15.33 62 tnr alg 16.08 18.41 63
la rotation numéro 297 alg iam 13.00 14.75 64 iam djg 15.50 16.25 65 djg gha 17.00 18.25 66 gha alg 5.50 6.50 84
la rotation numéro 304 alg ciu 15.33 16.33 67 ciu alg 17.08 18.08 68
la rotation numéro 306 alg hme 8.25 9.25 70 hme alg 10.00 11.00 71
la rotation numéro 330 alg iam 7.00 8.75 72 iam czl 9.50 11.00 73 czl hme 12.00 13.00 80 hme alg 13.75 14.75 81
la rotation numéro 339 alg czl 13.00 13.75 75 czl iam 14.50 16.00 76 iam alg 16.75 18.50 77
la rotation numéro 358 alg hme 8.50 9.583 78 hme czl 10.25 11.25 79 czl alg 11.75 12.50 74

la rotation numéro 373 alg lys 7.50 9.08 82 lys alg 10.17 11.75 83
la rotation numéro 389 alg czl 8.00 8.75 85 czl lys 9.50 11.25 86 lys czl 12.00 13.75 87 czl orn 14.50 15.83 88 orn alg 6.41 7.25 132
la rotation numéro 415 alg bcn 14.00 15.16 92 bcn alg 16.00 17.08 93
la rotation numéro 416 alg zrh 9.67 11.75 94 zrh gva 12.47 13.17 95 gva alg 13.83 15.67 96
la rotation numéro 419 alg aae 7.75 8.58 97 aac hme 9.33 10.50 98 hme aae 11.08 12.08 99 aac alg 12.83 13.67 100
la rotation numéro 426 alg aae 7.75 8.58 97 aac orn 12.50 13.75 112 orn cbh 15.08 16.58 107 cbh alg 17.33 18.83 108
la rotation numéro 440 alg aae 7.75 8.58 97 aac orn 12.50 13.75 112 orn aae 14.50 15.75 113 aac alg 6.25 7.08 137
la rotation numéro 457 alg aae 18.58 19.41 101 aac alg 9.33 10.17 178
la rotation numéro 461 alg gha 18.00 19.00 102 gha alg 6.00 7.00 200
la rotation numéro 465 alg tee 8.25 9.25 104 tee alg 10.00 11.00 105
la rotation numéro 477 alg orn 13.50 14.33 106 orn czl 16.58 17.83 110 czl alg 18.50 19.25 111
la rotation numéro 503 alg orn 13.50 14.33 109 orn alg 18.2500 19.08 129
la rotation numéro 510 alg ogx 6.50 7.50 115 ogx iam 8.25 9.25 116 iam ogx 10.00 11.00 117 ogx alg 11.75 12.75 118

la rotation numéro 552
alg orn 12.00 12.83 123
orn azr 13.58 15.17 124
azr orn 15.91 17.50 125
orn hmc 16.58 17.91 149
hmc orn 18.67 20.00 150
orn iam 10.33 12.08 191
iam azr 12.83 13.91 192
azr alg 14.67 16.33 193
la rotation numéro 563
alg cbh 13.75 15.25 127
cbh orn 16.00 17.50 128
orn alg 18.50 19.33 126
la rotation numéro 571
alg mrs 9.50 10.75 130
mrs alg 11.75 13.00 131
la rotation numéro 572
alg mad 8.9167 10.417 133
mad alg 11.33 12.75 134
la rotation numéro 573
alg lhr 12.00 14.750 135
lhr alg 15.50 18.00 136
la rotation numéro 574
alg clu 8.2500 9.2500 138
clu alg 10.00 11.00 139
la rotation numéro 576
alg czl 13.0000 13.7500 141
czl alg 14.58 15.417 142
la rotation numéro 587
alg czl 17.25 18.00 143
czl alg 8.500 9.25 185
la rotation numéro 597
alg tee 11.2500 12.2500 144
tee alg 13.0000 14.0000 145
la rotation numéro 600
alg orn 16.2500 17.0833 146
orn alg 13.0000 13.8333 180
la rotation numéro 613
alg orn 15.0000 15.8333 148
orn alg 17.25 18.6667 147
la rotation numéro 627
alg cbh 8.0833 9.5833 151
cbh tin 10.3333 11.8333 152
tin cbh 12.5833 14.0833 153
cbh alg 14.8333 16.333 154
la rotation numéro 650
alg azr 7.5000 9.1667 155
azr alg 10.0000 11.6667 156
la rotation numéro 656
alg tin 14.2500 16.5833 157
tin alg 17.2500 19.5833 158

la rotation numéro 661
alg gha 17.5000 18.50 159
gha azr 9.9167 11.1667 207
azr gha 11.9167 13.1667 208
gha alg 13.917 14.917 209
la rotation numéro 669
alg iam 14.00 15.750 160
iam alg 16.50 18.250 161
la rotation numéro 674
alg clg 10.00 11.25 162
clg tmr 12.0000 13.5000 163
tmr clg 14.2500 15.7500 164
clg alg 16.5000 17.7500 165
la rotation numéro 676
alg ogx 7.7500 8.7500 166
ogx vvz 9.5000 10.7500 167
vvz ogx 11.5000 12.7500 168
ogx alg 13.500 14.33 169
la rotation numéro 692
alg tee 14.7500 15.7500 170
tee alg 16.5000 17.5000 171
la rotation numéro 703
alg aac 18.2500 19.0833 172
aac alg 12.2500 13.0833 229
la rotation numéro 715
alg orn 18.5000 19.3333 173
orn lys 13.0000 14.9167 269
lys orn 15.6667 17.5833 270
orn alg 5.5000 6.3333 296
la rotation numéro 736
alg aac 16.7500 17.5833 174
aac alg 18.5000 19.3333 184
la rotation numéro 754
alg fra 9.7500 12.2500 175
fra alg 13.0000 15.5000 176
la rotation numéro 788
alg aac 7.7500 8.58 177
aac orn 14.33 15.58 182
orn czl 17.0000 18.2500 190
czl lys 9.5000 11.2500 273
lys orn 15.6667 17.5833 270
orn alg 17.5000 18.2500 285
la rotation numéro 853
alg orn 11.3333 12.1667 179
orn aac 16.5000 17.7500 183
aac ory 6.5000 8.5833 227
ory aac 9.4167 11.5000 228
aac clu 7.0000 7.8333 299
clu hmc 8.5833 9.3333 300
hmc alg 10.417 11.417 304
la rotation numéro 1006
alg aac 12.7500 13.5833 181
aac alg 5.5000 6.3333 221

la rotation numéro 1016 alg hmc 10.00 11.00 186 hmc alg 15.500 16.500 252
la rotation numéro 1055 alg czl 13.5000 14.250 188 czl orn 15.0000 16.2500 189 orn alg 14.1667 15.0000 239
la rotation numéro 1157 alg cbh 8.0833 9.5833 194 cbh czl 10.3333 11.5833 195 czl cbh 12.3333 13.5833 196 cbh alg 14.33 15.833 197
la rotation numéro 1163 alg tin 6.5000 9.0000 198 tin alg 9.7500 12.2500 199
la rotation numéro 1165 alg bsk 8.2500 9.0000 201 bsk alg 9.7500 10.5000 202
la rotation numéro 1168 alg elu 14.0000 15.0000 203 elu alg 15.7500 16.7500 204
la rotation numéro 1173 alg gha 17.50 18.5000 205 gha tnr 12.2500 14.000 262 tnr gha 14.750 16.500 263 gha alg 17.250 18.000 264
la rotation numéro 1185 alg gha 8.1667 9.1667 206 gha alg 6.2500 7.2500 248
la rotation numéro 1190 alg tnr 12.833 15.333 210 tnr alg 16.083 18.417 211
la rotation numéro 1194 alg ogx 6.5000 7.5000 212 ogx tnr 8.2500 10.0000 213 tnr ogx 10.750 12.500 214 ogx alg 13.250 14.250 215
la rotation numéro 1244 alg czl 15.7500 16.5000 216 czl alg 5.5000 6.2500 234
la rotation numéro 1280 alg iam 14.00 15.75 217 iam alg 16.50 18.250 218
la rotation numéro 1300 alg lys 7.5000 9.0833 219 lys alg 10.1667 11.7500 220
la rotation numéro 1327 alg tls 8.0000 9.4167 222 tls alg 10.1667 11.5833 223
la rotation numéro 1328 alg lil 9.0000 11.5000 224 lil alg 12.2500 14.5833 225
la rotation numéro 1329 alg tlm 15.5000 16.5000 226 tlm alg 6.2500 7.2500 276

la rotation numéro 1331 alg aac 16.7500 17.5833 230 aac alg 5.5000 6.3333 288
la rotation numéro 1340 alg aac 14.5000 15.3333 231 aac alg 16.0833 16.8333 232
la rotation numéro 1358 alg orn 17.7500 18.5833 233 orn ogx 7.0833 8.5000 318 ogx iam 9.2500 10.2500 319 iam alg 11.00 12.7500 320
la rotation numéro 1360 alg bsk 14.7500 15.5000 235 bsk alg 16.2500 17.0000 236
la rotation numéro 1367 alg aac 18.2500 19.0833 237 aac alg 10.1667 11.0000 301
la rotation numéro 1371 alg orn 12.5833 13.4167 238 orn alg 17.8333 18.6667 241
la rotation numéro 1385 alg orn 16.2500 17.0833 240 orn alg 18.500 19.333 271
la rotation numéro 1397 alg cbh 7.0000 8.5000 242 cbh tin 9.3333 10.8333 243 tin cbh 11.5833 12.833 244 cbh alg 13.833 12.8333 245
la rotation numéro 1399 alg azr 12.750 14.4167 246 azr alg 15.1667 16.833 247
la rotation numéro 1400 alg tee 8.5000 9.5000 249 tee alg 10.2500 11.2500 250
la rotation numéro 1402 alg hmc 13.7500 14.750 251 hmc alg 15.5000 16.500 252
la rotation numéro 1406 alg gha 17.500 18.500 253 gha alg 6.0000 7.0000 311
la rotation numéro 1408 alg ogx 6.5000 7.5000 254 ogx djg 8.2500 9.7500 255 djg ogx 10.5000 11.9167 256 ogx alg 12.583 13.583 257
la rotation numéro 1437 alg iam 14.000 15.750 258 iam ogx 16.5000 17.500 259 ogx orn 18.250 19.667 260 orn hmc 8.3333 9.6667 303 hmc alg 9.7500 10.7500 345
la rotation numéro 1456 alg gha 10.500 11.500 261 gha alg 17.2500 18.000 264

la rotation numéro 1476
alg iam 9.0000 10.7500 267
iam alg 11.500 13.250 268
la rotation numéro 1510
alg czl 8.0000 8.7500 272
czl lys 9.5000 11.2500 273
lys czl 12.0000 11.7500 274
czl alg 5.2500 6.0000 328
la rotation numéro 1512
alg aae 16.7500 17.5833 275
aae alg 5.5000 6.3333 336
la rotation numéro 1514 est
constituée de 4 segments
alg bja 9.0000 9.5000 277
bj a lys 10.1667 11.8833 278
lys bja 12.6667 14.4167 279
bj a alg 15.250 15.750 280
la rotation numéro 1516
alg pmi 16.0000 16.750 281
pmi alg 17.500 18.2500 282
la rotation numéro 1517
alg orn 18.000 18.833 283
orn alg 6.1667 7.0000 339
la rotation numéro 1518
alg orn 16.000 16.833 284
orn alg 17.500 18.2500 285
la rotation numéro 1521
alg gva 8.2500 10.0833 286
gva alg 10.9167 12.750 287
la rotation numéro 1522
alg lhr 12.000 14.7500 289
lhr alg 15.5000 18.000 290
la rotation numéro 1523
alg bru 8.5000 11.0000 291
bru alg 11.7500 14.333 292
la rotation numéro 1524
alg sxf 7.3333 10.3333 293
sxf fra 11.1667 12.2500 294
fra alg 13.0000 15.5000 295
la rotation numéro 1525
alg aae 7.2500 8.0833 297
aae alg 8.8333 9.6667 298
la rotation numéro 1529
alg orn 6.7500 7.5833 302
orn alg 17.500 18.2500 285
la rotation numéro 1535
alg tlm 15.5000 16.500 305
tlm alg 6.2500 7.2500 342
la rotation numéro 1536
alg tin 6.5000 9.0000 306
tin alg 9.7500 12.2500 307

la rotation numéro 1537
alg tmx 13.75 15.0833 308
tmx orn 15.833 17.167 309.
orn alg 18.00 18.833 310
la rotation numéro 1539 est
constituée de 2 segments
alg bsk 8.0000 8.7500 312
bsk alg 9.5000 10.2500 313
la rotation numéro 1540 est
constituée de 4 segments
alg ogx 11.2500 12.250 314
ogx iam 13.000 14.000 315
iam ogx 14.750 15.750 316
ogx alg 16.500 17.500 317
la rotation numéro 1543
alg ehu 13.250 14.250 321
ehu alg 15.0000 16.000 322
la rotation numéro 1544
alg gha 17.500 18.5000 323
gha alg 6.0000 7.0000 343
la rotation numéro 1550
alg ogx 6.5000 7.5000 324
ogx tmr 8.2500 10.0000 325
tmr ogx 10.750 12.500 326
ogx alg 13.250 14.250 327
la rotation numéro 1552
alg hmc 10.667 11.667 329
hmc alg 12.417 13.417 330
la rotation numéro 1554
alg tee 14.5000 15.5000 331
tee alg 16.2500 17.2500 332
la rotation numéro 1555
alg cmn 13.750 15.417 333
cmn alg 16.250 17.917 334
la rotation numéro 1556
alg nec 7.6667 8.9167 337
nec alg 9.6667 11.0833 338
la rotation numéro 1557
alg aae 7.7500 8.5833 340
aae alg 9.3333 10.1667 341
la rotation numéro 1558
alg hmc 8.0000 9.0000 344
hmc alg 9.7500 10.7500 345

alg : Alger
ory : Orly
tls : Toulouse
sxf : Berlin
fra : Francfurt
gva : Geneve
zrh : Zurich
mad : Madrid
bcn : Barcelone
pmi : Palma
nce : Nice
lhr : Londres
aac : Annaba
orn : Oran
czi : Constantine
tln : Tlemcen
bjj : Bejaia
tin : Tindouf
cbh : Bechar
clu : El oued
elg : El goica
tmr : Tamanrasset
djj : Djanet
azr : Adrar
cmn : Casablanca
tun : Tunis

- 1 SET I/
- 2 SEG1 * SEG345/;
- 3 SET J/
- 4 ROT1 * ROT1558/;
- 5 PARAMETER B(I,J) /
- 6 SEG1.ROT1 1
- 7 SEG2.ROT1 1
- 8 SEG3.ROT2 1
- 9 SEG4.ROT2 1
- 10 SEG3.ROT3 1
- 11 SEG38.ROT3 1
- 12 SEG3.ROT4 1
- 13 SEG105.ROT4 1
- 14 SEG5.ROT5 1
- 15 SEG6.ROT5 1
- 16 SEG7.ROT5 1
- 17 SEG8.ROT5 1
- 18 SEG5.ROT6 1
- 19 SEG8.ROT6 1
- 20 SEG9.ROT7 1
- 21 SEG10.ROT7 1
- 22 SEG11.ROT8 1
- 23 SEG36.ROT8 1
- 24 SEG11.ROT9 1
- 25 SEG84.ROT9 1
- 26 SEG11.ROT10 1
- 27 SEG119.ROT10 1
- 28 SEG120.ROT10 1
- 29 SEG121.ROT10 1
- 30 SEG122.ROT10 1
- 31 SEG11.ROT11 1
- 32 SEG119.ROT11 1
- 33 SEG122.ROT11 1
- 34 SEG12.ROT12 1
- 35 SEG13.ROT12 1
- 36 SEG12.ROT13 1
- 37 SEG24.ROT13 1
- 38 SEG12.ROT14 1
- 39 SEG89.ROT14 1
- 40 SEG90.ROT14 1
- 41 SEG91.ROT14 1
- 42 SEG12.ROT15 1
- 43 SEG89.ROT15 1
- 44 SEG90.ROT15 1
- 45 SEG100.ROT15 1
- 46 SEG12.ROT16 1
- 47 SEG89.ROT16 1
- 48 SEG90.ROT16 1
- 49 SEG112.ROT16 1
- 50 SEG126.ROT16 1
- 51 SEG12.ROT17 1
- 52 SEG89.ROT17 1
- 53 SEG90.ROT17 1

54 SEG112.ROT17 1
55 SEG129.ROT17 1
56 SEG12.ROT18 1
57 SEG89.ROT18 1
58 SEG90.ROT18 1
59 SEG114.ROT18 1
60 SEG12.ROT19 1
61 SEG91.ROT19 1
62 SEG12.ROT20 1
63 SEG98.ROT20 1
64 SEG99.ROT20 1
65 SEG91.ROT20 1
66 SEG12.ROT21 1
67 SEG98.ROT21 1
68 SEG99.ROT21 1
69 SEG100.ROT21 1
70 SEG12.ROT22 1
71 SEG98.ROT22 1
72 SEG99.ROT22 1
73 SEG114.ROT22 1
74 SEG12.ROT23 1
75 SEG100.ROT23 1
76 SEG12.ROT24 1
77 SEG112.ROT24 1
78 SEG107.ROT24 1
79 SEG108.ROT24 1
80 SEG12.ROT25 1
81 SEG112.ROT25 1
82 SEG110.ROT25 1
83 SEG111.ROT25 1
84 SEG12.ROT26 1
85 SEG112.ROT26 1
86 SEG113.ROT26 1
87 SEG114.ROT26 1
88 SEG12.ROT27 1
89 SEG112.ROT27 1
90 SEG126.ROT27 1
91 SEG12.ROT28 1
92 SEG112.ROT28 1
93 SEG129.ROT28 1
94 SEG12.ROT29 1
95 SEG114.ROT29 1
96 SEG14.ROT30 1
97 SEG15.ROT30 1
98 SEG16.ROT30 1
99 SEG45.ROT30 1
100 SEG14.ROT31 1
101 SEG15.ROT31 1
102 SEG16.ROT31 1
103 SEG74.ROT31 1
104 SEG14.ROT32 1
105 SEG15.ROT32 1
106 SEG16.ROT32 1

General Algebraic Modeling System
Compilation

107 SEG76.ROT32 1
108 SEG77.ROT32 1
109 SEG14.ROT33 1
110 SEG15.ROT33 1
111 SEG16.ROT33 1
112 SEG76.ROT33 1
113 SEG117.ROT33 1
114 SEG118.ROT33 1
115 SEG14.ROT34 1
116 SEG15.ROT34 1
117 SEG16.ROT34 1
118 SEG80.ROT34 1
119 SEG81.ROT34 1
120 SEG14.ROT35 1
121 SEG15.ROT35 1
122 SEG16.ROT35 1
123 SEG80.ROT35 1
124 SEG99.ROT35 1
125 SEG91.ROT35 1
126 SEG14.ROT36 1
127 SEG15.ROT36 1
128 SEG16.ROT36 1
129 SEG80.ROT36 1
130 SEG99.ROT36 1
131 SEG100.ROT36 1
132 SEG14.ROT37 1
133 SEG15.ROT37 1
134 SEG16.ROT37 1
135 SEG80.ROT37 1
136 SEG99.ROT37 1
137 SEG114.ROT37 1
138 SEG17.ROT38 1
139 SEG18.ROT38 1
140 SEG17.ROT39 1
141 SEG49.ROT39 1
142 SEG50.ROT39 1
143 SEG17.ROT40 1
144 SEG49.ROT40 1
145 SEG55.ROT40 1
146 SEG56.ROT40 1
147 SEG17.ROT41 1
148 SEG49.ROT41 1
149 SEG55.ROT41 1
150 SEG107.ROT41 1
151 SEG108.ROT41 1
152 SEG17.ROT42 1
153 SEG49.ROT42 1
154 SEG55.ROT42 1
155 SEG110.ROT42 1
156 SEG111.ROT42 1
157 SEG17.ROT43 1
158 SEG49.ROT43 1
159 SEG55.ROT43 1

6944 SEG286.ROT1521 1
6945 SEG287.ROT1521 1
6946 SEG289.ROT1522 1
6947 SEG290.ROT1522 1
6948 SEG291.ROT1523 1
6949 SEG292.ROT1523 1
6950 SEG293.ROT1524 1
6951 SEG294.ROT1524 1
6952 SEG295.ROT1524 1
6953 SEG297.ROT1525 1
6954 SEG298.ROT1525 1
6955 SEG297.ROT1526 1
6956 SEG301.ROT1526 1
6957 SEG297.ROT1527 1
6958 SEG336.ROT1527 1
6959 SEG297.ROT1528 1
6960 SEG341.ROT1528 1
6961 SEG302.ROT1529 1
6962 SEG285.ROT1529 1
6963 SEG302.ROT1530 1
6964 SEG303.ROT1530 1
6965 SEG304.ROT1530 1
6966 SEG302.ROT1531 1
6967 SEG303.ROT1531 1
6968 SEG330.ROT1531 1
6969 SEG302.ROT1532 1
6970 SEG303.ROT1532 1
6971 SEG345.ROT1532 1
6972 SEG302.ROT1533 1
6973 SEG310.ROT1533 1
6974 SEG302.ROT1534 1
6975 SEG339.ROT1534 1
6976 SEG305.ROT1535 1
6977 SEG342.ROT1535 1
6978 SEG306.ROT1536 1
6979 SEG307.ROT1536 1
6980 SEG308.ROT1537 1
6981 SEG309.ROT1537 1
6982 SEG310.ROT1537 1
6983 SEG308.ROT1538 1
6984 SEG309.ROT1538 1
6985 SEG339.ROT1538 1
6986 SEG312.ROT1539 1
6987 SEG313.ROT1539 1
6988 SEG314.ROT1540 1
6989 SEG315.ROT1540 1
6990 SEG316.ROT1540 1
6991 SEG317.ROT1540 1
6992 SEG314.ROT1541 1
6993 SEG317.ROT1541 1
6994 SEG314.ROT1542 1
6995 SEG327.ROT1542 1
6996 SEG321.ROT1543 1

General Algebraic Modeling System
Compilation

6997 SEG322.ROT1543 1
6998 SEG323.ROT1544 1
6999 SEG343.ROT1544 1
7000 SEG324.ROT1545 1
7001 SEG315.ROT1545 1
7002 SEG316.ROT1545 1
7003 SEG317.ROT1545 1
7004 SEG324.ROT1546 1
7005 SEG317.ROT1546 1
7006 SEG324.ROT1547 1
7007 SEG319.ROT1547 1
7008 SEG316.ROT1547 1
7009 SEG317.ROT1547 1
7010 SEG324.ROT1548 1
7011 SEG319.ROT1548 1
7012 SEG320.ROT1548 1
7013 SEG324.ROT1549 1
7014 SEG325.ROT1549 1
7015 SEG326.ROT1549 1
7016 SEG317.ROT1549 1
7017 SEG324.ROT1550 1
7018 SEG325.ROT1550 1
7019 SEG326.ROT1550 1
7020 SEG327.ROT1550 1
7021 SEG324.ROT1551 1
7022 SEG327.ROT1551 1
7023 SEG329.ROT1552 1
7024 SEG330.ROT1552 1
7025 SEG329.ROT1553 1
7026 SEG345.ROT1553 1
7027 SEG331.ROT1554 1
7028 SEG332.ROT1554 1
7029 SEG333.ROT1555 1
7030 SEG334.ROT1555 1
7031 SEG337.ROT1556 1
7032 SEG338.ROT1556 1
7033 SEG340.ROT1557 1
7034 SEG341.ROT1557 1
7035 SEG344.ROT1558 1
7036 SEG345.ROT1558 1
7037 /;
7038 PARAMETER C(J) /
7039 ROT1 17.41667
7040 ROT2 16.75000
7041 ROT3 36.16667
7042 ROT4 60.41667
7043 ROT5 20.00000
7044 ROT6 20.00000
7045 ROT7 17.58333
7046 ROT8 28.25000
7047 ROT9 51.75000
7048 ROT10 58.83333
7049 ROT11 58.83333

-1 COST

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 186
General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS 2 SINGLE EQUATIONS 345
BLOCKS OF VARIABLES 2 SINGLE VARIABLES 1559
NON ZERO ELEMENTS 8382 DISCRETE VARIABLES 1558

GENERATION TIME = 46.080 SECONDS

EXECUTION TIME = 46.190 SECONDS VERID MW2-00-064

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 187
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

SOLVE SUMMARY

MODEL DUNE OBJECTIVE Z
TYPE MIP DIRECTION MINIMIZE
SOLVER OSL FROM LINE 8612

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 3207.0833

RESOURCE USAGE, LIMIT 82.440 1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT 502 1000

--- GAMS/OSL 2.002

Reading option file C:\GAMS386\OSL.OPT

User supplied option file:
>PRESOLVE -1

Work space allocated -- 2.16 Mb

OSL step: Reading data 1.32 Seconds

OSL step: Scale 2.75 Seconds
Range of matrix coefficients:
before scaling: 1.0000 - 75.0833
after scaling: 0.0959 - 1.0000

OSL step: Crash 3.57 Seconds
Crash option: 1

OSL step: Primal Simplex 59.65 Seconds
Status: Successful (optimal)
Iterations: 493

+ 17*X(ROT1542) + 16.75*X(ROT1543) + 27.5*X(ROT1544) + 25*X(ROT1545)
 + 25*X(ROT1546) + 25*X(ROT1547) + 20.25*X(ROT1548) + 25*X(ROT1549)
 + 21.75*X(ROT1550) + 21.75*X(ROT1551) + 16.75*X(ROT1552)
 + 38.0833*X(ROT1553) + 16.75*X(ROT1554) + 18.1667*X(ROT1555)
 + 17.4167*X(ROT1556) + 16.4167*X(ROT1557) + 16.75*X(ROT1558) - Z =E= 0
 ; (LHS = 0)

---- REC =E= equations du modele

REC(SEG1).. X(ROT1) =E= 1 ; (LHS = 0 ***)

REC(SEG2).. X(ROT1) =E= 1 ; (LHS = 0 ***)

REC(SEG3).. X(ROT2) + X(ROT3) + X(ROT4) =E= 1 ; (LHS = 0 ***)

REMAINING 336 ENTRIES SKIPPED

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 185
 General Algebraic Modeling System
 Column Listing SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

---- X variables du modele

X(ROT1)
 (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
 17.4167 COST
 1 REC(SEG1)
 1 REC(SEG2)

X(ROT2)
 (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
 16.75 COST
 1 REC(SEG3)
 1 REC(SEG4)

X(ROT3)
 (.LO, .L, .UP = 0, 0, 1)
 36.1667 COST
 1 REC(SEG3)
 1 REC(SEG38)

REMAINING 1555 ENTRIES SKIPPED

---- Z fr

Z
 (.LO, .L, .UP = -INF, 0, +INF)

Objective : 3207.0833

OSL step: Branch&Bound 11.81 Seconds

Status: Successful (optimal)

Iterations: 9

Nodes : 2

Objective : 3207.0833

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- EQU COST -1.000

COST objectif

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 195

General Algebraic Modeling System

Solution Report SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

--- VAR X variables du modele

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

ROT1	1.000	1.000	EPS
ROT2	1.000	1.000	EPS
ROT3	.	1.000	EPS
ROT4	.	1.000	EPS
ROT5	1.000	1.000	EPS
ROT6	.	1.000	EPS
ROT7	1.000	1.000	EPS
ROT8	1.000	1.000	EPS
ROT9	.	1.000	EPS
ROT10	1.000	1.000	EPS
ROT11	.	1.000	58.833
ROT12	1.000	1.000	EPS
ROT13	.	1.000	EPS
ROT14	.	1.000	EPS
ROT15	.	1.000	EPS
ROT16	.	1.000	EPS
ROT17	.	1.000	EPS
ROT18	.	1.000	EPS
ROT19	.	1.000	EPS
ROT20	.	1.000	EPS
ROT21	.	1.000	EPS
ROT22	.	1.000	EPS
ROT23	.	1.000	EPS
ROT24	.	1.000	EPS
ROT25	.	1.000	EPS
ROT26	.	1.000	EPS
ROT27	.	1.000	EPS
ROT28	.	1.000	EPS
ROT29	.	1.000	EPS
ROT30	1.000	1.000	EPS
ROT31	.	1.000	EPS
ROT32	.	1.000	EPS
ROT33	.	1.000	EPS

ROT34	.	.	1.000	EPS	
ROT35	.	.	1.000	EPS	
ROT36	.	.	1.000	EPS	
ROT37	.	.	1.000	EPS	
ROT38	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT39	.	.	1.000	44.417	
ROT40	.	.	1.000	44.417	
ROT41	.	.	1.000	44.417	
ROT42	.	.	1.000	44.417	
ROT43	.	.	1.000	44.417	
ROT44	.	.	1.000	44.417	
ROT45	.	.	1.000	44.417	
ROT46	.	.	1.000	44.417	
ROT47	.	.	1.000	44.417	
ROT48	.	.	1.000	44.417	
ROT49	.	.	1.000	44.417	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 225
 General Algebraic Modeling System
 Solution Report SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

VAR X variables du modele

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

ROT1471	.	.	1.000	EPS	
ROT1472	.	.	1.000	EPS	
ROT1473	.	.	1.000	EPS	
ROT1474	.	.	1.000	EPS	
ROT1475	.	.	1.000	EPS	
ROT1476	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1477	.	.	1.000	EPS	
ROT1478	.	.	1.000	EPS	
ROT1479	.	.	1.000	EPS	
ROT1480	.	.	1.000	EPS	
ROT1481	.	.	1.000	EPS	
ROT1482	.	.	1.000	EPS	
ROT1483	.	.	1.000	EPS	
ROT1484	.	.	1.000	EPS	
ROT1485	.	.	1.000	EPS	
ROT1486	.	.	1.000	EPS	
ROT1487	.	.	1.000	EPS	
ROT1488	.	.	1.000	EPS	
ROT1489	.	.	1.000	EPS	
ROT1490	.	.	1.000	EPS	
ROT1491	.	.	1.000	EPS	
ROT1492	.	.	1.000	EPS	
ROT1493	.	.	1.000	EPS	
ROT1494	.	.	1.000	EPS	
ROT1495	.	.	1.000	EPS	
ROT1496	.	.	1.000	EPS	
ROT1497	.	.	1.000	EPS	
ROT1498	.	.	1.000	EPS	
ROT1499	.	.	1.000	EPS	
ROT1500	.	.	1.000	EPS	
ROT1501	.	.	1.000	EPS	
ROT1502	.	.	1.000	EPS	
ROT1503	.	.	1.000	EPS	
ROT1504	.	.	1.000	EPS	

ROT1505	.	.	1.000	EPS	
ROT1506	.	.	1.000	EPS	
ROT1507	.	.	1.000	EPS	
ROT1508	.	.	1.000	EPS	
ROT1509	.	.	1.000	EPS	
ROT1510	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1511	.	.	1.000	EPS	
ROT1512	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1513	.	.	1.000	EPS	
ROT1514	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1515	.	.	1.000	EPS	
ROT1516	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1517	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1518	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1519	.	.	1.000	EPS	

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 226
 General Algebraic Modeling System
 Solution Report SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

VAR X variables du modele

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	
ROT1520	.	.	1.000	EPS	
ROT1521	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1522	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1523	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1524	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1525	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1526	.	.	1.000	EPS	
ROT1527	.	.	1.000	EPS	
ROT1528	.	.	1.000	EPS	
ROT1529	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1530	.	.	1.000	EPS	
ROT1531	.	.	1.000	EPS	
ROT1532	.	.	1.000	EPS	
ROT1533	.	.	1.000	EPS	
ROT1534	.	.	1.000	EPS	
ROT1535	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1536	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1537	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1538	.	.	1.000	EPS	
ROT1539	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1540	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1541	.	.	1.000	EPS	
ROT1542	.	.	1.000	EPS	
ROT1543	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1544	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1545	.	.	1.000	EPS	
ROT1546	.	.	1.000	EPS	
ROT1547	.	.	1.000	EPS	
ROT1548	.	.	1.000	EPS	
ROT1549	.	.	1.000	EPS	
ROT1550	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1551	.	.	1.000	EPS	
ROT1552	.	.	1.000	1.000	EPS
ROT1553	.	.	1.000	EPS	

ROT1554 . 1.000 1.000 EPS
ROT1555 . 1.000 1.000 EPS
ROT1556 . 1.000 1.000 EPS
ROT1557 . 1.000 1.000 EPS
ROT1558 . 1.000 1.000 EPS

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

--- VAR Z -INF 3207.083 +INF

Z fr

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 227
General Algebraic Modeling System
Solution Report SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

**** REPORT SUMMARY : 0 NONOPT
0 INFEASIBLE
0 UNBOUNDED

EXECUTION TIME 6.370 SECONDS VERID MW2-00-064

USER: Professor Delgado A930929-1222AR-MW2
Universidad Politecnica de Madrid, Spain

**** FILE SUMMARY

INPUT C:\GAMS386\DUPE.GMS
OUTPUT C:\GAMS386\DUPE.LST

7050 ROT12 16.41667
7051 ROT13 20.66667
7052 ROT14 62.91667
7053 ROT15 62.91667
7054 ROT16 68.58333
7055 ROT17 68.33333
7056 ROT18 67.08333
7057 ROT19 62.91667
7058 ROT20 62.91667
7059 ROT21 62.91667
7060 ROT22 67.08333
7061 ROT23 62.91667
7062 ROT24 68.33333
7063 ROT25 68.50000
7064 ROT26 67.08333
7065 ROT27 68.58333
7066 ROT28 68.33333
7067 ROT29 67.08333
7068 ROT30 35.75000
7069 ROT31 42.00000
7070 ROT32 48.00000
7071 ROT33 66.25000
7072 ROT34 44.25000
7073 ROT35 67.16667
7074 ROT36 67.16667
7075 ROT37 71.33333
7076 ROT38 16.50000
7077 ROT39 38.66667
7078 ROT40 45.50000
7079 ROT41 69.75000
7080 ROT42 69.91667
7081 ROT43 68.50000
7082 ROT44 70.00000
7083 ROT45 69.75000
7084 ROT46 70.00000
7085 ROT47 69.75000
7086 ROT48 41.16667
7087 ROT49 45.50000
7088 ROT50 33.66667
7089 ROT51 69.75000
7090 ROT52 69.91667
7091 ROT53 68.50000
7092 ROT54 70.00000
7093 ROT55 69.75000
7094 ROT56 70.00000
7095 ROT57 69.75000
7096 ROT58 16.58333
7097 ROT59 59.75000
7098 ROT60 59.75000
7099 ROT61 16.50000
7100 ROT62 35.25000
7101 ROT63 36.75000
7102 ROT64 42.75000

```

8587 ROT1549 25.00000
8588 ROT1550 21.75000
8589 ROT1551 21.75000
8590 ROT1552 16.75000
8591 ROT1553 38.08333
8592 ROT1554 16.75000
8593 ROT1555 18.16667
8594 ROT1556 17.41667
8595 ROT1557 16.41667
8596 ROT1558 16.75000
8597 /;
8598 PARAMETER chx(I)/SEG1*SEG10 1,SEG12*SEG96 1,SEG98*SEG111 1,SEG113*SEG263 1
8599          SEG265*SEG284 1,SEG286*SEG344 1/;
8600 VARIABLES
8601 X(J) variables du modele
8602 Z fr;
8603 binary variables X(J);
8604 equations cost objectif
8605          rec(I) equations du modele;
8606
8607 cost ..      sum(J, c(J) * X(J)) =E= Z;
8608 rec(I) ..     sum(J, B(I,J) * X(J)) =E= 1;
8609 model dunc / ALL /;
8610 dunc.optfile =1;
8611 option mip = OSL;
8612 solve dunc using mip minimizing Z;
  
```

SYMBOL TYPE REFERENCES

```

B      PARAM DEFINED      5 REF      5 8608
C      PARAM DEFINED      7038 REF 7038 8607
CHX    PARAM DEFINED      8598 REF 8598 8608
COST   EQU DEFINED      8607 IMPL-ASN 8612 REF 8604
      8609
DUNE   MODEL DEFINED      8609 IMPL-ASN 8612 ASSIGNED 8610
      REF 8609 8612
I      SET DEFINED      1 REF      1 5 8598
      8605 2*8608 CONTROL 8608
J      SET DEFINED      3 REF      3 5 7038
      8601 8603 2*8607 2*8608 CONTROL 8607
      8608
REC    EQU DEFINED      8608 IMPL-ASN 8612 REF 8605
      8609
X      VAR DECLARED      8603 IMPL-ASN 8612 REF 8601
      8607 8608
Z      VAR IMPL-ASN      8612 REF 8602 8607 8612
  
```

SETS

I
J

PARAMETERS

B
C
CHX

VARIABLES

X variables du modele
Z fr

EQUATIONS

COST objectif
REC equations du modele

MODELS

DUNE

COMPILATION TIME = 30.430 SECONDS VERID MW2-00-064

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 165
General Algebraic Modeling System
Equation Listing SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

--- COST =E= objectif

COST.. 17.4167*X(ROT1) + 16.75*X(ROT2) + 36.1667*X(ROT3) + 60.4167*X(ROT4)
+ 20*X(ROT5) + 20*X(ROT6) + 17.5833*X(ROT7) + 28.25*X(ROT8)
+ 51.75*X(ROT9) + 58.8333*X(ROT10) + 58.8333*X(ROT11)
+ 16.4167*X(ROT12) + 20.6667*X(ROT13) + 62.9167*X(ROT14)
+ 62.9167*X(ROT15) + 68.5833*X(ROT16) + 68.3333*X(ROT17)
+ 67.0833*X(ROT18) + 62.9167*X(ROT19) + 62.9167*X(ROT20)
+ 62.9167*X(ROT21) + 67.0833*X(ROT22) + 62.9167*X(ROT23)
+ 68.3333*X(ROT24) + 68.5*X(ROT25) + 67.0833*X(ROT26)
+ 68.5833*X(ROT27) + 68.3333*X(ROT28) + 67.0833*X(ROT29)
+ 35.75*X(ROT30) + 42*X(ROT31) + 48*X(ROT32) + 66.25*X(ROT33)
+ 44.25*X(ROT34) + 67.1667*X(ROT35) + 67.1667*X(ROT36)

+ 71.3333*X(ROT37) + 16.5*X(ROT38) + 38.6667*X(ROT39) + 45.5*X(ROT40)
 + 69.75*X(ROT41) + 69.9167*X(ROT42) + 68.5*X(ROT43) + 70*X(ROT44)
 + 69.75*X(ROT45) + 70*X(ROT46) + 69.75*X(ROT47) + 41.1667*X(ROT48)
 + 45.5*X(ROT49) + 33.6667*X(ROT50) + 69.75*X(ROT51) + 69.9167*X(ROT52)
 + 68.5*X(ROT53) + 70*X(ROT54) + 69.75*X(ROT55) + 70*X(ROT56)
 + 69.75*X(ROT57) + 16.5833*X(ROT58) + 59.75*X(ROT59) + 59.75*X(ROT60)
 + 16.5*X(ROT61) + 35.25*X(ROT62) + 36.75*X(ROT63) + 42.75*X(ROT64)
 + 61*X(ROT65) + 39*X(ROT66) + 61.9167*X(ROT67) + 61.9167*X(ROT68)
 + 66.0833*X(ROT69) + 39*X(ROT70) + 61.9167*X(ROT71) + 61.9167*X(ROT72)
 + 66.0833*X(ROT73) + 16.4167*X(ROT74) + 58.6667*X(ROT75)
 + 58.6667*X(ROT76) + 64.3333*X(ROT77) + 64.0833*X(ROT78)
 + 62.8333*X(ROT79) + 58.6667*X(ROT80) + 58.6667*X(ROT81)
 + 58.6667*X(ROT82) + 62.8333*X(ROT83) + 58.6667*X(ROT84)
 + 64.0833*X(ROT85) + 64.25*X(ROT86) + 62.8333*X(ROT87)

GAMS 2.25.064 386/486 DOS 07/22/95 11:19:39 PAGE 184
 General Algebraic Modeling System
 Equation Listing SOLVE DUNE USING MIP FROM LINE 8612

COST =E= objectif

+ 47.5*X(ROT1504) + 47.5*X(ROT1505) + 42.75*X(ROT1506)
 + 47.5*X(ROT1507) + 44.25*X(ROT1508) + 44.25*X(ROT1509) + 36*X(ROT1510)
 + 36*X(ROT1511) + 27.5833*X(ROT1512) + 31.4167*X(ROT1513)
 + 20.75*X(ROT1514) + 20.75*X(ROT1515) + 16.25*X(ROT1516)
 + 27*X(ROT1517) + 16.25*X(ROT1518) + 16.8333*X(ROT1519) + 29*X(ROT1520)
 + 18.5*X(ROT1521) + 20*X(ROT1522) + 19.8333*X(ROT1523)
 + 22.1667*X(ROT1524) + 16.4167*X(ROT1525) + 17.75*X(ROT1526)
 + 37.0833*X(ROT1527) + 40.9167*X(ROT1528) + 25.5*X(ROT1529)
 + 18.6667*X(ROT1530) + 20.6667*X(ROT1531) + 42*X(ROT1532)
 + 26.0833*X(ROT1533) + 38.25*X(ROT1534) + 29.75*X(ROT1535)
 + 19.75*X(ROT1536) + 19.0833*X(ROT1537) + 31.25*X(ROT1538)
 + 16.25*X(ROT1539) + 20.25*X(ROT1540) + 20.25*X(ROT1541)