

3/91

9 ep

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE-INDUSTRIEL

## PROJET DE FIN D'ETUDES

### SUJET

ELABORATION DE MODELES DE  
SIMULATION DE STOCKS  
REPARABLES ( moteurs & modules )  
APPLIQUES A AIR-ALGERIE

Proposé par :  
O.YAHIAOUI

Etudié par :  
N.BAHLLOUL  
M.BAKALEM

Dirigé par :  
H.DAMERDJI  
H.SARI

PROMOTION *JUIN 91*

وزارة الجامعات  
Ministère aux Universités

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE-INDUSTRIEL

## PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ELABORATION DE MODELES DE  
SIMULATION DE STOCKS  
REPARABLES ( moteurs & modules )  
APPLIQUES A AIR-ALGERIE

Proposé par :  
O.YAHIAOUI

Etudié par :  
N.BAHLLOUL  
M.BAKALEM

Dirigé par :  
H.DAMERDJI  
H.SARI

PROMOTION JUIN 91

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المسيرة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — مكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله

اللهم تقبل منا أعمالنا واجعلها

خاتمة لنا في عملنا الكريم ووفقتنا

للعمل بها في مرضاتك ...

اللهم علمنا ما ينفعنا ولا فغننا

بما علمتنا وزدنا علما

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الحمد لله الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله  
اللهم تقبل منا أعمالنا واجعلها  
خاتمة لنا في عملنا الكريم ووفقتنا  
للعمل بها في مرضاتك ...  
اللهم علمنا ما ينفعنا ولا فغننا  
بما علمتنا وزدنا علما

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
Département GENIE INDUSTRIEL  
Projet de Fin d'Etude

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

---

---

ABSTRACT

---

---

---

---

RESUME

---

---

*L'objet de ce mémoire est l'élaboration d'un modèle, implémenté sur micro-ordinateur, qui permet de déterminer des niveaux de stocks de rechange (moteurs et sous-ensembles) pouvant assurer une disponibilité souhaitée de la flotte avion d'AIR-ALGERIE. Parmi les techniques de solutionnement de problèmes de stocks réparables, le choix s'est porté sur la technique de simulation. Le langage de simulation utilisé est le SLAM II.*

---

---

### REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'école nationale polytechnique, département Génie-Industriel, en collaboration avec l'entreprise nationale AIR-ALGERIE sous la direction de MM. H.SARI et H.DAMERDJI.

Nous tenons à les remercier tout particulièrement pour l'intérêt qu'ils ont toujours témoigné à l'égard de notre travail et les précieux conseils et encouragements qu'ils nous ont prodigués.

A Monsieur M.YAHIAOUI, Directeur du projet H400 et initiateur de cette étude, nous exprimons toute notre gratitude pour toute l'aide qu'il nous a apporté tout au long de notre travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Madame S.TEBIBEL, Post-graduante au département Génie Industriel, pour ses conseils et contributions à ce travail.

Nous remercions Monsieur G.MESBAH Directeur de la logistique ainsi que tous les ingénieurs et techniciens, de la direction du projet H400 et de la direction technique d'AIR-ALGERIE, pour leurs coopérations à la réalisation de cette étude.

Nous sommes honorés de la participation au jury de Monsieur M.GUABDESSELEM que nous tenons à remercier pour tous les conseils qu'il n'a cessé de prodiguer tout au long de notre formation.

De très profonds remerciements sont réservés à Mlle N.ABOUN, qui a accepté de présider notre jury.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

---

# TABLE DES MATIERES

---

INTRODUCTION .....	1
<b>CHAPITRE I: PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET POSITION DU PROBLEME.....</b>	<b>3</b>
1-1- Le réseau.....	3
1-2- Composition de la flotte.....	4
1-3- L'intensité du trafic.....	4
1-4- La fonction maintenance.....	5
1-5- Présentation du problème.....	7
1-5-1- Structure et mode de fonctionnement général d'un moteur.....	7
1-5-2- Composition de la flotte moteur d'Air-Algérie..	8
1-5-3- Différence de conception entre le CF6 et le JT8D.....	9
1-5-4- Pratiques de la maintenance dans l'aviation...	10
1-5-5- La maintenance des avions à Air-Algérie.....	12
1-5-6- Positionnement du problème.....	14
<b>CHAPITRE II: REVUE DE LA LITTERATURE.....</b>	<b>19</b>
Introduction.....	19
II-1- Technique d'approvisionnement du '1 pour 1'.....	20
II-2- Le modèle METRIC.....	24
II-3- Le modèle MOD-METRIC.....	32

II-4- Le modèle As Optimal.....	37
II-5- Méthodes d'approvisionnement des pièces de rechange utilisant les modèles de files d'attente.....	48
II-6- Modèles de GSAK utilisant la simulation.....	54
II-7- Conclusion.....	56
<b>CHAPITRE III: INTRODUCTION A LA SIMULATION ET A SLAM II.....</b>	<b>59</b>
III-1- Le concept de simulation.....	61
III-1-1- Le système.....	61
III-1-2- Le modèle.....	63
III-1-3- Le processus de modélisation.....	63
III-2- Le cadre méthodologique de la simulation.....	64
III-3- Le langage SLAM II.....	69
III-3-1- Présentation générale du langage.....	69
III-3-2- Les outils de la modélisation par processus.....	71
III-3-3- La structure du programme SLAM.....	72
<b>CHAPITRE IV: ELABORATION DES MODELES DE SIMULATION.....</b>	<b>74</b>
Introduction.....	74
<b>IV-1- TRAITEMENT DES AIRBUS ET BOEING 767.....</b>	<b>77</b>
IV-1-1- Description du système.....	77
IV-1-2- Processus de modélisation.....	81
IV-1-2-1- Considérations de base.....	82
IV-1-2-2- Logique de changement d'état du système.....	83
IV-1-2-3- Le cadre conceptuel de la simulation.....	84
IV-1-2-4- Modélisation du système.....	84
IV-1-3- Transcription Informatique du réseau.....	90
IV-1-4- Identification, collecte et ajustement des données d'input.....	90
IV-1-5- Vérification et validation du modèle.....	98
IV-1-5-1- Vérification du modèle.....	98
IV-1-5-2- Validation du modèle.....	99

a) - Considérations générales en validation.....	100
b) - La phase qualitative de validation..	100
c) - La première phase quantitative de validation.....	101
d) - La deuxième phase quantitative de validation.....	116
IV - I - 6 - Analyse des outputs, présentation et interprétation des résultats.....	119
IV - I - 6 - 1 - Notion de base.....	119
IV - I - 6 - 2 - Présentation et interprétation des résultats.....	122
IV - I - 6 - 3 - Suggestions.....	125
<b>IV - II - TRAITEMENT DES BOEING 727 ET 737.....</b>	<b>127</b>
IV - II - 1 - Description sommaire du JT8D.....	127
IV - II - 2 - Description du système.....	128
IV - II - 3 - Modélisation du système.....	132
IV - II - 4 - Identification, collecte et ajustement des données d'input.....	138
IV - II - 5 - Vérification et validation du modèle.....	141
IV - II - 6 - Analyse de l'output, présentation et interprétation des résultats.....	146
<b>SUGGESTIONS ET CONCLUSION.....</b>	<b>150</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	

---

## INTRODUCTION

---

Parmi les activités liées au développement économique, celles relevant du secteur de transport occupent une place prépondérante et stratégique. Dans notre cas, l'intérêt porté est vers le transport aérien.

Le transport aérien fait appel à une organisation et à des moyens aussi complexes que variés, qui le distinguent par ses spécificités des autres modes de transport. Ainsi, l'entreprise AIR - ALGERIE est dotée d'une flotte comprenant divers types d'avions assurant le transport de passagers et du frêt sur un réseau de lignes nationales et internationales et sur lesquelles un certain nombre de vols sont assurés.

La configuration actuelle de la flotte et les contraintes techniques liées à l'exploitation des lignes desservies exigent une utilisation rationnelle et à moindre coût des capacités offertes par sa flotte; c'est à dire assurer une disponibilité maximale des avions.

Cette disponibilité est considérablement affectée par les opérations de maintenance, et surtout celles concernant les moteurs. Pour y remédier, les compagnies aériennes utilisent une politique de réparation par remplacement. C'est à dire qu'elles disposent de stocks de moteurs de rechange permettant à l'avion de reprendre son service le plus tôt possible. Entre-temps, le moteur défaillant est réparé puis remis en stock.

Ainsi, un stock de moteurs de rechange s'avère indispensable. Mais vue la valeur importante des moteurs (en

millions de dollars), on s'aperçoit vite que la détermination des niveaux de stocks doit faire l'objet d'un calcul économique rigoureux.

C'est dans cette direction que s'inscrit notre étude, qui consiste à élaborer un modèle permettant l'estimation des niveaux adéquats de stocks de rechange (moteurs et sous-ensembles) assurant une certaine disponibilité de la flotte.

A cet effet, nous avons commencé par nous imprégner de l'environnement à la fois complexe et passionnant, qu'est l'aéronautique. Par la suite, nous nous sommes intéressés au créneau de la maintenance avion. Une fois les investigations terminées et le système assimilé, nous sommes passés au positionnement du problème, objet du premier chapitre.

Dans le chapitre 2, les principaux travaux se rapportant à notre problème sont passés en revue. Vue l'originalité du problème traité, nous nous sommes étalés dans cette partie et qui nous espérons pourra servir de référence pour de futures études traitant du même type de problèmes. A l'issue de la phase de recherche bibliographique, notre choix s'est porté sur la technique de simulation en tant qu'outil de traitement du problème posé. La présentation de la technique de simulation ainsi que du langage de simulation choisis sera l'objet du chapitre 3.

Dans le chapitre 4, nous présentons les modèles de simulation destinés à la gestion des stocks réparables d'AIR-ALGERIE.

Nous avons terminé notre étude par un ensemble de suggestions, suivi d'une conclusion cloturant ainsi notre étude.

## CHAPITRE I

### PRESENTATION DE L'ENTREPRISE ET POSITION DU PROBLEME

Créée en 1947, la compagnie AIR-ALGERIE est nationalisée, dans une première étape à 51% en 1966, octroyant ainsi à la direction générale toute prérogative dans la gestion de l'entreprise. L'année 1970 a vu les parts de l'Etat portées à 83% dans le capital social de l'entreprise. En 1972, et conformément à la politique de récupération des ressources nationales, les dernières actions détenues par des sociétés étrangères étaient rachetées.

C'est à travers les trois principaux indices de performance d'une compagnie aérienne que nous tenterons de présenter AIR-ALGERIE. Ces indices sont:

- l'étendue de son réseau,
- la composition de sa flotte, et
- l'intensité du trafic.

#### 1- Le réseau:

En l'espace de vingt ans, la configuration du réseau a radicalement changé, si bien qu'aujourd'hui les principales villes du pays et pratiquement toutes les localités du sud et de l'extrême sud sont reliées aux métropoles urbaines du nord avec des correspondances sur le secteur international. Dans le même intervalle de temps, la longueur du réseau décuple puisqu'elle passe de 13.000 Km à plus de 130.000 Km.

En matière d'infrastructure commerciale, de grands efforts sont déployés pour élargir les points de vente. D'une part pour mettre le produit AIR-ALGERIE à la portée de

tous, et d'autre part pour affirmer la présence de l'entreprise à l'étranger.

## 2- Composition :

Une disponibilité de ressources et une conjoncture fortement favorable au début des années 70, ont permis à AIR-ALGERIE de lancer une opération de modernisation et de rajeunissement de sa flotte. Au fur et à mesure de l'exécution des différents programmes de développement, des Boeing 727 et 737 ont été acquis. Durant la décennie 1980, la flotte s'enrichit d'une nouvelle génération d'avions, les Airbus et les Boeing 767, gros porteurs et parfaitement adaptés à l'exploitation de certaines lignes génératrices d'un fort courant de trafic telles que Alger-Paris, Alger-Jeddah.

En 1991, Air-Algérie dispose pour le transport passagers de 2 Airbus, 3 boeing 767, 11 Boeing 727, 15 boeing 737 et 8 Fokker 27 (ces derniers étant en service exclusivement sur les lignes intérieures).

Pour l'activité cargo, l'entreprise est dotée d'un Boeing 737 d'une capacité de 13 tonnes et de 3 Hercule capables d'emporter jusqu'à 20 tonnes de charge par unité.

## 3- L'intensité du trafic:

Lié au renouvellement de la flotte, à l'extension du réseau ainsi qu'à l'essor économique du pays générant de nouvelles habitudes de voyage, le trafic passagers connaît une croissance remarquable dont voici quelques résultats, consignés dans le tableau suivant[Direction commerciale]:

Période	Nbre total de passagers
1970 - 1973	3.314.822
1974 - 1977	6.321.542
1980 - 1984	16.811.444
1987	3.567.841
1988	3.644.978

## DIRECTION COMMERCIALE D'AH

En matière de fret/cargo, l'année 1988 a enregistré l'acheminement de 29.175 tonnes dont 2365 tonnes sur le réseau intérieur.

Avec la crise que traverse le pays, l'outil de production (les avions) va se maintenir à son niveau actuel pendant au moins les dix années à venir, selon les responsables d'Air-Algérie. Or nous remarquons, à travers les trois indices passés en revue précédemment, que la demande pour le produit Air-Algérie (service de transport) tend à croître d'une année à une autre.

Pour répondre à cette demande, Air-Algérie se doit d'avoir un taux d'utilisation maximum de sa flotte, autrement dit une immobilisation minimale des avions au sol. Cet objectif ne pourrait être atteint sans une gestion rationnelle et rigoureuse de l'outil de production.

#### 4-La Fonction Maintenance :

La maintenance est l'ensemble des mesures visant la disponibilité des installations, afin d'assurer un niveau acceptable de qualité, de régularité et de ponctualité de la production (transport), au moindre coût.

C'est la nature de l'entreprise qui dicte les objectifs du service maintenance, objectifs des plus variés. Par exemple, s'il s'agit d'une compagnie aérienne, l'objectif est la satisfaction du client. C'est à dire, un

fonctionnement sans défaut et le maximum de disponibilité des avions pour les activités de transport (frêt et passagers).

L'immobilisation des avions est en général due à des nécessités de maintenance, surtout dans ce secteur de transport où la fiabilité des appareils est primordiale. D'où l'importance de la fonction maintenance pour ce type d'entreprise. Ceci fait que l'un des principaux objectifs de gestion de toute compagnie aérienne est de maximiser la contribution de la fonction maintenance dans les bénéfices de l'entreprise ainsi que dans la réalisation d'un service standard optimum. Plus précisément, cet objectif inclut d'après les responsables d'AH (AIR-ALGERIE):

**4-1- des objectifs opérationnels qui sont :**

- maintenir l'avion dans les meilleures conditions possibles,
- assurer la disponibilité maximale des avions,
- pousser à la dernière limite la durée de vie des avions, et
- assurer un fonctionnement sûr et efficace de l'avion.

**4-2- des objectifs de coûts:**

- réduire au maximum les dépenses de maintenance,
- assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget, et
- avoir des dépenses de maintenance portant sur le niveau de service exigé.

Dans cette optique, AIR-ALGERIE a entrepris la réalisation d'un vaste programme d'amélioration du niveau de service de la maintenance des avions.

### 5-Présentation Du Problème:

Les objectifs principaux de la fonction maintenance est le maintien de ses avions dans des conditions de vol sûres et assurer en même temps une disponibilité maximale des avions.

Un des composants critique de l'avion, ayant un effet considérable sur la fiabilité ainsi que la disponibilité de l'avion, est le moteur. D'où l'importance que revêt la maintenance moteur dans l'aviation. En effet l'expérience a montré que la plupart des immobilisations des avions est due à des défaillances moteurs. Pour faire face à ce problème, les compagnies aériennes mettent à la disposition des avions des moteurs de rechange pour diminuer au minimum l'indisponibilité de ceux-ci. Mais pour ce faire, la compagnie se voit obliger de dégager un capital conséquent; ce qui constitue une charge assez importante.

Le problème qui se pose alors est de déterminer, en fonction de la contrainte investissement, le niveau du stock des moteurs de rechange permettant d'assurer une disponibilité donnée des avions.

Mais avant d'aborder ce problème, il est nécessaire de fournir des éclaircissements sur certains éléments qui aideront, par la suite, à mieux cerner et définir le problème.

### 5-1-Structure et Mode de Fonctionnement général d'un Moteur: [IATA]

#### A\ Structure:

Un moteur est généralement composé des éléments de base suivants:

- FAN
- Compresseur Basse Pression (LPC)
- Compresseur Haute Pression (HPC)
- Chambre de Combustion (CC)
- Turbine Haute Pression (HPT)

- Turbine Basse Pression (LPT)
- Gear-Box (GRB)

B\ Mode de fonctionnement:

Le principe de base du fonctionnement des moteurs est le suivant:

- L'air est inspiré à l'intérieur du compresseur basse pression par le FAN.
- La pression de l'air est augmentée successivement par les compresseurs basse et haute pression.
- A la sortie du compresseur, l'air à très haute pression est délivrée à la chambre de combustion.
- Dans la chambre de combustion, il y a mélange Fuel/Air, qui suite à une étincelle crée une explosion qui délivre un gaz à très haute température et pression vers les turbines.
- Les gaz à haute pression créent un mouvement de rotation des turbines qui est repris par les compresseurs. Les turbines convertissent ainsi l'énergie thermique en une poussée de gaz qui représente la force motrice de l'avion.

5-2- Composition de la flotte moteurs d'AH:

AIR-ALGERIE dispose de:

- 89 moteurs JT8D dont 16 de la série 9 (JT8D-9), 65 de la série 15 (JT8D-15) et 8 de la série 17 (JT8D-17).
- 4 moteurs CF680A3 destinés aux Airbus A310-200.
- 9 moteurs CF680C2 destinés aux Boeing 767.
- 6 moteurs ALLISON pour Hercule C100-30.
- 17 moteurs DARTT pour les Fokker 27.

Dans le travail effectué ici, nous nous intéressons seulement aux moteurs du type CF6 et JT8D et ceci pour deux raisons majeures: ces deux types de moteurs représentent environ 75% de la valeur de tous les moteurs appartenant à AIR-ALGERIE, et de plus 32 des 43 avions dont dispose AH utilisent des moteurs de l'un des deux types cités

auparavant.

Notons que les moteurs JT8D de différentes séries sont interchangeable ou compatibles.

### 5-3-Différence de conception entre le CF6 et le JT8D:

Avec les nouveaux moteurs entrant en service dans les années 70 ( les JT9D de PRATT & WHITNEY et les CF6 de GENERAL ELECTRIC ), un nouveau concept a été introduit dans le design des moteurs, et ce dans l'intention de faciliter et d'accélérer les interventions de maintenance sur les moteurs.

Cette nouvelle conception permet l'éclatement du moteur en modules de telle sorte à isoler facilement le module contenant le composant défaillant, remettre un module identique à sa place et réassembler le moteur.

Les différences de conception entre le CF6 et le JT8D sont:

- a) le déséquipement du QEC ("Quick Engine Change") est limité à la partie du moteur qui contient le module défaillant pour le CF6, alors que le JT8D doit être déséquipé complètement,
- b) la révision peut se limiter aux modules individuellement pour les CF6, alors que la révision du JT8D concerne le moteur dans sa totalité,
- c) il est possible d'accomplir des changements de certains modules sous l'aile de l'avion ("On Wing") pour le CF6, mais ceci n'est pas possible pour le JT8D, et
- d) dans la plupart des cas de changement de modules, il n'est pas nécessaire de passer le moteur CF6 par le banc d'essai, alors que pour les JT8D, c'est une obligation.

#### 5-4- Pratiques de la maintenance dans l'aviation:

Toute organisation qui utilise des avions pour le transport passagers ou fret, a pour première responsabilité le maintien de ses avions dans des conditions de vol sûres.

L'objectif de cette section est de donner un petit aperçu sur la pratique de la maintenance des avions.

Définition [IATA]: la maintenance des avions est divisée en "line" et "base maintenance" selon de l'endroit où elle est exécutée, et en maintenance mineure et majeure selon le temps nécessaire pour l'accomplir.

a) "Line maintenance" (niveau A1): la maintenance en ligne est exécutée sur les lignes de vol d'une station ou d'une escale de la compagnie. Généralement, la maintenance en ligne consiste en des tâches de routine tel que la révision, vidange, lavage et certaines inspections. Les tâches de la maintenance en ligne peuvent être étendues au changement du moteur. La main d'oeuvre et les équipements nécessaires pour ce type de maintenance sont limités.

b) "Base maintenance": ce type de maintenance, comme son nom l'indique, est accompli dans une base de maintenance de la compagnie. Elle est fixe et orientée, parce que la base a une situation géographique propre, et elle est destinée à accomplir un certain nombre d'opérations de maintenance spécifiques.

c) Maintenance mineure: la maintenance mineure peut être accomplie en 24 heures ou moins. Normalement, elle comprend les tâches de maintenance de routine, et elle est pratiquée sur les stations de ligne ou à la base de maintenance.

d) Maintenance majeure ou "Heavy maintenance":

Un travail de maintenance qui requière un temps d'immobilisation de l'avion de plus de 24 heures est

considéré comme une maintenance majeure. Elle comprend les inspections de structure et réparation, le renouvellement de la peinture et la rénovation de la cabine.

Pour les moteurs il y a deux types de maintenance majeure: la maintenance majeure limitée (niveau B1/B2) et la maintenance majeure maximum (niveau B3).

\* Le niveau B1/B2, communément appelé "Hot Section Inspection" (HSI), consiste en le remplacement de la partie chaude du moteur, qui est constitué par les chambres de combustion, le premier étage des aubes directrices (nozzles guide vanes: NGV). Il est tout aussi possible de remplacer le rotor du FAN, le premier étage de l'ensemble statorique du compresseur, le compresseur avant, ainsi que d'autres composants qui sont accessibles sans désassemblage extensif du moteur.

\* Le niveau B3: ce niveau inclue le désassemblage, le lavage, l'inspection dimensionnelle, la détection des "cracks" ou fissures, le remplacement des composants, l'assemblage, et l'équilibrage statique et dynamique de toutes les sections modulaires. Le passage au banc d'essai du moteur doit être effectué à ce niveau de maintenance.

Il existe aussi deux autres niveaux c1, c2 qui consistent en la réparation des composants défectueux réparables.

Pour la maintenance avion, il existe deux types de maintenance majeures, à savoir:

- la grande visite (GV) qui consiste à décortiquer l'avion pour une inspection détaillée de ses organes.

Cette opération consiste en sept étapes:

- 1- dépose et nettoyage,
- 2- inspection et réparation,
- 3- graissage et repose,
- 4- essai et réglage,

- 5- régulation de la position des moteurs (le point fixe),
- 6- pesage, et
- 7- essai de vol.

La durée moyenne de cette visite est théoriquement de 4 à 5 semaines (jours calendrier).

- la visite de vieillesse (VV) qui consiste en la dépose de certains organes de l'appareil, entre autres des:

- \* volets,
- \* spoilers,
- \* becs,
- \* stabilisateurs, et des
- \* organes radio.

Sa durée théorique est de 2 à 3 semaines.

#### 5-5- La maintenance des avions à AH:

Le niveau de la maintenance moteur qui se pratique jusqu'à nos jours à AIR-ALGERIE, est essentiellement limité à la maintenance mineure, et quelques opérations de maintenance majeure dont nous citerons:

- pour les avions: on pratique la GV et la VV, dont les durées sont respectivement de 4 à 6 mois et de 2 à 3 mois, dépassant ainsi les durées théoriques prescrites par le constructeur qui sont respectivement de 4 à 5 semaines et de 2 à 3 semaines respectivement.

- pour les moteurs: AH dispose d'un atelier moteur (GMP) fournissant le niveau de maintenance B1/B2 pour les JT8D. Pour d'autres niveaux de maintenance, les JT8D sont déséquipés de leur QEC puis expédiés à un sous-traitant (actuellement, c'est Air-Motiv, compagnie aérienne Irlandaise). En ce qui concerne le CF6, le moteur est déposé, son déséquipement s'effectue à AH, puis il est expédié à la Lufthansa pour réparation.

### Présentation du projet H400:

Afin d'assurer les niveaux de maintenance qui ne lui étaient pas accessibles auparavant, Air-Algérie a lancé au début des années 80, un vaste et ambitieux programme d'amélioration de ses capacités de maintenance. Ce programme a débuté par la formation de ses techniciens et ingénieurs chez les constructeurs pour l'acquisition du savoir faire indispensable dans ce type de projet.

De part l'importance de la maintenance moteur, figure en première place le projet base de maintenance H400. Ce projet a pour but la réalisation d'un atelier de révision des moteurs.

Les moteurs qui seront traités dans cet atelier sont:

- JT8D montés sur les Boeing 727 et 737,
- CF680A3 montés sur les Airbus A-310,
- CF680C2 montés sur les Boeing 767,
- ALLISON montés sur les Hercules C-100-30, et
- APU (Auxilliar Power Unit).

Ce projet a des objectifs stratégiques: réduire la dépendance, dans la mesure du possible, à l'égard de l'étranger et assurer un transfert de technologie et de savoir-faire. Il a aussi des objectifs économiques: augmentation de la disponibilité des avions par l'élimination des contre-temps dûs aux transits lors des opérations de sous-traitance, économiser des ressources en devises fortes puisque la main d'oeuvre sera rémunérée en Dinars, et finalement assurer une prestation de service aux compagnies aériennes des pays voisins.

Les prérogatives du projet H400 sont:

- pour les JT8D et les APU: atteindre le niveau B3, c'est à dire que le moteur devra être totalement pris en charge par le H400, mis à part la réparation des composants qui sera toujours sous-traitée.

- pour les CF6: se limiter au déshabillage du QEC et au remplacement du module défectueux, le reste des opérations devant être sous-traité.

Remarque: la réparation des composants n'est pas prévue, dans l'état actuel des choses, parce qu'elle nécessite un investissement considérable qui est difficile, voire impossible à amortir, d'après les responsables d'Air-Algérie.

#### 5-6- POSITIONNEMENT DU PROBLEME:

Comme on l'a vu précédemment, un moteur à réaction a une structure hiérarchique: il est composé de différents sous-ensembles, qui sont eux même composés d'éléments appelés composants. Une dépose moteur peut être dûe soit à l'échéance d'une opération de maintenance programmée soit à un dysfonctionnement d'un ou plusieurs sous-ensembles. Ce dysfonctionnement peut être dû à son tour à la défaillance d'un ou plusieurs composants. On dira que le moteur a une structure hiérarchique à trois niveaux: le moteur, les sous-ensembles et les composants.

En des temps aléatoires, un dysfonctionnement du moteur est détecté. Un diagnostic sous l'aile ("on wing diagnostic") est effectué qui décidera de la nécessité de dépose du moteur pour visite atelier. Après dépose, si un moteur de rechange identique ou compatible est disponible, il remplacera celui qui est défaillant et l'avion retournera en service. S'il n'y a pas de rechange disponible, l'avion est immobilisé jusqu'à réception d'un moteur identique ou compatible. En l'absence de stock de moteurs de rechange, l'avion devra attendre jusqu'à ce que le moteur déposé soit réparé. Cette réparation dure en moyenne 54 jours, et l'avion sera immobilisé pour au moins 54 jours, avec toutes les pertes qui en résulteraient.

Le moteur déposé est envoyé en atelier où les sous-ensembles nécessitant une révision sont identifiés. Ces sous-ensembles sont remplacés par des rechanges si disponibles, sinon le moteur devra attendre jusqu'à ce que des sous-ensembles en état soient disponibles.

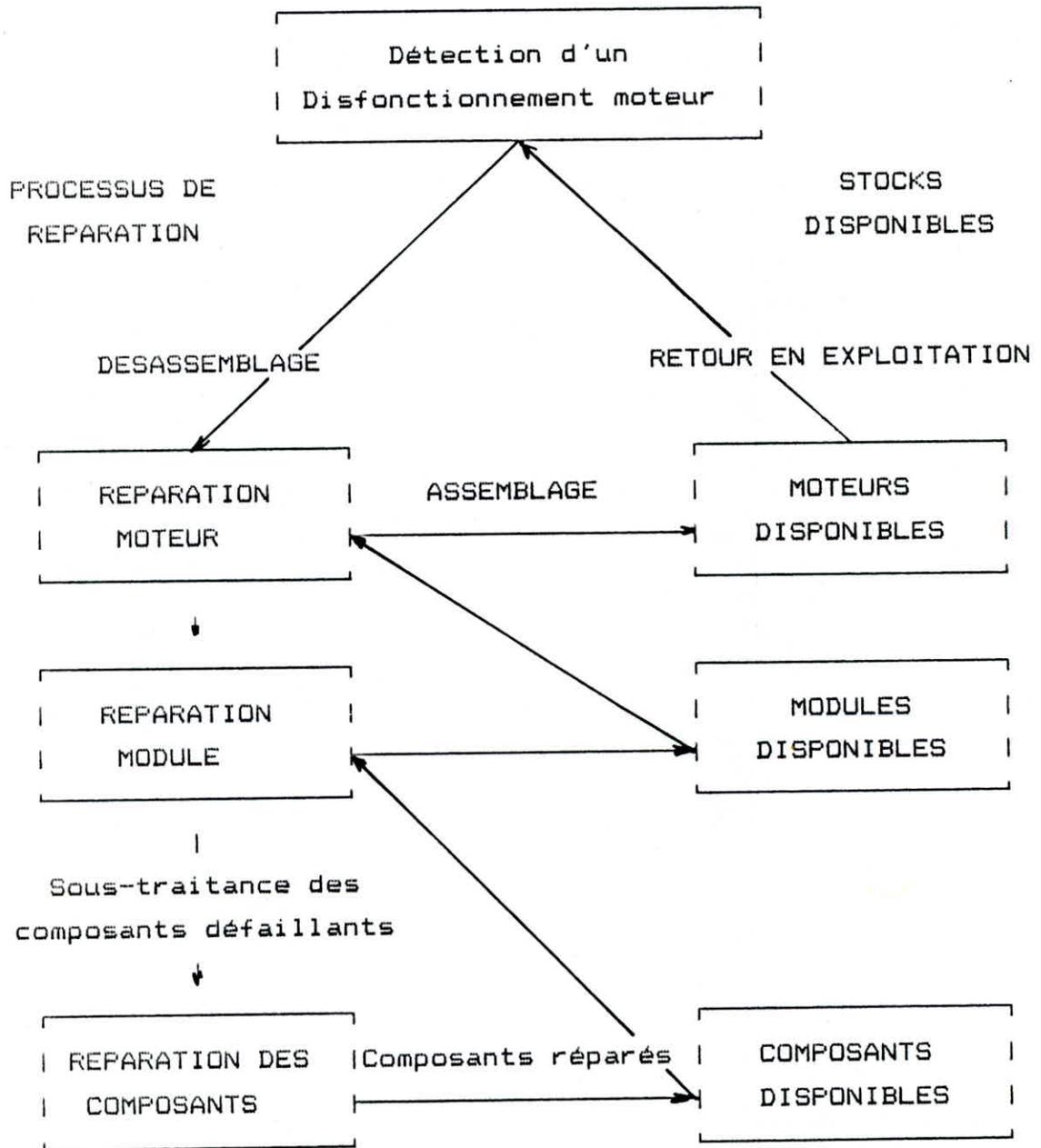


Figure 1: SCHEMA DU PROCESSUS DE REPARATION

L'inspection du sous-ensemble défaillant déterminera la (ou les) causes du dysfonctionnement. Ainsi, les composants qui ont causé la défaillance du sous-ensemble seront identifiés. Ils sont alors remplacés par des composants de rechange identiques, en cas de disponibilité. Dans le cas contraire, le sous-ensemble devra attendre l'arrivée des composants appropriés (voir Fig. 1).

Normalement, dans une situation de réparation, le nombre d'unités (composants) demandées n'est pas totalement équilibré par le retour des unités réparées. Ainsi, pour équilibrer cette demande, nous devons de temps en temps acquérir de nouvelles unités.

Ainsi, le besoin de l'établissement d'un stock résulte de la politique de "Réparation par Remplacement" comme moyen permettant de maintenir à un niveau minimum le délai d'immobilisation de l'avion. L'objectif d'un stock est d'assurer le remplacement d'un moteur, d'un sous-ensemble ou d'un composant enlevé pour diminuer le MTTR (Mean Time To Repair) et augmenter ainsi la disponibilité du moteur, et donc de l'avion.

En effet et comme nous l'avons vu précédemment, l'un des objectifs stratégiques de gestion de toute compagnie aérienne, et par conséquent d'AIR-ALGERIE, est de maximiser le taux d'utilisation de sa flotte d'avions. Cet objectif ne saurait être atteint que par une disponibilité maximale des avions et une clientèle importante. Une lecture simple des statistiques sur l'intensité du trafic montre que la demande pour le produit AIR-ALGERIE est importante et ne fait que croître; par conséquent, et dans le but d'atteindre cet objectif, la compagnie devra agir sur la disponibilité et ce en minimisant les immobilisations de ses avions au sol.

L'une des causes importantes de l'immobilisation des avions est la défaillance des moteurs. Pour cette raison, les compagnies aériennes prévoient des moteurs de rechange afin que l'immobilisation se limite au temps nécessaire au changement du moteur défaillant. Les stocks de moteurs, sous-ensemble et composants de rechange sont ainsi un facteur essentiel de la flexibilité de la compagnie. Mais ils constituent également une immobilisation de capitaux et leur présence entraîne des coûts de différentes natures (Par exemple, le coût d'acquisition d'un CF6 est de 6 millions de Dollars U.S).

Pour cette raison, une compagnie ne peut se permettre d'avoir un stock considérable qui, susceptible de lui assurer une disponibilité totale équivaldra en contre partie à une immobilisation importante de son capital.

La gestion des stocks doit faire l'objet d'un calcul économique rigoureux qui permettra à la compagnie de trouver le meilleur compromis entre disponibilité et investissement en pièces (moteurs, modules et composants) de rechange, de telle façon à maximiser ses bénéfices.

Le problème qui sera posé, alors, est de déterminer des niveaux de stocks appropriés pour les différents niveaux hiérarchiques (moteur, modules, composants) afin d'assurer une disponibilité fixée. Cette disponibilité est le ration entre la moyenne temps du nombre d'avion opérationnels (durant une période T) sur le nombre total d'avions: si nous nous assignons une disponibilité de 85%, alors nous voudrions savoir combien de moteurs, sous-ensembles et composants seront nécessaires pour assurer que, pour la période T fixée, 85% des avions seront disponibles pour utilisation.

Ce problème se pose à toute compagnie aérienne, mais à des niveaux divers suivant ses capacités de maintenance. En effet, dans le cas d'AIR-ALGERIE, seule la HSI est effectuée pour les moteurs du type JT8D, ce qui fait qu'on

ne se soucie que des niveaux de stock des pièces de la partie chaude (remplacées lors d'une HSI) et de ceux des moteurs de tous types (pour le moment, c'est le fournisseur qui fixe le nombre de moteurs de rechange que doit avoir AH).

Dans le cadre du projet H400, et comme nous l'avons vu précédemment, AIR-ALGERIE devra déterminer, en ce qui concerne les JT8D, les niveaux de stock des différentes hiérarchies. Quant au CF6, pour lequel les interventions de maintenance vont se restreindre au changement de modules, le problème se limite à déterminer les niveaux de stocks des moteurs et des modules de rechange uniquement.

Notre travail consistera à déterminer, en fonction d'un taux de disponibilité fixé par les responsables d'AH, les niveaux de stocks des moteurs et composants critiques pour les JT8D et les niveaux de stocks des moteurs et modules de rechange pour les CF6. C'est le thème de notre projet de fin d'études.

Avant de traiter ce problème, nous allons, au chapitre suivant, passer en revue la plupart des travaux réalisés dans le domaine de la gestion des stocks réparables (GSAR).

CHAPITRE IIREVUE DE LA LITTERATURE1- Introduction:

Dans ce chapitre, nous nous proposons de passer en revue l'ensemble de la littérature traitant la gestion des stocks de pièces réparables ('Reparable items inventory management').

Les systèmes de stocks réparables sont des systèmes où les produits peuvent être récupérés après réparation. La majorité des modèles classiques de gestion des stocks ne traitent que des articles dits consommables, c'est à dire qu'une fois la demande satisfaite, ces articles quittent définitivement le système. Dans la pratique, et dans un grand nombre de systèmes de stocks, les articles sont réparables (c'est généralement la valeur, très importante, de ces articles qui fait qu'il devient beaucoup plus économique de les réparer que de les remplacer). Des exemples de tels systèmes comprennent les voitures, ordinateurs, photocopieuses, moteurs d'avion, etc...

Notons qu'en général, le nombre d'articles réparables est relativement faible par rapport aux articles consommables. Par contre, une proportion considérable de l'investissement total en stocks est constituée de ce type d'articles (articles réparables). Pour avoir un ordre de grandeur, la marine américaine a estimé que le stock de pièces réparables constitue 65% de la valeur totale de ses investissements en stocks en 1973 [1].

La revue des modèles de gestion des stocks réparables sera présentée de la manière suivante: dans la section 2, nous présenterons la technique d'approvisionnement (S-1,S)

ou du "1 pour 1", et indiquerons l'importance de cette technique dans le contexte. Dans la section 3, nous présenterons le modèle METRIC et ses extensions (le modèle MOD-METRIC). Dans la section 4, nous présenterons le modèle de stock *As Optimal*. Dans la cinquième et sixième section, nous donnerons un petit aperçu sur les approches récentes basées sur les modèles de files d'attente.

## 2- Technique du "1 pour 1" ou à revue continue (S-1,S):

La plupart des systèmes de stocks de pièces réparables peuvent être considérés comme un cas particulier d'un système à deux échelons; les unités retournées (pour cause de défaillance) vont à l'échelon 2 (base) où elles sont réparées, et deviennent alors disponibles pour accomplir leur fonction à l'échelon 1 (dépôt). Le dépôt remplace les unités défectueuses à partir d'un stock placé à son niveau (en cas de disponibilité), et, quand on expédie un article, on lance immédiatement un ordre à la base pour son remplacement. Le niveau de stock du dépôt sera défini comme le nombre total d'unités en main plus les unités dûes aux ateliers de réparation de la base moins les demandes en attente de satisfaction (backorders). Le dépôt maintient son niveau de stock à un niveau fixé, S, en utilisant la technique d'approvisionnement (S-1,S): chaque fois qu'une unité ou plus est demandée, le niveau des stocks descend en dessous de S et un ordre pour un nombre égal d'unités est émis. Notons que le stock net (en main moins backorders) devient négatif quand la demande est supérieure au stock disponible.

Pour cette raison, la technique d'approvisionnement (S-1,S) joue un rôle central dans plusieurs modèles de GSAR. L'un des premiers travaux ayant traité ce problème est dû à Scarf qui a noté l'analogie entre ce modèle et la théorie des files d'attentes avec une infinité de serveurs. A chaque lancement d'un ordre, on peut penser à un client

qui entre dans un système avec un nombre infini de serveurs. Le nombre de serveurs occupés correspond au nombre de commandes en suspens ("outstanding orders", i.e., unités en réparation). Le résultat classique de Palm (Théorème classique dans la théorie des files d'attentes) affirme que: "si les clients arrivent suivant un processus de Poisson stationnaire et que les durées de service sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (de moyenne finie) alors la distribution de probabilité de l'état continu du nombre de serveurs occupés est Poissonienne, indépendamment de la forme de la distribution du service". Dans un problème de stock, ceci implique que si la demande des clients est générée par un processus de Poisson stationnaire, l'état continu du nombre de commandes en suspens (i.e., unités en réparation) est une variable aléatoire ayant une distribution poissonnienne (l'hypothèse de base de ce théorème est que les durées de réparation sont des variables indépendantes, ce qui se traduit par des capacités de réparation infinies afin qu'il n'y ait pas de files d'attente au niveau des réparations). Nous aurons donc:

$$P(x \text{ outstandings}) = P(\text{stock net} = S - x) \\ = e^{-\mu\tau} (\mu\tau)^x / x! , \quad x = 0, 1, 2, \dots,$$

où:

- $\mu$  = nombre moyen d'unités demandées par unité de temps ( $\mu$  est le taux d'utilisation en files d'attente), et,
- $\tau$  = espérance de la durée de réparation.

Ce résultat est basé sur la supposition que la demande en excès doit être satisfaite ("backordered"). Une généralisation importante de ce théorème a été obtenue par Feeney et Sherbrooke [2], qui ont montré que la distribution des outstandings est toujours poissonnienne lorsque les demandes sont générées par un processus de

Poisson composé.

Un processus de Poisson composé est un processus dans lequel les temps entre-demands suivent un processus de Poisson de taux  $\mu$ , le nombre d'unités requises à chaque demande est une variable aléatoire discrète prenant ses valeurs dans  $\{0, 1, 2, \dots\}$ , et qui suit une distribution discrète arbitraire (ce résultat n'est valable que si toutes les unités dans une demande sont réparées ensemble).

Dans le contexte de systèmes de stocks réparables, les chercheurs utilisent, généralement, un des deux critères de gestion suivants: le premier est communément appelé le taux de service ("Fill Rate"), et qui est défini par  $1 - P_{out}$ , où  $P_{out}$  est la probabilité d'être en rupture de stock en un point aléatoire du temps. Le second critère est basé sur le nombre de backorders en un point aléatoire du temps. Ces mesures de performances ainsi que leurs interprétations revêtent une grande importance. A titre d'illustration, considérons l'exemple suivant:

Supposons que le stock net (quantité en main moins backorders) dans un cycle particulier est donné par la figure (2.a). La valeur de  $P_{out}$  dans un cycle particulier de longueur  $t_0$ , est obtenue en formant le ratio du temps total passé en rupture de stock ( $t_0 + \dots + t_n$ ) et  $t_0$ . Si  $\mu$  est le taux de demande, alors  $\mu P_{out}$  peut être interprété comme le nombre moyen de backorders contractés par unité de temps ( $\mu P_{out} = 2/t_0$ ).

L'utilisation de  $1 - P_{out}$  comme mesure de performance ne nous apporte pas d'informations sur le temps total d'attente d'un backorder. Par exemple, supposons que le stock net est comme montré sur la figure (2.b)-il reste au niveau zéro durant le temps où les backorders surviennent dans la figure (2.a). Alors la valeur obtenue pour  $P_{out}$  durant  $t_0$  sera la même.

Dans le but de prendre cela en compte, la mesure de performance "*time weighted backorders per unit time*" est calculée comme étant la moyenne du temps durant lequel le stock net est négatif. Dans l'exemple de la figure (2.a), le premier backorder reste en suspens ( $t_1 + t_2$ ) unités de temps, alors que le second ( $t_2 + t_3$ ) unités de temps.

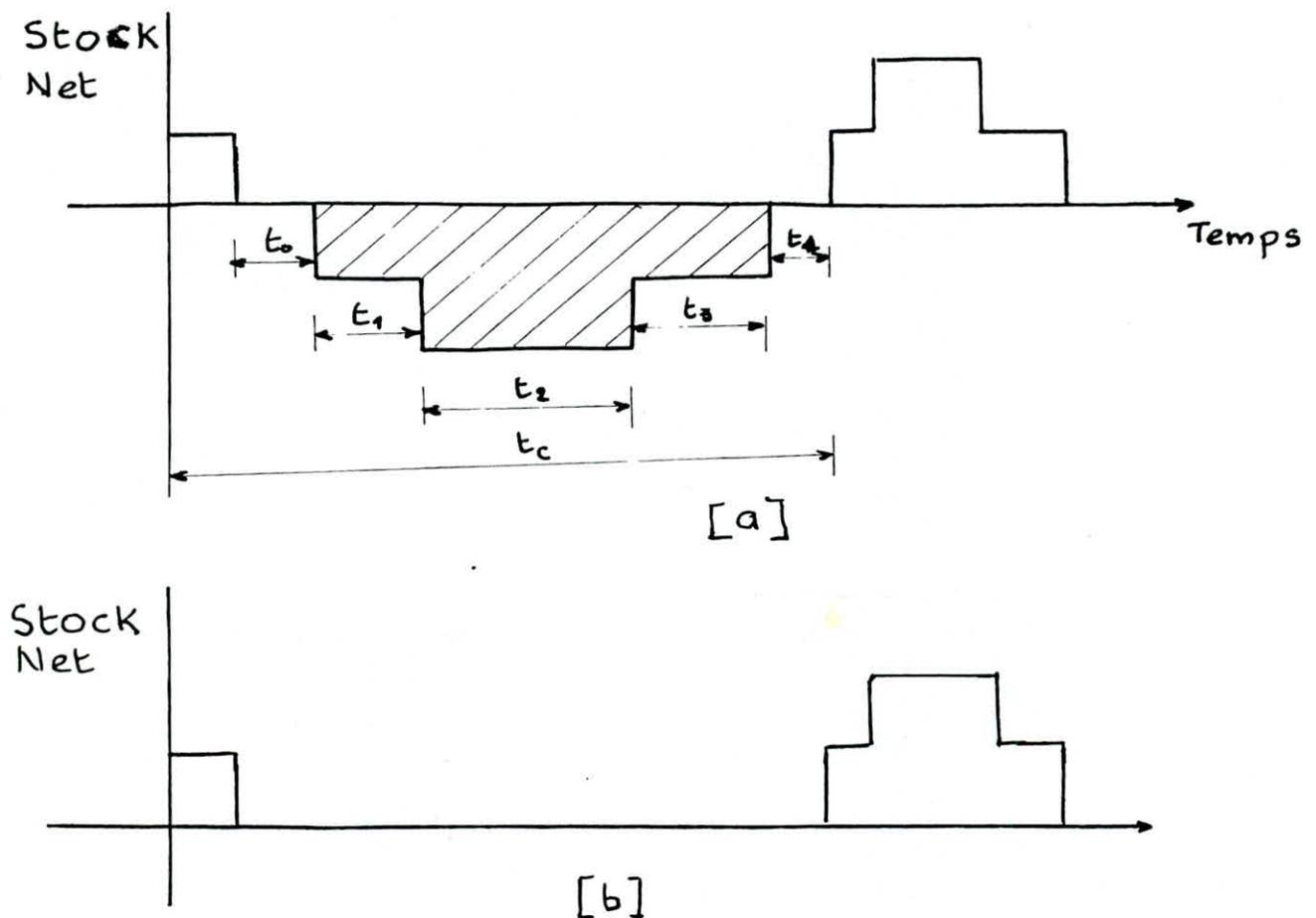


Figure 3. Comparaison des critères de service

Le nombre moyen de backorders en suspens durant  $t_0$  est alors  $(t_1 + 2t_2 + t_3)/t_0$ . (Le numérateur est l'aire de la partie hachurée de la figure (2.a).

Quand les demandes sont générées par un processus de Poisson de taux  $\mu$  et que la durée de service est fixée à  $T$ , Hadley et Whitin [3] montrent que le nombre moyen des "backorders", quand une politique d'approvisionnement  $(S-1, S)$  est pratiquée,  $BO(S)$  est donné par:

$$BO(S) = \sum_{x > S} (x - S)p(x/\mu T),$$

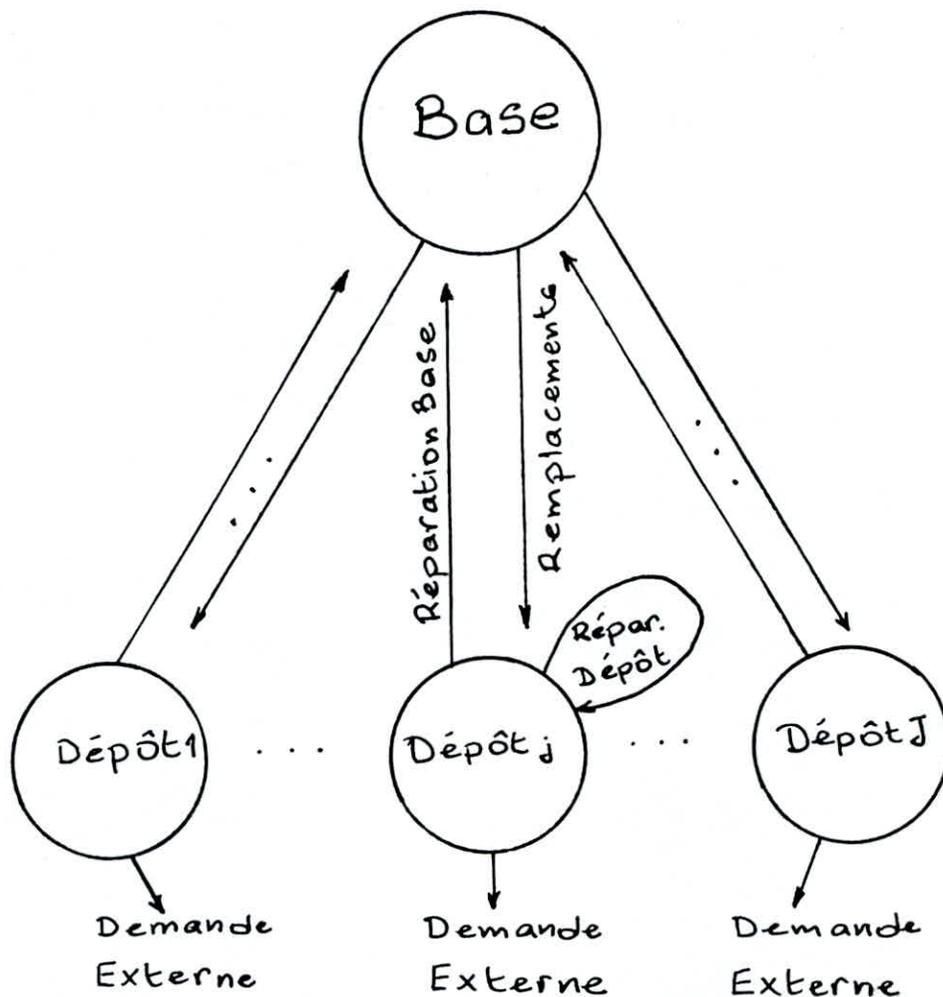
où:  $p(x/\mu T)$  = la probabilité d'avoir  $x$  demandes dans un intervalle de temps de longueur  $T$ .

Feeney et Sherbrooke [2] généralisèrent ce résultat au cas où les demandes sont générées par un processus de Poisson composé. La forme de  $BO(S)$  est alors la même excepté que  $p(x/\mu T)$  est une distribution de Poisson composé et  $T$  est interprété comme l'espérance de la variable aléatoire durée de service (durée de la réparation).

### 3- Le modèle METRIC:

METRIC est l'acronyme de " Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control ". Ce modèle a été développé par SHERBROOKE [4] comme outil de gestion des stocks de l'U.S Air Force (Armée de l'air américaine).

Il fournit une méthodologie pour le calcul des niveaux de stocks optimaux dans un système stock/réparation à deux échelons, consistant en une base et plusieurs dépôts. La base et les dépôts de ce système doivent posséder des stocks de rechanges et certaines capacités de réparation des pièces défectueuses (Figure 3).



Le système à deux échelons considéré par le METRIC  
Figure 3.

Dans son modèle, Sherbrooke a considéré les hypothèses suivantes:

- 1) La demande est supposée suivre un processus de Poisson composé. Jusqu'à nouvel ordre, nous considérons un article stocké en chacun des  $J$  dépôts, chaque dépôt ayant son propre taux d'arrivées clients  $\mu_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$ .
- 2) Quand un client arrive à un dépôt pour lancer une ou plusieurs demandes, il rapporte avec lui un nombre égal

d'unités défectueuses pour réparation. Il est supposé que ces unités peuvent être réparées au niveau du dépôt avec une probabilité  $r_j$ , d'où  $(1-r_j)$  est la probabilité que les unités doivent être expédiées à la base pour réparation. Sous ces deux hypothèses, les clients du dépôt  $j$  qui arrivent à la base sont décrits par un processus de Poisson dont le taux est  $(1-r_j)$  fois le taux du processus poissonien d'arrivée du client au dépôt  $j$ . Par conséquent, la demande totale à la base est poissonnienne composée, avec un taux d'arrivées clients  $\mu = \sum \mu_j(1-r_j)$ . Soit  $f_j$  la demande moyenne par client au dépôt  $j$ , le taux de demande à la base est :

$$\tau = \sum \mu_j f_j (1-r_j) = \sum \tau_j (1-r_j),$$

où  $\tau_j$  est le taux de demande au dépôt  $j$ .

En général, la distribution des demandes placées à la base est une combinaison complexe des distributions composées des dépôts. Cependant, si la demande en chaque dépôt obéit à un processus de Poisson logarithmique<sup>1</sup> avec une variance égale au taux moyen, le processus de demande à la base est aussi un processus de Poisson logarithmique, avec une variance égale au taux moyen (voir W.S. Demmy et V.J. Presutti[5]).

3) Toutes les unités défectueuses peuvent être réparées. Ceci voudra dire que le système est complètement conservatif et qu'aucune condamnation n'est permise. En

---

<sup>1</sup> Un processus de Poisson logarithmique est un processus de Poisson composé dans lequel la probabilité  $h_x$  qu'un client donné demande  $x$  unités est donnée par :

$$h_x = (x \ln(q))^{-1} (p/q)^x \quad \text{pour } x = 1, 2, \dots, \text{ et}$$

$q = p + 1 > 1$ , où  $q$  est un paramètre de la distribution.

réalité, certaines unités ne peuvent plus être réparées et sont condamnées, quittant ainsi définitivement le système.

Ainsi le système réel n'est pas tout à fait conservatif et de nouvelles unités devront éventuellement être acquises de l'extérieur afin de remplacer celles condamnées ou rebutées. Selon Sherbrooke, comme le pourcentage de rebut est généralement de 5% seulement dans ce type d'industrie, et que les décisions d'achats sont prises indépendamment des niveaux de stocks de rechange, l'hypothèse d'un pourcentage de rebuts nul serait acceptable.

5) Il n'y a aucun réapprovisionnement latéral entre les dépôts, c'est à dire qu'un dépôt ne peut approvisionner un autre dépôt.

6) Les temps de réparation successives sont des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées. Cette hypothèse implique qu'il n'y a aucune file d'attente aux stations de réparation.

Soit  $S_j$ ,  $j=1,2,\dots,J$ , le niveau de stock au dépôt  $j$ , et soit  $S_0$  le niveau de stock de la base. Nous supposons que la base et les dépôts suivent tous une politique de remplacement  $(S_{j-1}, S_j)$ . Dans ce cas, le système va être géré de telle sorte que la position du stock (la somme des stocks en main plus les commandes plus les unités en réparation moins les demandes insatisfaites) sera toujours égale à  $S_j$ . La même règle est valable pour le niveau de stock de la base  $S_0$ .

A la limite, nous désirons calculer les valeurs de  $S_j$  qui minimiseront la demande moyenne en attente de satisfaction pour l'ensemble des dépôts. Pour ce faire, un résultat fondamental développé par Feeney et Sherbrooke[2] est appliqué. Précisément, supposons que la demande au dépôt  $j$  obéit à un processus de Poisson composé avec un taux d'arrivées des clients  $\mu_j$ , et supposons que le délai réparation/réapprovisionnement  $t$  suit une distribution

arbitraire  $g(t)$  de moyenne  $T_j$ . Supposons de plus que quand un client arrive, un délai de réapprovisionnement est généré à partir de  $g(t)$ , applicable à toutes les demandes lancées par ce client, et que la demande en excès est "backordered".

Ainsi, le nombre moyen des demandes en attente de satisfaction en un point aléatoire du temps à la base  $j$  est:

$$BO_j(S_j) = \sum_{x > S_j} (x - S_j) p(x/\mu_j T_j) \quad (1)$$

où  $p(x/\mu_j T_j)$  est une probabilité de Poisson composé avec un nombre moyen des arrivées clients durant  $T_j$  égal à  $\mu_j T_j$ . Dans le cas d'un processus de Poisson logarithmique, la probabilité que  $x$  demandes clients soient dans le processus de réparation est une binomiale.

Précisément:

$$p(x/\mu_j T_j) = ((k+x-1)! (q-1)^x) / ((k-1)! x! q^{x+k}), \quad (2)$$

$$x = 0, 1, 2, \dots, \text{ et,}$$

$$q > 1, k > 0.$$

où  $q$  est la variance de  $p(x/\mu_j T_j)$ . La moyenne  $l_j$  de cette distribution est égale à  $\mu_j T_j f_j$ , où le paramètre  $k$  est donné par  $k = l_j / (q-1) = \mu_j T_j f_j / (q-1)$  [Demmey].

Le délai moyen de réapprovisionnement pour une demande au dépôt  $j$  peut être calculé comme suit. Soit:

$A_j$  = durée du cycle de réparation au dépôt: le temps moyen requis pour réparer un article au dépôt  $j$ .

$D$  = durée du cycle de réparation à la base - le temps moyen requis pour envoyer un article à la base, le réparer et le replacer dans le stock de la base.

$O_j$  = délai de commande et d'expédition: temps moyen nécessaire pour qu'une commande soit transmise du dépôt à

la base, et pour transporter les unités demandées au dépôt; ce terme ne comprend pas les retards qui peuvent être occasionnés au niveau de la base et qui sont dus à une rupture des stocks temporaire de l'article dans la base, et

$\delta(S_0)$  = retard moyen au dépôt - c'est le retard moyen encouru lors du lancement d'une commande, dû à une rupture des stocks temporaire, délai exprimé en fraction de temps de la durée du cycle de réparation à la base ( $D$ ).  $S_0$  représente le niveau dû stock total assigné à la base.

Dans ce cas, le délai moyen de réapprovisionnement  $T_j$  du dépôt  $j$  est donné par:

$$T_j = r_j A_j + (1-r_j)(O_j + \delta(S_0)D). \quad (3)$$

Pour calculer le retard moyen  $\delta(S_0)$  (fraction du cycle de réparation à la base), il est nécessaire de calculer le nombre moyen de "backorders" à la base.

Comme mentionné auparavant, les unités défaillantes arrivent à la base suivant un processus de Poisson composé, de taux d'arrivées  $\mu$ . Puisque  $D$  unités de temps sont nécessaires pour la réparation d'une arrivée, alors la distribution de probabilité du nombre d'unités à la base sera une poissonienne composée de moyenne  $\mu D$ . Par conséquent, le nombre moyen d'unités "backordered" à la base est:

$$BO(S_0/\mu D) = \sum_{x > S_0} (x - S_0)p(x/\mu D). \quad (4)$$

Ainsi, le retard moyen à la base par unité demandée est donné par:

$$\delta(S_0)D = BO(S_0/\mu D)/l \quad (5)$$

où  $l = \mu D$  est le taux de demande de la base en unités.

3-1- Applications du modèle METRIC:

Le modèle METRIC peut être appliqué à deux types de problèmes: (1) évaluation de l'efficacité de support associé à un ensemble donné de niveaux de stocks, (2) le calcul de niveaux de stocks optimaux étant donnée la contrainte budgétaire.

(1)- Evaluation:

Le modèle METRIC peut être utilisé pour déterminer les niveaux moyens de backorders associés avec un ensemble donné de niveaux de stocks  $S = (S_0, S_1, \dots, S_J)$ . Ceci peut être fait en utilisant en premier lieu les équations (3), (4) et (5) afin d'évaluer le délai moyen de réapprovisionnement du dépôt associé au niveau de stock  $S_0$  considéré de la base. Ainsi, on pourra calculer l'espérance des backorders pour chacun des dépôts en utilisant les équations (1) et (2).

(2)- Allocation d'un budget:

Supposons que l'on dispose d'un budget  $B$  destiné à l'acquisition des rechanges dans un système à articles multiples (" Multi-Item System "). On voudrait alors savoir comment répartir ce budget de façon à minimiser le total des "backorders" calculé sur tous les articles. Un indice  $i$  sera ajouté aux symboles définis précédemment pour faire référence à l'article  $i$ .

Le problème d'allocation de budget est alors formulé comme suit:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^I \sum_{j=0}^J BO_{i,j}(S_{i,j}/\mu_{i,j}T_{i,j}) \\ & \text{avec} \quad \sum_i c_i \sum_j S_{i,j} \leq B \\ & S_{i,j} \geq 0, \quad 1 \leq i \leq I, \quad 0 \leq j \leq J \end{aligned}$$

Ce problème peut être résolu en utilisant la procédure d'analyse marginale à deux phases de Sherbrooke qui commence par fixer la quantité prévue à acheter à  $N_i$  pour chaque article. L'investissement suivant est alloué à l'article qui produit la plus grande diminution dans le nombre moyen des "backorders" par unité monétaire investi; c'est l'article qui a la plus grande valeur de  $V_i$ ,

$$V_i = (BS_i(N_i) - BS_i(N_i + 1))/c_i$$

La procédure d'allocation s'arrête quand la limite du budget est atteinte.

Critiques: Le modèle METRIC est critiquable pour plusieurs raisons. L'hypothèse d'une infinité de serveurs à la base ne prend pas en compte la façon par laquelle les unités sont programmées pour réparation.

Par ailleurs, les résultats sont obtenus en supposant que le système est dans un état stationnaire.

De plus, même si le système atteint un état stationnaire, lorsque le nombre total d'unités traitées est relativement faible, le taux de défaillance dépendra du nombre d'unités qui sont réellement opérationnelles à un instant donné.

### 3- Le modèle MOD-METRIC:

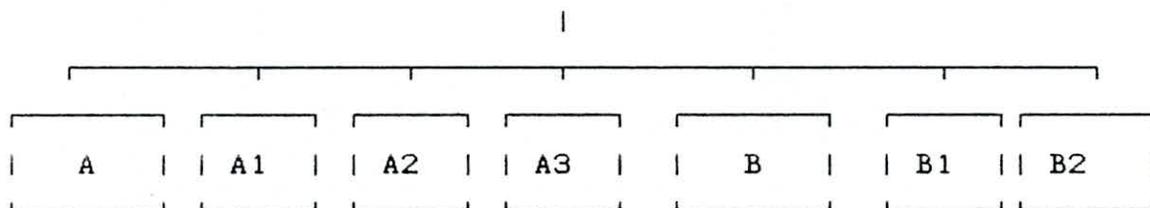
Nombres d'équipements réparables contiennent des sous-ensembles ou composants qui sont eux mêmes réparables. Dans ce cas, la réparation de l'équipement défaillant se fait, généralement, par la dépose et le remplacement du composant ayant causé la défaillance. Le composant est alors réparé soit au niveau du dépôt soit au niveau de la base, selon la complexité de la réparation. Le terme "Line Replaceable Unit" LRU est utilisé pour cette classe d'articles; le terme "Shop Replaceable Unit" SRU est utilisé pour décrire les composants ou sous-ensembles d'un LRU qui sont déposés et remplacés dans les ateliers de réparation de la base ou des dépôts.

Un aspect important du problème des stocks de pièces de rechange qui n'est pas pris en compte par le modèle METRIC est la relation entre l'équipement et ses composants, ou modules. Pour être plus clair, considérons un moteur d'avion dont la défaillance est due à un module remplaçable particulier du moteur. Comme le but est de renvoyer le moteur dans un état opérationnel, un manque de disponibilité de modules est seulement significatif dans le sens où il génèrera un retard supplémentaire dans le cycle de réparation du moteur. Ce sont les demandes en suspens pour les moteurs plus que pour les modules qui ont un effet direct sur la disponibilité de l'avion.

Le modèle METRIC ignore les relations hiérarchiques entre le moteur et ses modules ou composants, dans le sens qu'il minimise l'espérance des "backorders" des moteurs et modules. La figure (4) schématise la différence entre le METRIC et un système à hiérarchies multiples "Multi-indenture system".

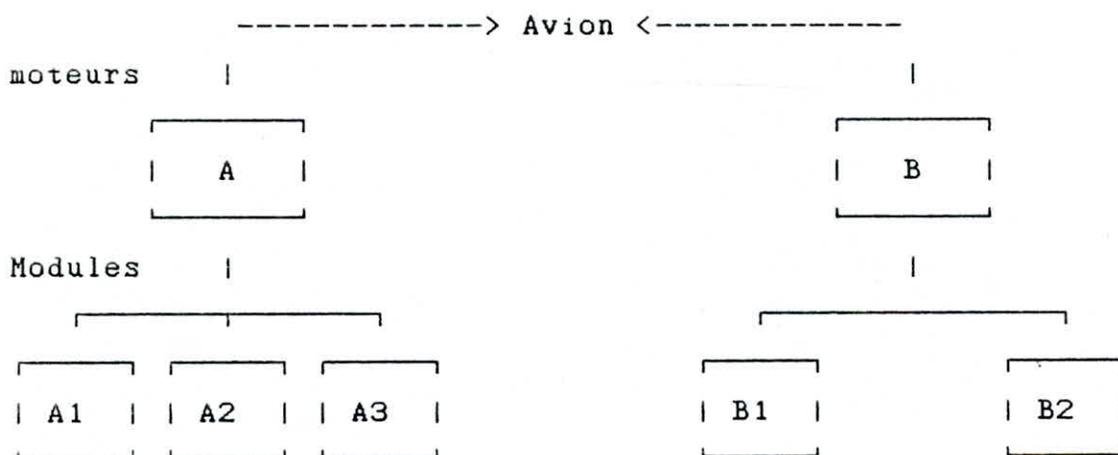
METRIC CONCEPT

AVION



Minimisation des backorders moteurs et modules sans  
différentiation

MULTI-INDENTURE CONCEPT



Minimisation des backorders moteurs seulement

Figure 4

Le modèle MOD-METRIC de Muckstadt[6] est une extension du modèle METRIC de base qui prend en compte les relations hiérarchiques entre le moteur et ses modules ou composants.

Dans son modèle, Muckstadt suppose que la durée moyenne de réparation,  $B_j$ , d'un LRU au dépôt  $j$  est donnée par:

$$B_j = R_j + D_j, \quad (6)$$

où:

$R_j$  = cycle moyen de réparation au dépôt  $j$ , lorsque tous les SRUs requis sont disponibles, et,

$D_j$  = retard moyen dans le cycle de réparation d'un LRU dû à une indisponibilité des SRUs requis au dépôt  $j$ .

Le retard moyen  $D_j$  peut être calculé d'une manière identique à celle du calcul du retard moyen au dépôt. Pour illustrer cela, considérons une famille d'articles constituée par un LRU unique et l'ensemble des SRUs qui lui sont associés. Soit  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ , l'indice du  $i$ ème composant (SRU) et  $i = 0$ , l'indice du LRU. De plus, supposons que la réparation d'un LRU donné nécessite l'enlèvement et le remplacement d'au plus un SRU. Dans ce cas, le retard moyen dans le cycle de réparation dû à une rupture de stock du  $i$ ème SRU est:

$$D_{i,j} = \sum_{x_{i,j} > S_{i,j}} (x_{i,j} - S_{i,j}) p(x_{i,j} / \mu_{i,j} T_{i,j}) / \mu_{i,j} \quad (7)$$

où les symboles  $x_{i,j}$ ,  $S_{i,j}$ ,  $T_{i,j}$  sont définis comme pour le modèle METRIC.

Soit  $\mu_j$  le taux de défaillance du LRU au dépôt  $j$ , et soit  $r_j$  la probabilité que le LRU défaillant soit réparé au dépôt  $j$ . Alors:

$$r_j \mu_j = \sum_{i=1}^I \mu_{i,j} \quad (8)$$

Le ratio  $\mu_{i,j} / r_j \mu_j$  dénotera la probabilité qu'un LRU défaillant au dépôt  $j$  nécessitera le remplacement du SRU  $i$ .

L'espérance du retard moyen dans le cycle de réparation

d'un LRU défaillant au dépôt  $j$  est alors:

$$D_j = \left( \sum_{i=1}^r \mu_{i,j} D_{i,j} \right) / r_j \mu_j, \quad (9)$$

Finalement, le délai moyen de réapprovisionnement d'un LRU au dépôt  $j$  à partir de la base est:

$$T_j = r_j (R_j + D_j) + (1 - r_j) (O_j + \delta(S_0)), \quad (10)$$

où  $S_0$  est le niveau de stock de LRU à la base. L'espérance des backorders au dépôt  $j$  peut être calculée en utilisant l'équation (1) donnée dans le modèle METRIC sauf que le délai moyen de réapprovisionnement est calculé à partir de l'équation (10).

#### "MOD-METRIC Budget Association":

Supposons que nous disposons d'un budget  $B$  pour l'acquisition des rechanges de LRU et SRU. Comment devons-nous répartir ce budget entre les LRUs et les SRUs de façon à minimiser les "backorders" de LRU calculés sur tous les dépôts (base y compris). Muckstadt a suggéré une procédure de calcul suivant les étapes suivantes:

- |  |  |
|--|--|
| Etape 0. Partitionner le budget total en deux composantes, |  |
| $B_1$ et $B_2$ .   |  |
|  |  |
| Etape 1. Répartir le budget $B_1$ entre les SRUs de telle  |  |
| façon à minimiser l'espérance des retards dans             |  |
| le cycle de réparation des LRUs sommés sur                 |  |

tous les dépôts. Mathématiquement le problème est de minimiser  $Z$ ,

$$Z = \sum_j r_j \rho_j D_j$$

$$\sum_{i=1}^I c_i \sum_{j=0}^J S_{i,j} \leq B_1.$$

Ce problème peut être résolu de la même manière que dans le modèle METRIC.

Etape 2. A partir des résultats de l'étape 1, calculer le délai moyen de réapprovisionnement  $T_j$  des LRUs pour chaque dépôt. Allouer alors le budget restant  $B_2$  de sorte à minimiser l'espérance des demandes en suspens. Utiliser une deuxième fois la procédure METRIC pour résoudre ce problème.

Etape 3. Les deux étapes 1 et 2 fournissent un ensemble de niveaux de stocks en fonction d'un partitionnement donné du budget total entre les LRUs et les SRUs. Ces deux étapes sont répétées plusieurs fois en utilisant de nouvelles valeurs pour  $B_1$  et  $B_2$  afin de déterminer le meilleur partitionnement du budget total.

Cet algorithme ne garantit pas une solution optimale du problème de minimisation de l'espérance des demandes en suspens des LRUs.

Enfin, notons que la seule différence significative, entre le modèle METRIC et le modèle MOD-METRIC, est dans la méthode de calcul de chacun du délai moyen de réapprovisionnement des dépôts.

4- Le modèle A<sub>0</sub> Optimal: (Andrew J. CLARK, [7])

Le concept de base du modèle de gestion de stocks A<sub>0</sub> Optimal est relativement simple. En premier lieu, c'est un modèle à hiérarchies multiples ("multi-indenture model"), comme illustré dans la figure (5.a). En second lieu, c'est un modèle à échelons multiples, comme illustré dans la figure (5.b): on considère que chaque site du système de support doit disposer de stocks de rechange et de moyens de réparation. Finalement, la technique d'approvisionnement à revue continue (S-1, S) est utilisée pour tous les articles et tous les sites: à chaque fois qu'une unité est retirée du stock, une unité de remplacement est commandée à partir du site de l'échelon supérieur (le fournisseur dispose de stocks illimités). Il est supposé en outre que chaque demande d'un article est accompagnée par l'unité défaillante correspondante: on échange une unité bonne contre une mauvaise.

Considérons maintenant un article réparable quelconque dans un site donné. Un client arrive avec une unité défaillante de l'article et demande une unité bonne en échange. Si une unité bonne est disponible en stock, le client repart immédiatement (pas de temps d'attente), et l'unité défaillante entre dans l'atelier de réparation du site considéré. D'un autre côté, s'il n'y a pas de rechanges en stock et qu'aucune réception n'est prévue de l'atelier ou de la source d'approvisionnement de ce site, le client devra attendre jusqu'à ce que son unité défaillante soit réparée (en supposant que la réparation prend moins de temps que la réception d'une nouvelle unité suite à une commande). La réparation dure un certain temps, le cycle de réparation ("repair cycle, RC"), en supposant que les composants nécessaires sont disponibles en stock. Si un ou plusieurs composants ne sont pas disponibles, alors, un temps additionnel, cycle additionnel de réparation ("extra repair cycle, ERC"), sera requis pour pouvoir commander et recevoir

ces composants (ou pour recevoir les commandes passées précédemment et qui sont en voie d'être réceptionnées). Ainsi, la durée totale de la réparation est donnée par le cycle de réparation, qui est basé sur la disponibilité des composants, plus un incrément s'il y a pénurie des composants nécessaires à la réparation.

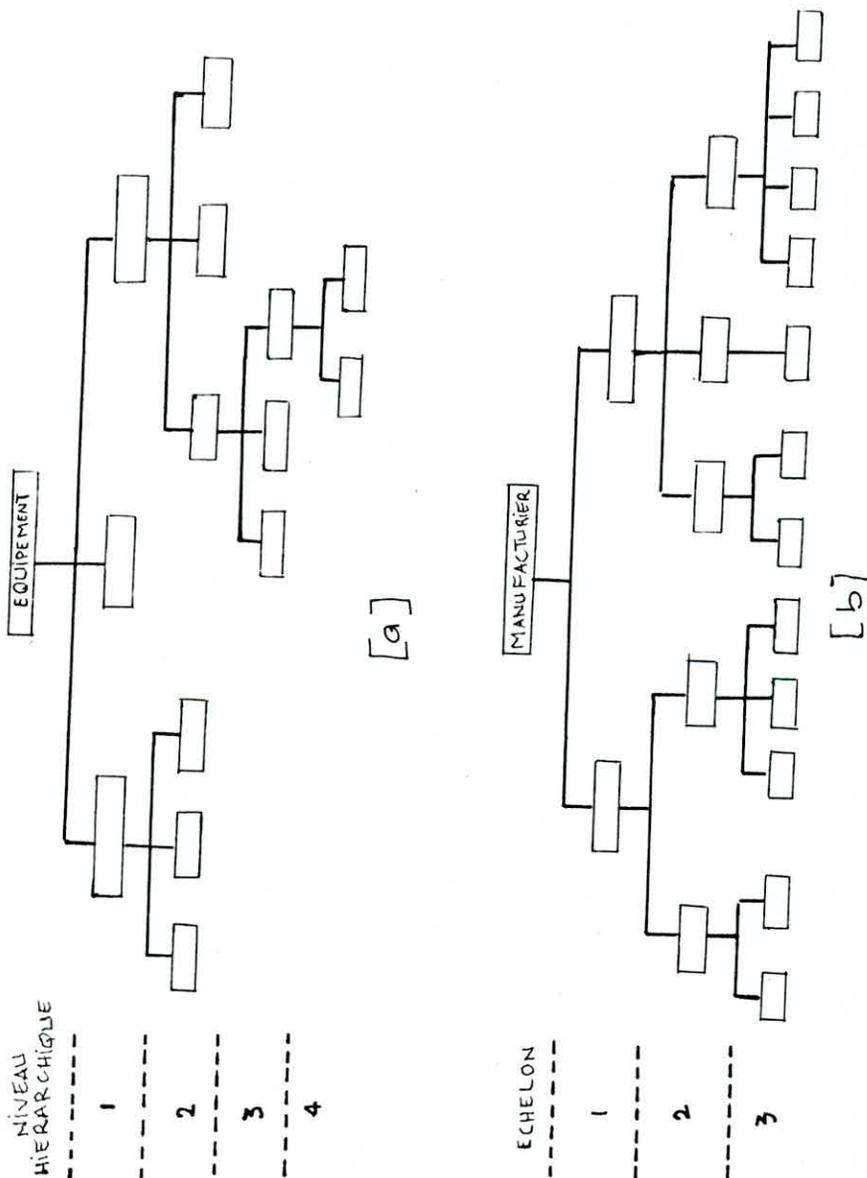


Figure. 5 a) exemple d'une structure hiérarchique.  
 b) exemple d'un système de support à plusieurs échelons.

Un autre facteur doit être considéré: quand l'unité défaillante entre en atelier, il y a une possibilité que la réparation ne puisse se faire au niveau du site considéré ( ceci peut être dû, par exemple, à un manque de qualification, d'équipements spéciaux, ou d'autres ressources). Dans ce cas, l'unité est envoyée au site de l'échelon supérieur et une unité bonne est demandée en échange. Si une unité de rechange est disponible dans ce site, l'échange dure un certain temps, délai de réapprovisionnement ("resupply time,  $RT$ "). Sinon, un délai additionnel de réapprovisionnement ("extra resupply time,  $ERT$ "), est compté. C'est le temps d'attente jusqu'à ce que le site de l'échelon supérieur reçoit une unité bonne pouvant provenir de son atelier ou de sa source d'approvisionnement.

Ainsi, on peut résumer le temps moyen d'attente du client comme suit:

$$\begin{array}{l} \text{Temps moyen} \\ \text{d'attente client} \end{array} = r*(R_t + ERT) + (1 - r)*(R_c + ERC)$$

où:

$r$  = "loss probability" ou la probabilité qu'une unité défaillante ne puisse être réparée dans le site considéré et doit être par conséquent expédiée au site de l'échelon supérieur,

$R_t$  = délai moyen de réapprovisionnement,

$ERT$  = délai moyen additionnel de réapprovisionnement,

$R_c$  = cycle moyen de réparation, et

$ERC$  = cycle moyen additionnel de réparation.

Le temps d'attente client donné par cette formule est valable seulement si les unités de rechange ne sont pas disponibles en stock. Cette situation va donc dépendre du niveau de stock entreposé dans le site considéré. Ainsi, le

temps moyen d'attente va dépendre du niveau de stock initial et de la probabilité d'être en rupture de stock à l'instant de la demande. Cette espérance est définie comme la moyenne des temps de réponse du stock d'un article donné dans un site donné (*Mean supply response time - MSRT*).

Considérons maintenant l'équipement final, l'article au sommet de la hiérarchie, et un site de l'échelon le plus bas du système de support, qui traite cet équipement. Le MSRT de cet article en ce site dépend des niveaux de stocks de tous les composants et de tous les sites de stockage; il sera alors calculé en utilisant une procédure récursive. Puisque le MSRT est défini sur la base d'une défaillance, le MSRT calculé peut être interprété comme l'espérance de l'intervalle de temps durant lequel l'équipement n'est pas opérationnel, après défaillance, pour cause de pénurie d'équipement de rechange.

De plus, l'équipement peut être immobilisé pour un certain temps supplémentaire qui n'est pas en rapport avec la disponibilité des équipements de rechange. Par exemple, le temps de diagnostiquer et d'isoler la défaillance, de déposer et de remplacer les composants défectueux, et de contrôler l'équipement après réparation. Le temps moyen nécessaire à la réalisation de ces opérations de maintenance est défini comme étant la moyenne des temps de réparation (*Mean Time To Repair - MTTR*).

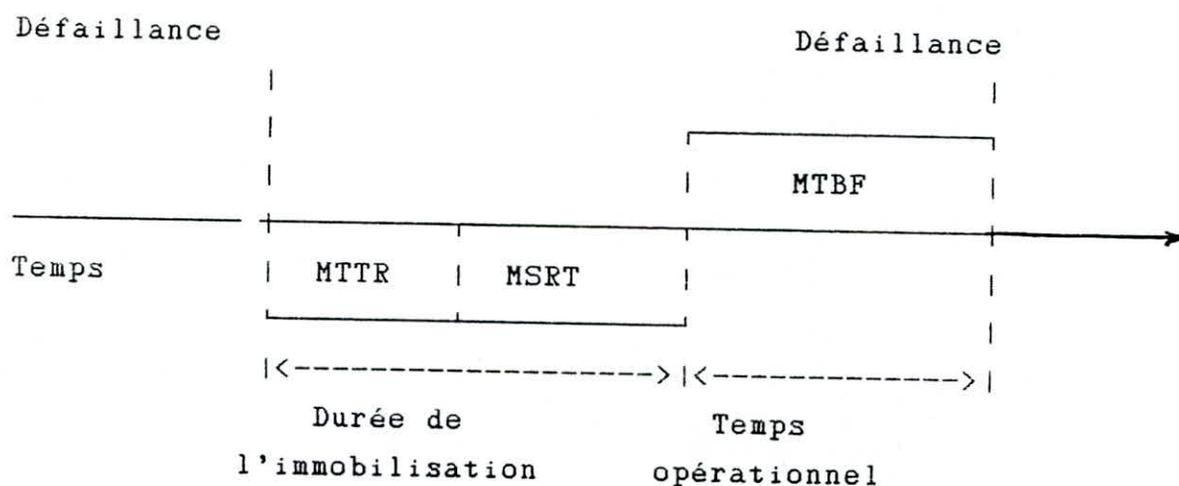
L'espérance de la disponibilité opérationnelle de l'équipement est calculée comme suit:

$$A_o = \frac{\text{Disponibilité opérationnelle}}{\text{Disponibilité opérationnelle}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR} + \text{MSRT}}$$

où:

MTBF = moyenne des temps de bon fonctionnement,  
 MTTR = moyenne des temps de réparation,  
 MSRT = moyenne des temps de réponse d'un stock.

La dérivation de cette formule est évidente sur le schéma suivant:



Ainsi,  $A_0$  est la fraction du temps moyen durant lequel l'équipement est dans un état opérationnel.  $A_0$  peut aussi être interprétée comme étant la probabilité que l'équipement soit dans un état opérationnel en un point aléatoire du temps.

La description du modèle  $A_0$  Optimal donnée précédemment peut être formulée mathématiquement par un ensemble d'équations dépendantes. Considérons un article  $i$ , dont la hiérarchie est arbitraire, et un site quelconque,  $j$ , dans le système de support. Supposons que tous les paramètres exprimés en temps utilisent les jours comme unité de mesure commune. Le modèle est alors défini par les six équations suivantes:

$$M_{i,j} = D_{i,j} + \tau_{i,j}, \quad (1)$$

où:

$M_{i,j}$  = temps moyen pour renvoyer une unité défaillante de l'article  $i$  au site  $j$  dans un état opérationnel,

$D_{i,j}$  = temps moyen de réponse du stock de l'article  
 i entreposé au site j (MSRT), et  
 $\tau_{i,j}$  = moyenne des temps de réparation de l'article i au  
 site j quand tous les composants nécessaires à la  
 réparation sont disponibles (MTTR),  
 $\tau_{i,j} = 0$  si le site j ne répare pas l'équipement.

Le terme  $\tau_{i,j}$  est défini seulement pour les sites qui peuvent réparer l'équipement ("user sites").

Le terme  $D_{i,j}$  représente le temps moyen nécessaire pour satisfaire une demande à partir du stock du site j. Il dépend du niveau du stock de l'article i entreposé au site j:

$$D_{i,j} = \left[ \sum_{x > S_{i,j}} (x - S_{i,j}) p(x/\mu_{i,j} T_{i,j}) \right] / \mu_{i,j}, \quad (2)$$

où:

$S_{i,j}$  = niveau du stock de l'article i au site j,

$\mu_{i,j}$  = nombre moyen de demandes par unité de temps  
 au stock de l'article i au site j,

$p(x/\mu_{i,j} T_{i,j})$  = probabilité d'une réduction de x unités du  
 stock de l'article i au site j durant  $T_{i,j}$ ,  
 et

$T_{i,j}$  = délai moyen de réapprovisionnement du stock  
 de l'article i au site j.

Si le niveau du stock,  $S_{i,j}$ , est nul, alors  $D_{i,j} = T_{i,j}$ , impliquant que le client doit attendre, à chaque fois qu'il place une demande, le temps complet,  $T_{i,j}$ , nécessaire pour obtenir un article i de l'atelier ou de la source de réapprovisionnement:

$$T_{i,j} = r_{i,j}(L_{i,j} + L'_{i,j}) + (1 - r_{i,j})(R_{i,j} + R'_{i,j}), \quad (3)$$

où:

$r_{i,j}$  = probabilité que l'unité défaillante de l'article  $i$  accompagnant la demande ne puisse être réparée au site  $j$ ,

$L_{i,j}$  = délai moyen de réapprovisionnement quand le stock est disponible au niveau du site de l'échelon supérieur,

$L'_{i,j}$  = délai additionnel moyen de réapprovisionnement dû à une rupture de stock au niveau du site de l'échelon supérieur,

$R_{i,j}$  = cycle moyen de réparation en supposant une disponibilité des composants nécessaires à la réparation de l'article  $i$ , et

$R'_{i,j}$  = cycle moyen additionnel de réparation dû à une indisponibilité des composants nécessaires à la réparation de l'article  $i$ .

$$L'_{i,j} = D_{i,v} \quad (4)$$

où  $v$  = le site de l'échelon supérieur fournissant les stocks de l'article  $i$  entreposés au site  $j$ .

Dans l'équation (4),  $L'_{i,j} = 0$  pour le manufacturier (échelon sommet) puisqu'il n'est pas à approvisionner.  $L'_{i,j}$  est aussi nul pour les sites du deuxième échelon puisqu'on suppose que les stocks qui y sont entreposés sont infinis. Cette équation représente la relation qui existe entre les activités dans le système de logistique à plusieurs échelons. Elle montre que la valeur du délai additionnel de réapprovisionnement,  $L'_{i,j}$ , en un site donné  $j$  est égale au temps moyen de réponse à une demande formulée à sa source d'approvisionnement  $v$ .

$$R'_{i,j} = \left[ \sum_{k \in i} \mu_{k,j} M_{k,j} \right] / \left[ \sum_{k \in i} \mu_{k,j} \right] \quad (5)$$

où  $k =$  un des composants de  $i$  (nous sommes sur l'ensemble des composants de  $i$ ).

Si l'article  $i$  ne peut être désassemblé alors  $R'_{i,j} = 0$ . L'équation (5) établit que le cycle additionnel de réparation,  $R'_{i,j}$ , pour l'article  $i$  au site  $j$ , dû à une pénurie de ses composants est égal à la moyenne pondérée du temps moyen nécessaire pour retourner ces composants dans un état opérationnel. Le facteur de poids,  $\mu_{k,j}$ , est le taux de demande pour l'article  $k$ . Cette équation représente le lien entre les articles de différentes hiérarchies, et reflète le fait que la réponse du stock d'un article  $i$  dépend de l'état du stock des composants de l'article  $i$ .

$$A_{e,j} = 1 / (1 + \mu_{e,j} M_{e,j}) , \quad (6)$$

où  $A_{e,j}$  est la fraction du temps durant lequel l'équipement est disponible pour utilisation au site  $j$ .

L'équation (6), définie seulement pour l'article  $e$  (équipement final ou l'équipement au sommet de la hiérarchie) et pour les user-sites  $j$ , est équivalente à la formule de la disponibilité opérationnelle,  $A_o$ , donnée lors de la description du modèle. La formule précédente est facilement obtenue en remplaçant  $\mu_{e,j} = 1 / (MTBF)_{e,j}$  et en utilisant l'équation (1) pour calculer  $M_{e,j}$ . La substitution de l'équation (1) pour  $M_{e,j}$  et les substitutions récursives subséquentes dans toutes les équations données précédemment, démontrent la dépendance de la disponibilité opérationnelle de l'équipement de l'état du stock de tous les articles et de tous les sites.

Les différents paramètres donnés dans les équations (1)-(6) sont consignés dans le tableau suivant (les indices indiquant les articles et les sites ont été omis pour des raisons de lisibilité). Ces paramètres sont soit donnés (input), soit calculés par les équations indiquées.

Paramètres utilisés dans le modèle A<sub>0</sub> Optimal

Paramètre	Symbole	Source
Temps moyen de récupération	M	Eq. (1)
Moyenne des temps de réponse (MSRT)	D	Eq. (2)
Moyenne des temps de réparation (MTTR)	$\tau$	Input
Niveau du stock	S	Input
Taux de demande	$\mu$	Input
Temps moyen de reconstitution du stock	T	Eq. (3)
Loss factor	r	Input
Délai moyen de réapprovisionnement	L	Input
Délai additionnel de réappro.	L'	Eq. (4)
Cycle moyen de réparation	R	Input
Cycle additionnel de réparation	R'	Eq. (5)
Disponibilité opérationnelle	A	Eq. (6)

Avant de passer à la procédure de résolution, rappelons que les principales hypothèses de ce modèle sont: la demande en excès est "backordered"; la technique d'approvisionnement à revue continue (S-1, S) est utilisée par tous les sites; les distributions des demandes sont stationnaires et satisfont le théorème de Palm; pas de réapprovisionnement latéral entre les sites d'un même échelon; et enfin la structure hiérarchique est une arborescence.

Résolution:

La formulation du modèle donnée par les six équations établit les relations structurales entre les niveaux de stock de tous les articles en tout site, et les rapporte à une mesure de la disponibilité opérationnelle de l'équipement final. Le problème qui se pose alors est de trouver les

valeurs des niveaux de stocks de telle sorte qu'une disponibilité fixée soit atteinte.

Pour résoudre ce problème, A.J.Clark a proposé la procédure suivante:

- Etape 0. Fixer des niveaux de stocks  $S_{i,j}$  pour tous les articles et tous les sites.
- Etape 1. Commencer la procédure en considérant les articles du niveau hiérarchique le plus bas et les sites du premier et deuxième échelon. Pour ces articles et ces sites,  $R'_{i,j}$  et  $L'_{i,j}$  sont nuls. Utiliser les équations (3), (2) et (1), dans cet ordre, pour calculer  $M_{i,j} = D_{i,j}$ , le temps moyen de réponse des stocks de chacun de ces articles et sites.
- Etape 2. Pour ces mêmes sites, utiliser l'équation (5) pour calculer l'extra resupply time,  $R'_{i,j}$ , pour tous les ensembles des articles considérés dans l'étape 1. Comme  $L'_{i,j}$ , reste nul pour ces ensembles, les équations (3), (2) et (1) peuvent encore être appliquées pour calculer  $D_{i,j}$  pour tous ces ensembles.
- Step 3. Répéter l'étape 2, en considérant les mêmes sites mais en se déplaçant à chaque fois au niveau hiérarchique supérieur, jusqu'à ce que le sommet de la hiérarchie (équipement e) soit atteint. A la fin de cette étape, les valeurs des temps moyens de réponse  $D_{i,j}$ , auront été déterminées pour tous les articles et pour tous les sites de l'échelon 1 et 2.
- Etape 4. Considérer maintenant les sites de l'échelon suivant dans le système de logistique. Les délais additionnels de réapprovisionnement,  $L'_{i,j}$ , pour tous les articles en ces sites sont maintenant donnés par l'équation (4). Refaire les étapes 1 à 3 pour ces sites, en commençant par les articles du niveau hiérarchique le plus bas, et en remontant la hiérarchie jusqu'à atteindre l'équipement e.

| Step 5. Refaire l'étape 4, mais pour les sites de |  
| l'échelon inférieur suivant dans la hiérarchie. |  
| Continuer jusqu'à atteindre les sites du dernier |  
| échelon (user-sites). Dans cette étape toutes les |  
| valeurs de  $M_{i,j}$  auront été obtenues pour tous les |  
| articles (y compris e) et pour tous les user-sites. |  
| (notons que le terme  $\tau_{i,j}$  est différent de zéro |  
| pour ces sites). |  
| Etape 6. Utiliser la valeur de  $M_{e,j}$ , calculée dans l'étape 5 |  
| pour calculer la disponibilité moyenne opération- |  
| nelle de l'équipement e dans l'"user-site" j |

Cette procédure est utilisée pour déterminer les conséquences, en terme de disponibilité moyenne opérationnelle de l'équipement dans les "user-sites", pour n'importe quel ensemble donné de niveaux de stock. Une mesure de coût pour ces niveaux de stock peut être facilement calculée. Le coût est trouvé en additionnant les investissements en stocks (prix unitaire multiplié par le niveau de stock) pour tous les articles en tout site. Ainsi, nous pourrions tracer le graphe disponibilité-coût de la disponibilité moyenne.

Le problème qui se pose en appliquant cette procédure, est le choix des niveaux de stock. Pour y remédier, l'auteur propose l'utilisation d'une procédure d'analyse marginale (similaire à celle de Muckstadt, mais au lieu de considérer la fonction des "backorders", il considère la fonction  $A_0(S_{e,j})$ ).

5- Méthodes d'approvisionnement des pièces de rechange utilisant les modèles de files d'attente:

Rappel sur les systèmes de files d'attente:

[ Référence: cours de PSFA ]

Un système de files d'attente consiste en un ou plusieurs serveurs qui fournissent un certain type de service aux clients qui arrivent. Ceux-ci, s'ils trouvent tous les serveurs occupés, rejoignent une ou plusieurs files.

A\ Les composants d'une file d'attente:

Un système de files d'attente est caractérisé par trois composants: le processus d'arrivée, le mécanisme de service et la discipline de service. Spécifier le processus d'arrivée pour ces systèmes consiste à décrire comment les clients arrivent au système. Nous devrions donc spécifier la distribution des temps inter-arrivées, ainsi que sa moyenne  $\mu$  (la moyenne des temps inter-arrivées des clients).

Le mécanisme de service est spécifié par le nombre de serveurs (noté  $s$ ), si chaque serveur a sa propre file ou s'il y a une seule file desservant tous les serveurs, et la distribution de probabilité des temps de service des clients, la moyenne de cette distribution est le taux de service,  $\tau$ .

La discipline de service d'un système de files d'attente réfère à la règle qu'utilise le serveur pour choisir le prochain client de la file. Les disciplines d'attente les plus couramment utilisées sont:

FIFO. First-In, First-Out, (premier arrivé, premier servi)

LIFO. Last-In, First-Out, (dernier arrivé, premier servi)

Priorité. Les clients sont servis dans l'ordre de leur importance.

B\ Notations utilisées.

Une notation standard a été développée pour les systèmes de files d'attente. Nous prendrons pour exemple le système suivant:

(GI/G/s/N/L/FIFO),

GI indique la distribution du processus d'arrivée, et que les inter-arrivées sont indépendantes.  
 G indique la distribution du processus de service,  
 s indique le nombre de serveurs,  
 N indique la borne supérieure du nombre de clients dans le système, ou la capacité du système,  
 L indique le nombre de clients, et  
 FIFO indique ici la discipline FIFO de service.

Pour n'importe quelle file GI/G/s, on appelle la quantité  $\delta = \rho/s$  l'intensité de trafic du système.

C\ Mesures d'efficacité de la file.

Il existe différentes mesures d'efficacité des systèmes de files d'attente. Nous en décrivons quatre qui sont les plus utilisées dans les études mathématiques de ces systèmes. Soit

$D_i$  = le délai d'attente du  $i$ ème client dans la file,

$W_i$  =  $D_i + S_i$  = le temps passé dans le système par le client  $i$ , où  $S_i$  est le temps de service de ce client

$Q(t)$  = nombre de clients dans la file au temps  $t$ , et

$L(t)$  = nombre de clients dans le système au temps  $t$

( $Q(t)$  plus le nombre de clients en service à l'instant  $t$ ).

Sous les conditions de stationnarité, nous nous intéressons à déterminer les mesures d'efficacité du système et qui sont:

$\pi_n$  = probabilité stationnaire qu'il y ait  $n$  clients dans le système,

$L_m$  = espérance du nombre moyen de clients dans le système,

$L_q$  = espérance du nombre moyen de clients dans la file,

$W_m$  = espérance du temps moyen d'attente dans le système, et

$W_q$  = espérance du temps moyen d'attente dans la file.

Notons que  $\delta < 1$ , est une condition nécessaire pour que

toutes ces mesures existent pour toute file d'attente GI/G/s (sinon le système serait instable).

Remarque importante: les mesures d'efficacité mentionnées précédemment, peuvent être calculées pour les files M/M/s ( $s \geq 1$ ), M/G/1 (pour n'importe quelle distribution G), et pour certains autres systèmes de files d'attente. En général, la distribution des inter-arrivées, la distribution des durées de service, ou les deux doivent être exponentielles (ou une variante telle la k-Erlang) pour que des solutions analytiques soient possibles.

L'application du théorème de Palm dans les modèles précédents requière l'hypothèse que le temps moyen de réparation d'une unité entrant en atelier soit constant et indépendant de l'état du système. Cependant, il est clair que ce temps dépendra fortement du nombre d'unités en attente de réparation. Un autre abus de ces modèles est que le taux de demande est lui aussi supposé constant et indépendant du nombre d'unités opérationnelles (ceci ne concerne pas le modèle A<sub>0</sub> Optimal, puisqu'il considère le MTBF d'une unité opérationnelle). En réalité, le taux de demande dépend du nombre d'unités opérationnelles à un instant donné. Dans les systèmes où le nombre d'unités opérationnelles est faible, cet effet pourra être significatif.

L'approche connue sous le nom "Machine Repair Model, MRM") est l'une de celles qui tiennent compte de ces considérations. Supposons qu'un parc de M machines, opérant en permanence, est supporté par S machines de rechange. Quand une défaillance survient, la machine est en attente (dans une file) de réparation. Lorsqu'une rechange est disponible, elle remplace immédiatement la machine défaillante. L'atelier de réparation est constitué de r ( $r \geq 1$ ) équipements de réparation identiques opérant en parallèle. La discipline de la file d'attente à l'entrée de la file est FIFO. Ce système

est illustré dans la figure suivante:

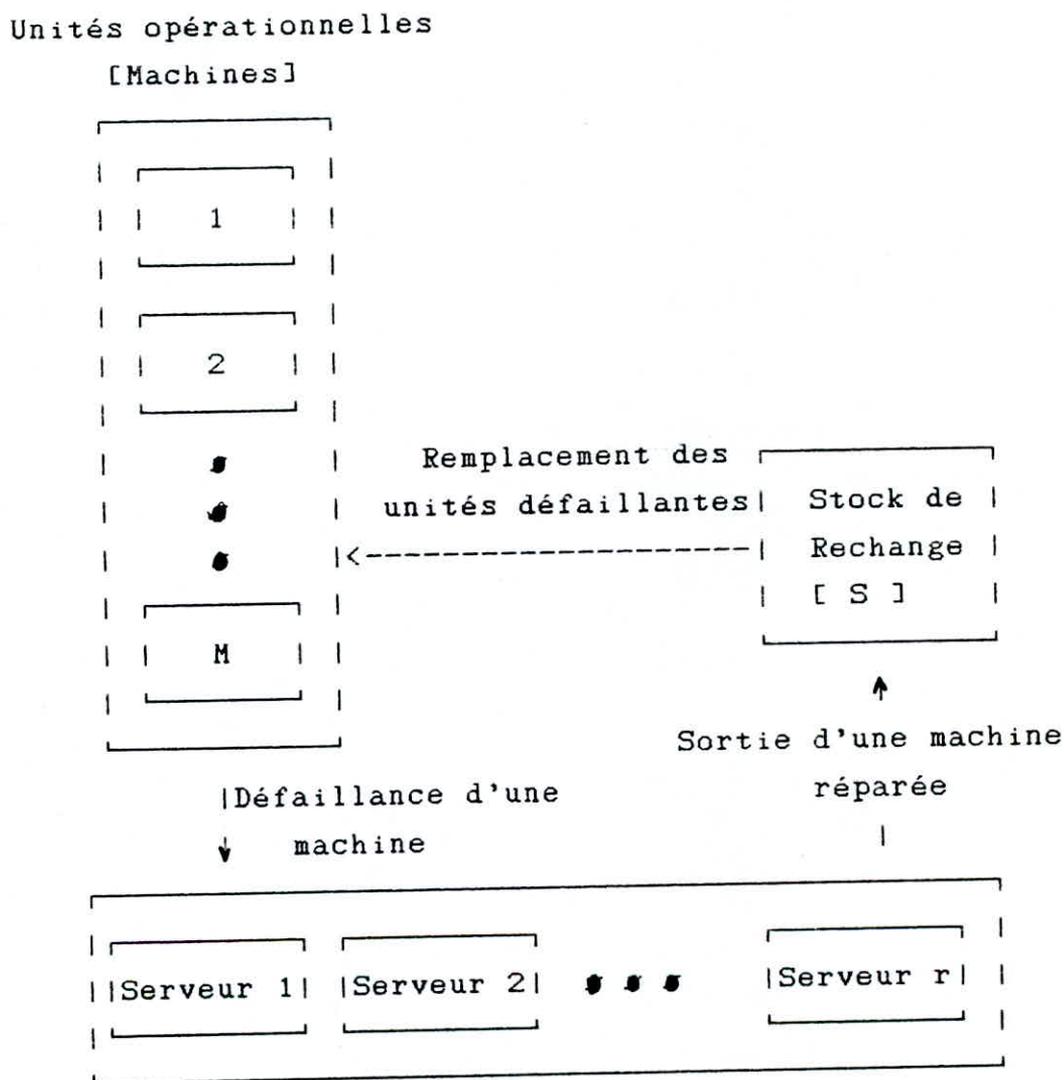


Schéma du système de réparation des machines.

Figure. 5

En général, on suppose que les machines tombent en panne selon une certaine distribution  $F(\cdot)$  et qu'elles sont

réparées suivant une autre distribution  $G(\cdot)$ . Cependant, le résultat analytique pour le problème général semble être connu uniquement dans le cas où  $F$  et  $G$  sont toutes les deux exponentielles, de paramètres respectifs  $\mu$  et  $\tau$ ; nous allons désormais faire cette hypothèse.

L'état du système,  $n$ , correspond au nombre de machines dans le système. Si  $\mu_n$  est le taux de défaillance quand l'état du système est  $n$ , alors

$$\mu_n = \begin{cases} M\mu & \text{si } 0 \leq n < S, \\ (M - n + S)\mu & \text{si } S \leq n < M + S, \end{cases}$$

Similairement, soit  $\tau_n$  le taux avec lequel les unités quittent l'atelier quand l'état du système est  $n$ . Alors

$$\tau_n = \begin{cases} n\mu & \text{si } 0 \leq n < r \\ r\tau & \text{si } r \leq n. \end{cases}$$

Les expressions explicites pour les valeurs de la distribution stationnaire des états,  $\pi_n$ , peuvent être calculées en analysant ce processus de naissance et de mort. Les résultats pour ce modèle sont rapportés par Gross et Harris [8].

Soit  $\pi_n$  la probabilité stationnaire qu'il y ait  $n$  unités défaillantes. Le pourcentage de demandes qui peuvent être retirées du stock disponible de rechange en un point aléatoire du temps est:

$$\sum_{n=0}^{s-1} \pi_n$$

Cependant, et comme les auteurs l'ont indiqué, la disponibilité devra être définie en termes de probabilité de

défaillance,  $q_n$ , qui est la probabilité conditionnelle stationnaire qu'il y ait  $n$  unités en réparation sachant qu'une défaillance est sur le point de survenir. En utilisant la règle de Bayes, on obtient:

$$q_n = \begin{cases} M\pi_n / [M - \sum_{j=S}^{S+M} (j-S)\pi_j] , & 0 \leq n < S, \\ (M-n+S)\pi_n / [M - \sum_{j=S}^{S+M} (j-S)\pi_j] , & S \leq n \leq S+M, \end{cases}$$

La contrainte de service ("fill rate constraint") devient alors:

$$\sum_{n=0}^{S-1} q_n \geq \text{Disponibilité désirée.}$$

Il ne reste plus qu'à déterminer le niveau minimal de stock de rechange,  $S$ , tel que cette contrainte soit vérifiée.

Une extension du modèle classique MRM, qui tient compte du cas où il y a plusieurs stades dans la phase de réparation, a été traitée par Gross et Ince[9]. Leur modèle est un cas spécial des systèmes de files d'attente cycliques consistant en  $K$  stades avec le stade  $i$  ayant  $c_i$  serveurs en parallèle, et chacun d'eux ayant une durée de service exponentielle de taux  $\tau_i$ . Il y a au total  $N$  clients identiques dans le système qui sont servis suivant la discipline FIFO. Le premier stade correspond aux unités opérationnelles qui tombent en panne avec un taux  $\mu_1$ . Les stades 2 jusqu'à  $K$  correspondent aux différents canaux de réparation tel qu'il devrait être pour un article composé de sous-ensembles, chacun d'eux devant être inspecté et, si nécessaire, réparé séparément. Puis ils déterminent, pour

l'état stationnaire, le nombre de canaux de réparation à chaque stade de réparation et le nombre total de clients (machines) dans le système qui permettent d'atteindre un niveau de disponibilité fixé. Dans ce modèle, les auteurs ne considèrent pas des stocks de rechange des sous-ensembles et composants.

Les modèles de files d'attente présentent de nombreux avantages sur les autres modèles de gestion des stocks. L'avantage le plus marquant est qu'ils ne nécessitent pas l'hypothèse d'une infinité de serveurs dans l'atelier de réparation. De plus, la dépendance du taux de défaillance avec l'état du système est prise en compte. Cependant, ils ont eux aussi leurs limites. En particulier, l'hypothèse sur la nature (exponentielle) des distributions des temps de bon fonctionnement et des durées de service, est dans la pratique irréaliste. De plus l'hypothèse de stationnarité du modèle est aussi sujette au problème d'application pratique. Dans le monde réel, un grand nombre de facteurs dynamiques sont présents. De plus, si le modèle est utilisé pour déterminer le budget nécessaire sur un horizon fini de 4 à 5 ans, l'hypothèse de stationnarité du modèle devra être reconnue comme une limite significative à l'application pratique de ces modèles.

#### 6- Modèles de GSAR utilisant la simulation:

Pour pallier aux inconvénients cités auparavant, certains chercheurs se sont tournés vers une technique, dont le problème de files d'attente a été un des principaux domaines d'investigations, à savoir la simulation.

Qu'est que la simulation? "A mi-chemin entre les méthodes analytiques exactes et les méthodes heuristiques, qui représentent des solutions purement intuitives à des problèmes particuliers, la simulation est de plus en plus utilisée comme outil de résolution de problèmes

pratiques." [10]

La simulation est en général appliquée:

- \* comme outil d'analyse extrêmement poussé de l'évolution d'un quelconque phénomène au cours du temps, de ses caractéristiques, voire de ses capacités de réaction à un effet donné, et
- \* comme outil d'évaluation, de comparaison et finalement de prise de décision au vu d'un certain nombre d'alternatives au problème posé.

La simulation est peut être à l'heure actuelle, un des outils d'investigation les plus efficaces, compte tenu du caractère extrêmement dynamique et aléatoire des phénomènes réels.

Ainsi, l'intérêt de la simulation, relativement à toute autre formulation mathématique, est évident.

Un des travaux qu'il nous a été possible de consulter et qui traite des systèmes de files d'attente cycliques avec la technique de simulation, est celui de W.H.Haussman et G.D.Scudder [11]. Ils ont utilisé un modèle de simulation pour examiner différentes règles de priorité. Leur objectif consistait à déterminer la meilleure combinaison de règles de priorité dans la programmation des réparations pour un atelier de capacité finie desservant un système de stock réparable avec une structure de produits hiérarchique. Le produit en question est un moteur d'avion.

Ils considèrent, dans leur modèle, une compagnie aérienne disposant d'une flotte importante et d'une base de maintenance unique. Dans cette étude, les niveaux des stocks de rechange et les capacités de réparation sont maintenus constants, et seul l'effet des règles de programmation des réparations des composants sur la disponibilité des avions est étudié.

Ce modèle présente beaucoup de similitudes avec le système

que nous étudions, à part que:

\* la réparation des composants ne se fait pas au niveau de l'atelier mais elle est sous-traitée,

\* vu la grande taille de la flotte (donc un grand nombre de moteurs) ils supposent le taux de demande constant, alors que ceci n'est pas le cas d'AH, et

\* si l'objectif est le même, les moyens diffèrent. En effet, eux, partant de niveaux de stocks de rechange fixes, essayent de jouer sur les disciplines des files d'attente au niveau des machines à l'atelier de réparation pour améliorer la disponibilité des avions. Alors que, pour notre part, nous essayerons de déterminer les niveaux de stock des moteurs, sous-ensembles et composants qui permettraient d'atteindre une disponibilité donnée.

#### 7- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principaux travaux ayant traité le problème de la gestion des stocks réparables.

Le type de système analysé est celui dans lequel une politique d'approvisionnement à revue continue ( $S - 1, S$ ) est utilisée. Ainsi, à chaque fois qu'un article tombe en panne, un ordre est immédiatement lancé pour une unité identique de cet article, et l'article défaillant est immédiatement expédié à l'atelier de réparation (i.e., le regroupement des articles pour réparation n'est pas économique).

Le modèle METRIC de Sherbrooke fournit un traitement analytique important du problème de niveaux de stocks de rechange optimaux. Son modèle détermine les niveaux de stocks de rechange optimaux pour un système consistant en une base centrale de réparation avec différents dépôts de support. Sa fonction objective est la minimisation des "backorders" des moteurs et des composants.

Ultérieurement, Muckstadt a noté que seuls les "backorders" pour les moteurs affectaient la disponibilité

de l'avion. La formulation de Muckstadt (MOD-METRIC) minimise les "backorders" des moteurs sous la contrainte budgétaire qui devrait être allouée aussi bien aux moteurs qu'aux sous-ensembles et composants de rechange.

Le modèle A<sub>0</sub> Optimal s'est, lui aussi, intéressé au problème de niveaux de stocks de rechange optimaux, mais Clark considère pour fonction objective la disponibilité d'un moteur opérationnel, qui est défini comme étant la fraction du temps moyen durant laquelle l'avion est opérationnel ou bien prêt à l'être. Cet objectif est identique au taux de service ("fill rate", qu'on a défini au début de ce chapitre) donc sujet aux mêmes critiques.

Les hypothèses suivantes sont faites dans ces modèles:

- \* les demandes sont générées par un processus de Poisson de taux constant et indépendant de l'état du système.

- \* les temps de réparation pour tous les articles sont indépendants (i.e., il n'y a pas d'attente avant que l'article soit réparé).

Pour une flotte de petite taille et un atelier de capacités limitées, ces hypothèses ne reflètent pas la réalité du système.

Un autre ensemble de modèles, appelées "Machine Repair Models", peut modéliser les files dans l'atelier. Ces modèles supposent qu'il y a  $M$  machines opérationnelles (moteurs),  $s$  rechanges identiques, et  $r \geq 1$  serveurs en parallèle dans les stations de réparation. Quand une défaillance survient, elle rejoint la file pour réparation, et une rechange disponible la remplace immédiatement.

Utilisant des variantes de ce modèle et supposant que les temps de réparations sont exponentielles, plusieurs chercheurs ont examiné le problème de la détermination du nombre de moteurs de rechange et les canaux de réparation nécessaires au système pour opérer à un niveau de service donné. Cependant, ces modèles ne peuvent être utilisés dans cette étude pour les raisons citées auparavant.

En dernier lieu, nous avons opté pour la technique de

simulation qui nous paraît être la plus adaptée à notre problème.

Au chapitre suivant, nous donnons un aperçu sur le concept de la simulation, son cadre méthodologique, ainsi qu'une présentation succincte du langage de simulation utilisé (SLAM II).

CHAPITRE IIIIntroduction à la Simulation et à SLAM II

( les références principales pour ce chapitre sont :

Introduction to Simulation and SLAM II [12]

Techniques quantitatives de gestion [13]

P.F.E de Toumi et Seghouani [10] )

Parallèlement aux méthodes analytiques de traitement des problèmes, s'est créée depuis les années soixantes, toute une gamme de techniques relevant d'une conception tout à fait différente: il s'agit de la simulation.

Les techniques analytiques reposent sur la construction d'un modèle mathématique qui, par utilisation d'une technique d'optimisation donnée (dérivation d'une fonction de coût dans les cas de stocks, algorithme du simplexe pour la programmation linéaire, etc.), permet de déterminer la meilleure solution.

Dans de nombreux cas, le problème de gestion à traiter sera beaucoup trop complexe pour pouvoir donner lieu à l'élaboration d'un modèle d'optimisation réaliste, c'est à dire qui ne mutile pas trop la réalité pour la faire entrer dans un schéma donné. Ceci est plus particulièrement vrai quand le problème étudié met en jeu des phénomènes dynamiques et des situations d'incertitude.

La simulation exploite une seconde voie de traitement de ces problèmes: la voie *expérimentale*. Au lieu de chercher à appliquer des techniques d'optimisation, l'idée sera d'essayer différentes stratégies. L'expérimentation peut, dans certains cas, être réalisée en dimension réelle: on citera l'exemple des marchés tests dans le domaine du

marketing. Mais en matière de gestion, l'expérimentation en dimension réelle est le plus souvent une technique impossible et de toute façon très coûteuse. La simulation consiste à expérimenter les différents cas possibles (scenariis) non pas sur le monde réel ( le système ), mais sur une représentation de ce monde, sur un modèle.

L'utilisation d'une technique de simulation ne garantit évidemment pas la découverte de la meilleure solution. Et là nous trouvons une deuxième façon de caractériser la simulation, qui se base beaucoup plus sur la *notion de résultat satisfaisant* que sur celle de résultat optimal.

Si elle ne garantit pas l'obtention d'une solution optimale, la simulation présente néanmoins l'avantage de pouvoir embrasser beaucoup plus d'éléments qu'une technique analytique donnée. Une technique analytique se concentre, en général, sur un problème précis, clairement délimité, détaché de son environnement et donc supposé n'avoir aucune interaction avec lui. La simulation, au contraire, sera un outil idéal d'analyse des systèmes qui permettrait de mieux cerner le problème, et ainsi de le définir et de le formuler correctement.

Insistons encore sur le fait que la simulation n'optimise pas, mais cherche avant tout à atteindre des résultats satisfaisants, respectant des objectifs préétablis.

La section 1 de ce chapitre sera consacrée à l'approfondissement du concept de simulation. La deuxième section présentera le cadre méthodologique de la simulation. La dernière section sera consacrée à la présentation des outils de simulation du langage SLAM.

1- Le concept de simulation:

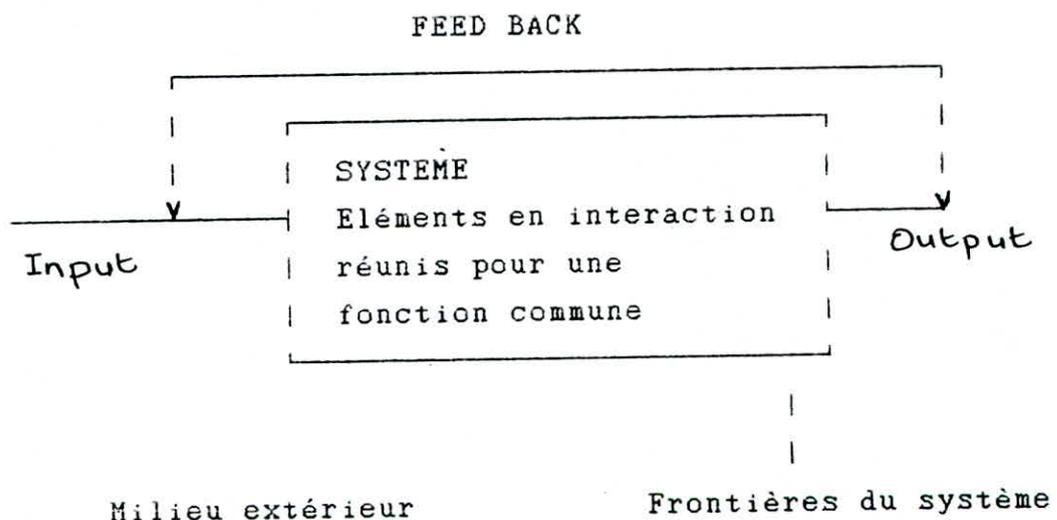
Dans sa conception la plus répandue, la simulation fait référence à l'emploi d'un *modèle* pour représenter au cours du temps, c'est à dire dans une perspective dynamique, les caractéristiques essentielles d'un *système* ou d'un *processus*.

1-1- Le système:

Schmidt et Taylor [14] voient le système comme étant un ensemble d'objets (appelés éléments, composants ou entités) en interaction, autrement dit liés par un certain nombre de relations, et qui sont réunis pour l'accomplissement d'une fonction bien définie. Selon que le système soit ouvert ou fermé, ses éléments sont en relation ou non avec le milieu extérieur ou environnement du système.

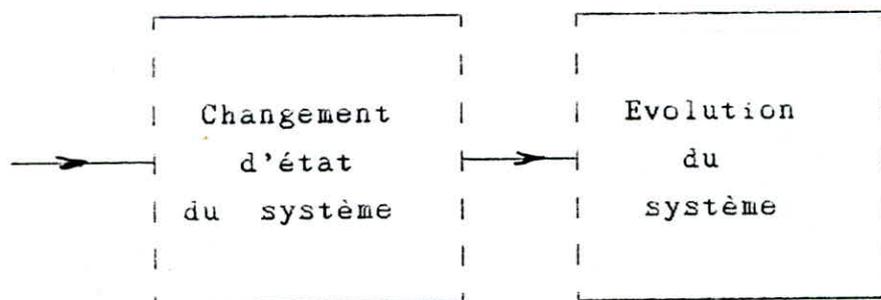
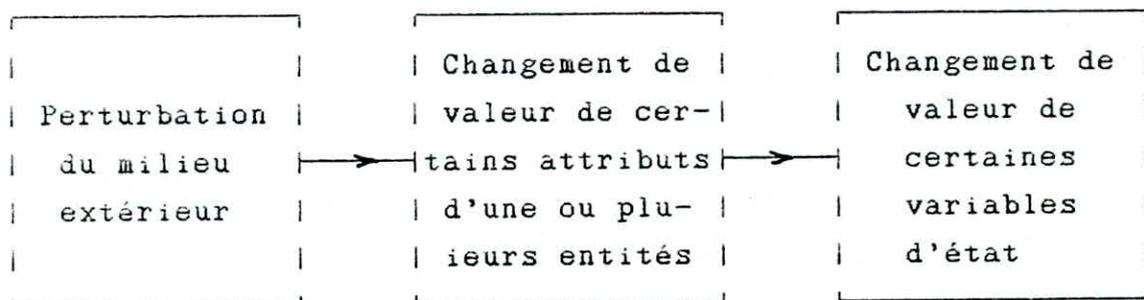
Quand on précise que le système est un ensemble identifiable, on pose explicitement la question des *frontières du système* qui le délimitent de son milieu extérieur.

La notion de système peut être schématisée comme suit:



Tout système évolue dans un environnement donné qui constitue son milieu extérieur. Cet environnement agit sur le système et provoque des *changements d'état de celui-ci*, l'état d'un système étant décrit par un certain nombre de paramètres appelés *variables d'état*.

Chaque entité dans le système possède un certain nombre de spécifications appelées *attributs*. Ces attributs peuvent être fixes ou variables (évoluant au cours du temps). L'ensemble des valeurs prises par les attributs d'une entité constitue l'état de l'entité à cet instant; l'ensemble des états de toutes les entités du système à ce même instant constitue l'état du système. De ces notions, découle la logique de changement d'état du système qu'on résume en général comme suit:



1-2- Le modèle:

Comme nous l'avons déjà noté, un modèle est une représentation dans une perspective dynamique des caractéristiques essentielles d'un système ou d'un processus. La nature du modèle qui est utilisé peut être très variée. Dans les premières applications de la simulation, il pouvait s'agir d'un *modèle physique* représentant le système étudié à l'aide d'une maquette: on citera par exemple les tests en souffleries de modèles réduits d'avions ou de voitures. Cette méthode, très employée dans les domaines scientifiques et techniques, n'est pas concevable en matière de gestion. La simulation recourt également à des *modèles analogiques*. Dans ce cas, pour représenter un certain système, on utilise un système physique auquel il est assimilable et sur lequel il est possible de procéder à des expérimentations. C'est cependant avec la simulation sur ordinateur que les applications à la gestion se sont développées.

Dans ce cas, le système étudié est matérialisé par un *modèle mathématique* se présentant sous la forme d'une succession de relations, le plus souvent très simples, décrivant les différents éléments du système. La complexité du système ne se traduit pas par la complexité de la formulation mathématique, mais par le nombre de ces relations élémentaires intégrées dans le modèle.

1-3- Processus de modélisation:

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le modèle constitue le lien entre le système étudié et la technique de simulation. Il est par conséquent facile de saisir l'importance que revêt la construction du modèle en simulation. Ce processus de modélisation est extrêmement complexe.

Les principaux facteurs qui font que cette tâche soit

extrêmement ardue sont :

\* le fait que certains composants du système soient difficiles à interpréter et que leurs attributs ne sont pas toujours quantifiables,

\* la saisie de certains comportements aléatoires du système, qui présentent un haut degré de variabilité, est souvent difficile,

\* l'interprétation de certains facteurs régis par l'élément humain où le subjectif prime sur le rationnel est particulièrement ardue.

\* la détermination des facteurs extérieurs qui affectent par leur variation le comportement du système (identification des inputs et des outputs) n'est pas toujours évidente.

Dans tous les cas, le concepteur fait appel à sa perspicacité pour établir les deux paramètres fondamentaux qui prédéterminent une bonne modélisation, à savoir :

\* une bonne définition du système en identifiant ses frontières de la manière la plus appropriée,

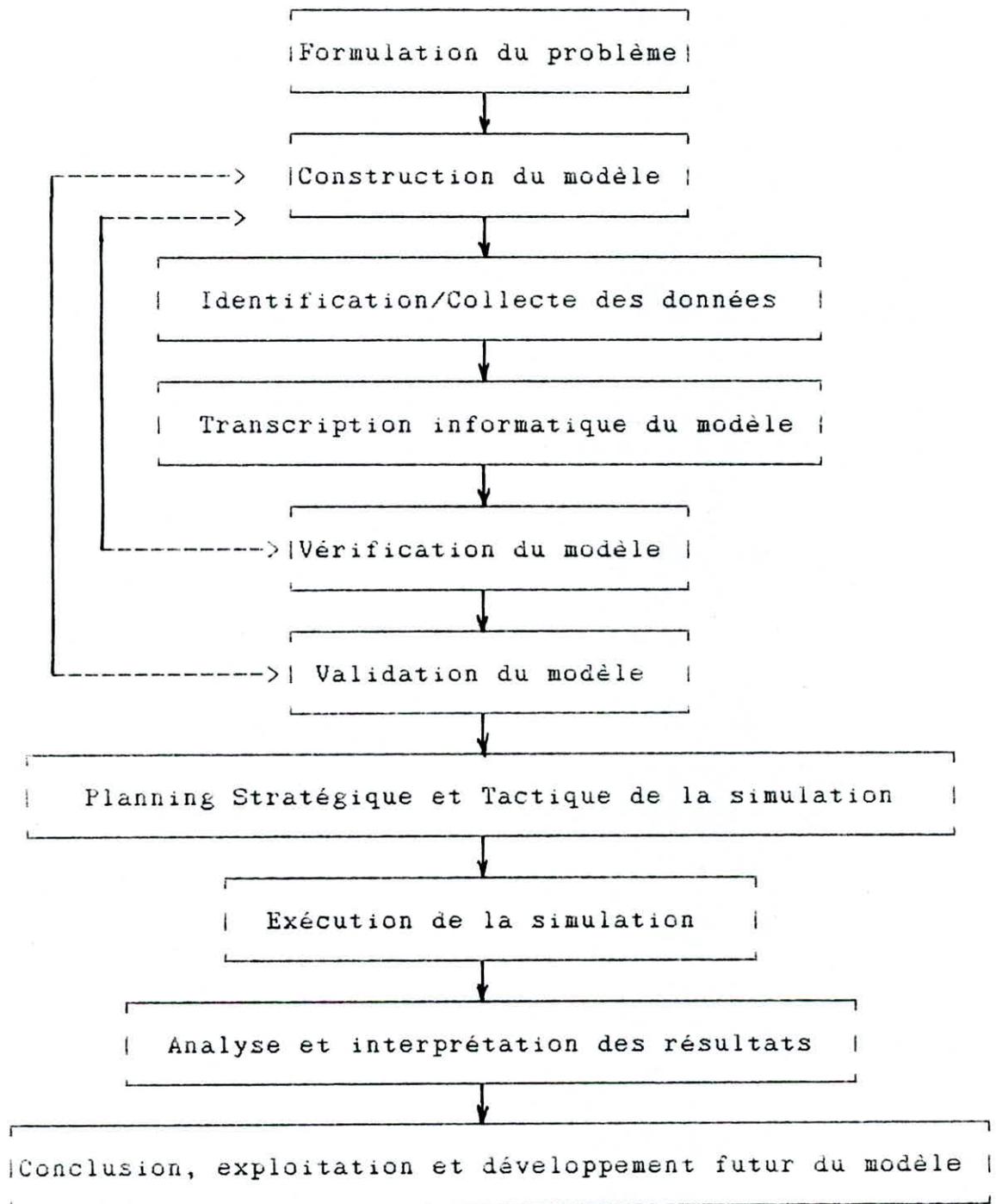
\* un bon choix du niveau de détail à inclure dans le modèle, autrement dit savoir quels sont :

- les aspects du problème à prendre en considération dans le modèle et ceux à négliger.
- les interactions à prendre en compte.
- les variables sur lesquelles se base la logique de changement d'état du système.

Le tout évidemment dans le cadre des objectifs assignés à l'étude et leurs spécificités.

## 2- Le cadre méthodologique de la simulation :

L'approche méthodologique de la simulation va s'articuler autour d'une démarche comportant dix étapes essentielles consignées sur l'organigramme suivant :



#### Etape 1. Formulation du problème

Le concepteur se doit de définir et d'identifier le problème en toute clarté. Il s'agit donc de bien définir les frontières du système, ses éléments et leurs attributs, les composants de l'input et de l'output.

## Etape 2. Construction du modèle

L'étape de modélisation visant à une représentation abstraite du système constitue une tâche ardue et déterminante dans laquelle le concepteur se doit de refléter le système réel avec le plus de fidélité, d'analyser sa structure, son fonctionnement et les règles gouvernant son évolution. Il sera donc confronté à la prise de décisions cruciales concernant les hypothèses, les éléments et les interactions à prendre en considération, le tout en gardant un degré de complexité en rapport avec le but de l'étude.

Pour cela, le concepteur peut procéder de deux manières différentes afin d'aboutir à un modèle fidèle au système réel:

- 1- la première possibilité consiste à démarrer d'un modèle simplifié et grossier pour l'améliorer et le perfectionner au fur et à mesure jusqu'à aboutir au modèle final qui représentera au mieux le système étudié.
- 2- la seconde possibilité consiste quant à elle à segmenter le système en sous-systèmes, les modéliser indépendamment pour les combiner et aboutir ainsi au modèle final.

Il n'existe pas de règles préétablies pour décider de la meilleure alternative. Par conséquent le choix est laissé au concepteur qui saura identifier la nature du système: système susceptible d'être décomposé en sous-systèmes indépendants ou bien système dont les éléments sont étroitement liés pour permettre une décomposition.

## Etape 3. Identification et collecte des données

Une fois les deux étapes précédentes abordées, il s'agira de passer à l'identification précise des données d'entrées que nécessitent le modèle, puis de collecter ces données et de les ajuster, éventuellement, à des distributions de probabilités connues en faisant appel à des tests d'adéquations. Cette phase d'identification, de collecte et d'ajustement des données d'input est primordiale en simulation, car des données d'entrées erronées peuvent

conduire à des résultats n'ayant aucune commune mesure avec le système réel.

#### Etape 4. Transcription informatique du modèle

Au cours de cette étape, le concepteur s'attèlera à transcrire le modèle sous forme exploitable par l'ordinateur.

#### Etape 5. Vérification du modèle

Cette étape constitue le premier banc d'essai du modèle élaboré. Il s'agit d'évaluer les performances du modèle en vérifiant si sa transcription informatique correspond bien au modèle. La tâche du concepteur sera de déceler d'éventuelles aberrations dans le modèle et de vérifier si la logique du système est conservée.

#### Etape 6. Validation du modèle

Cette étape complète la précédente en ce sens qu'elle consiste elle aussi à évaluer les performances du modèle, mais cette fois-ci sur sa capacité à bien refléter le système qu'il est sensé décrire. Ainsi, valider, c'est s'assurer de l'efficacité du modèle et des résultats qui en découleront.

#### Etape 7. Planning stratégique et tactique de la simulation

Il s'agit au cours de cette étape, de recourir à des techniques statistiques qui permettront par la suite d'analyser, d'interpréter et d'utiliser les résultats obtenus par la simulation. Ces techniques sont consignées sous la forme d'un planning stratégique et tactique.

##### \* Le planning stratégique

Elaborer ce planning consiste à développer un plan d'expérience basé sur la combinaison optimale des valeurs des variables dites de contrôle de la simulation: à savoir le nombre d'exécutions, la durée de chaque exécution et un certain nombre d'autres paramètres, le tout afin de maximiser l'efficacité de la simulation.

##### \* Le planning tactique

Ce planning concerne un aspect important de la simulation: la détermination des conditions initiales de la simulation.

Choix des conditions initiales: le concepteur dispose de trois alternatives:

- 1- démarrer la simulation à partir d'un modèle vide,
- 2- démarrer la simulation à partir de l'occurrence de l'évènement le plus probable, ou
- 3- démarrer la simulation après une longue période d'exécution, c'est à dire une fois le modèle ait atteint un état stationnaire lorsque celui-ci existe. Il s'agira alors de spécifier à partir de quel instant la collecte des résultats de la simulation doit commencer.

#### Etape 8. Exécution de la simulation

Compte tenu des plannings précédents, il s'agira d'effectuer plusieurs exécutions et de recueillir les résultats obtenus.

#### Etape 9. Analyse des OUTPUTS - Interprétation des résultats

Il s'agit, dans cette étape, de calculer et de réduire l'intervalle de confiance de chaque estimateur de performance.

Cette étape reste particulièrement délicate, surtout lorsqu'il s'agit, par exemple, de mesurer l'impact de plusieurs décisions pour éclairer le décideur.

#### Etape 10 Finalisation de l'étude

Une fois la fiabilité des résultats prouvée, le concepteur pourra interpréter les résultats, faire ses recommandations au décideur et évaluer les perspectives d'exploitation du modèle pour d'autres préoccupations.

Remarque: comme nous venons de le voir, ces étapes qui constituent le cadre méthodologique de la simulation sont loin d'être cloisonnées et indépendantes. Bien au contraire, les retours en arrière et les anticipations sont d'une telle fréquence que la simulation devient une technique laborieuse, de longue haleine et demande une très grande disponibilité.

### 3- Le langage SLAM II:

Cette section sera consacrée à une présentation générale du langage et de ses concepts de base dans la simulation par réseau.

#### 3-1- Présentation générale du langage:

SLAM est l'acronyme de "Simulation Language of Alternative Modeling". Ce langage a été développé par Alain B. Pritsker en 1978 aux USA.

SLAM permet de simuler aussi bien les systèmes discrets que les systèmes continus, de même que les systèmes combinant des changements d'état discrets et continus.

#### A\ La modélisation des systèmes discrets par SLAM II:

Pour modéliser les systèmes discrets, SLAM offre trois alternatives conceptuelles de modélisation:

- la modélisation par processus,
- la modélisation par événement, et
- la modélisation combinée.

#### 1- La modélisation par processus:

Le système sera modélisé par un réseau (Network) appelé réseau SLAM. Les éléments dynamiques du système sont représentés par des entités circulant à travers ce réseau. Ces entités sont caractérisés par un vecteur qui conserve tous leurs attributs.

Le réseau SLAM: il est constitué par un ensemble de symboles qui représentent les opérations du système étudié. Le concepteur dispose de 22 symboles appelées noeuds (Node) ou branches (Branches).

## 2- La modélisation par évènement:

Lorsque le concepteur opte pour une la modélisation par évènement (si le modèle est trop complexe pour une approche par processus), il doit veiller à bien définir les évènements et leur impact sur le changement d'état du système. Les relations logiques décrivant les changements d'état initiés par chaque type d'évènement, sont traduits par le concepteur en sous-programmes FORTRAN. Parallèlement, SLAM met à la disposition de l'utilisateur un certain nombre de sous-programmes standards pour la programmation des évènements, la manipulation des files, la collecte des statistiques, ainsi que la génération des échantillons des lois de distribution usuelles. De plus, SLAM assure l'échéancier des évènements et provoque leur occurrence à chaque instruction CALL. La modélisation devient beaucoup plus ardue qu'une modélisation par réseau, mais elle est plus flexible, en revanche.

## 3- La modélisation combinée:

Afin d'améliorer la rigidité imposée par le réseau SLAM et pour une utilisation plus efficace des outils offert par le langage au concepteur, il est possible de faire appel à des sous-programmes FORTRAN dans le réseau pour affiner la modélisation. L'utilisateur pourra ainsi provoquer des évènements particuliers, procéder à des allocations de ressources suivant des règles plus complexes et tendre ainsi à refléter au mieux la réalité du système.

## B\ La modélisation des systèmes continus par SLAM:

Un modèle continu est codifié en SLAM sous forme d'équations différentielles qui décrivent le comportement dynamique des variables d'état. Ces équations sont transcrites en langage FORTRAN en employant certains concepts propres à SLAM.

3-2- Les outils de la modélisation par processus:

Du fait que l'approche qui sera utilisée par la suite est une approche par processus, nous allons présenter succinctement certains éléments de base de cette modélisation qui seront nécessaires par la suite.

Comme nous l'avons vu précédemment, un réseau consiste en un ensemble de noeuds qui sont reliées par des branches. Avant de présenter les symboles de base de SLAM, certains éclaircissements sur la logique de cheminement des entités en général sont nécessaires. Le cheminement des entités suit normalement l'orientation des branches indiqués sur le réseau. Les labels des noeuds sont utilisés pour indiquer certains cheminements particulier des entités. Ils sont déclarés d'une façon similaire à la déclaration des labels en FORTRAN.

En général, les branches représentent des activités, mais dans certaines situations, on désire avoir un cheminement des entités entre deux noeuds sans qu'il y'ait activité. De tels transferts sont représentés sur le réseau par des branches sans spécifications ou par des lignes discontinues. Aucune déclaration n'est nécessaire dans la transcription informatique du modèle pour décrire ce type de connections.

Les entités sont cheminées("routed") le long des branches emanants des noeuds. le maximum de branches,  $M$ , peut être spécifié en indiquant la valeur de  $M$ . La valeur par défaut de  $M$  est l'infini. Quand  $M$  est égal à 1, au plus un branchement est possible. Si des probabilités sont assignées aux branches emanants d'un noeud qui a  $M = 1$ , alors le noeud a un branchement probabilistique. Si aucunes conditions ou probabilités ne sont précisées pour les branches, et  $M$  égal le nombre de braches emanant de ce noeud alors un branchement déterministe est spécifiée. Un branchement déterministe résulte par un dédoublement et une orientation de l'entité le long de toutes les branches emanant du noeud.

3-2-1- Eléments de base de la modélisation par réseau:

Il y a dix éléments de base dans le réseau SLAM II. Ces éléments sont: CREATE node, TERMINATE node, QUEUE node, ASSIGN node, ACTIVITY branches, GOON node, COLCT node, FREE node, AWAIT node et l'ALTER node. Avec ces éléments de base, beaucoup de modèles de réseau peuvent être construits.

Ces différents outils permettent d'effectuer la plupart des opérations propres à la simulation:

- \* gestion des entités (création, destruction, mise à jour des attributs);
- \* gestion des ressources (allocation, restitution, modification de la capacité, ...);
- \* gestion des activités (activités de service, activité de branchement conditionnelle ou probabilistique, ...);
- \* gestion des files d'attente pour activité ou ressource;
- \* collecte des statistiques dans le système, etc...

Les principales fonctions seront explicitées en annexe [SLAM].

Le lecteur intéressé trouvera un complément utile, voire nécessaire, dans le manuel de référence de SLAM [12].

3-3- La structure du programme SLAM:

Le programme SLAM est composé d'un programme principal et de programmes périphériques.

Le programme principal: Il va essentiellement organiser l'espace mémoire disponible (Matrice NSET/QSET de dimension 16000 \* 16000), répartir cet espace entre les différents composants du système tels que les files, les instructions du programme, les variables et les résultats statistiques de la simulation. Le logiciel possède déjà les instructions du programme principal et la matrice NSET/QSET est prédimensionnée. Ainsi le concepteur n'aura qu'à transcrire les programmes périphériques.

Les programmes périphériques: Ces programmes peuvent être:

- un réseau SLAM,
- un ensemble de sous-programmes FORTRAN, ou
- une combinaison des deux.

Programme principale, sous-programmes (subroutines) et fonctions (functions) sont écrits en FORTRAN. Le lien entre ces différentes unités et le réseau SLAM se fait par l'intermédiaire des variables communes (bloc COMMON) et des librairies de routines FORTRAN de SLAM.

Le lecteur intéressé trouvera de plus amples détails dans le manuel d'utilisation du logiciel SLAM [...], pp 3-3 à 3-6.

CHAPITRE IVELABORATION DES MODELES DE SIMULATION

Le problème qui nous a été posé, et tel qu'il a été formulé par les responsables d'AIR-ALGERIE, est d'élaborer un modèle implémenté sur micro-ordinateur permettant de déterminer les niveaux de stock de moteurs et de modules de rechange nécessaires pour assurer une disponibilité souhaitée. Ce modèle pourra être étendu à tout élément dit critique.

Dans le chapitre revue de la littérature, nous avons vu que les chercheurs utilisent deux mesures d'efficacité qui sont le "fill rate" et le "time weighted backorders per unit time". L'application de ces deux mesures à notre problème, en supposant que AH dispose de M avions dans sa flotte, se traduit par:

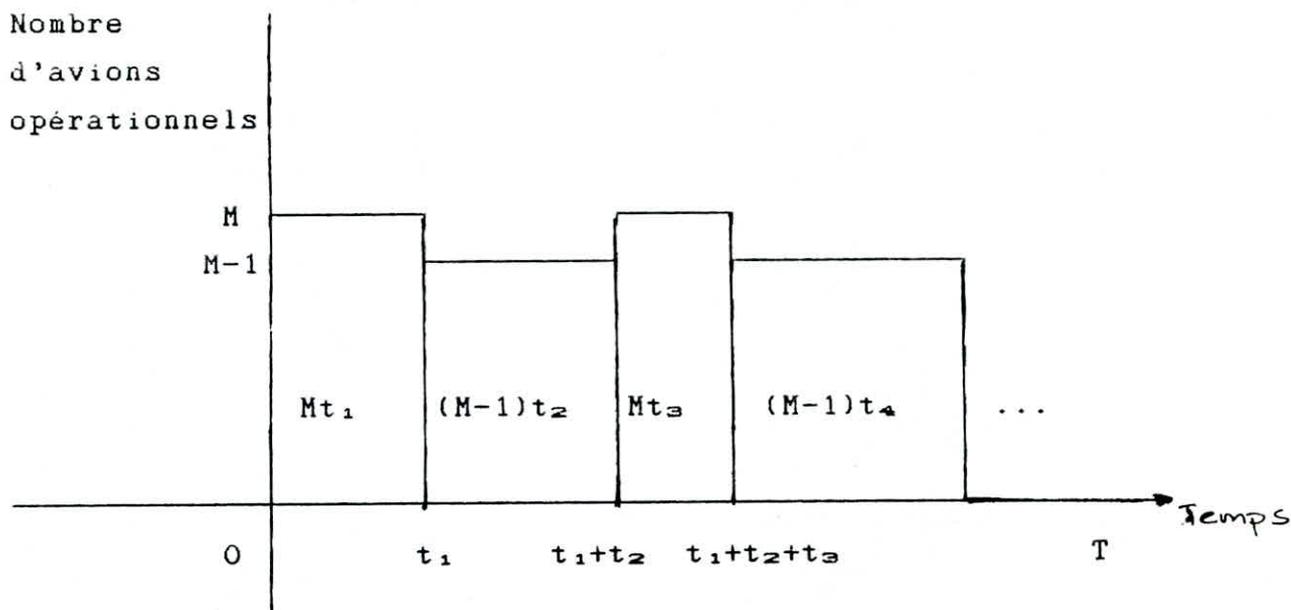
$$\text{Fill rate} = 1 - P_{out}$$

où  $P_{out}$  est la probabilité qu'il y ait moins de M avions opérationnels à un instant donné, qui pourrait être interprétée comme la fraction du temps durant lequel on a moins de M avions opérationnels sur le temps total.

Cette mesure ne nous donne pas d'informations sur le nombre moyen d'avions qui sont disponibles, en fait, elle est sujette aux mêmes critiques faites précédemment. Pour ces raisons, nous allons utiliser comme mesure de la

disponibilité la moyenne pondérée par le temps du nombre d'avions opérationnels sur le nombre d'avions M.

Cette mesure est illustrée par la figure suivante:



La disponibilité sera donc définie comme suit:

$$\text{Disponibilité} = \left[ \sum_{i=1}^n M_i t_i / T \right] / M$$

où  $M_i$  est le nombre d'avions opérationnels durant  $t_i$ , et

$$n = N(T), \text{ i.e., } \sum_{i=1}^n t_i \leq T \text{ et } \sum_{i=1}^{n+1} t_i > T$$

Comme mentionné auparavant, la flotte d'AH est hétérogène. En effet, elle est composée de B-727 et B-737 équipés des moteurs de Pratt & Withney, les JT8D, d'Airbus et de B-767 équipés de moteurs de General Electric, les CF6. Ces deux types de moteurs sont de conceptions différentes et leurs cheminements respectifs à travers la base de

maintenance sont indépendants; de plus, chaque type de moteurs dispose de ses propres équipements et personnels de maintenance.

Toutes ces raisons nous ont amené à diviser le problème en deux sous-problèmes indépendants. Le premier sera destiné au traitement des avions équipés de CF6 et le second pour les avions équipés de JT8D.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons calculer les niveaux de stock de rechange pour les Airbus et B-767 de telle sorte que la disponibilité fixée soit atteinte. La deuxième partie sera destinée au traitement du même problème pour les B-727 et B-737.

I- TRAITEMENT DES A-310 et B-767:

Nous avons vu que dans le cadre méthodologique de la simulation, il est primordial de bien définir le système étudié et que le niveau de détail à inclure dans cette description doit être fonction des objectifs de l'étude. Comme préambule à la modélisation, nous allons donc décrire le système.

I-1- Description du système:

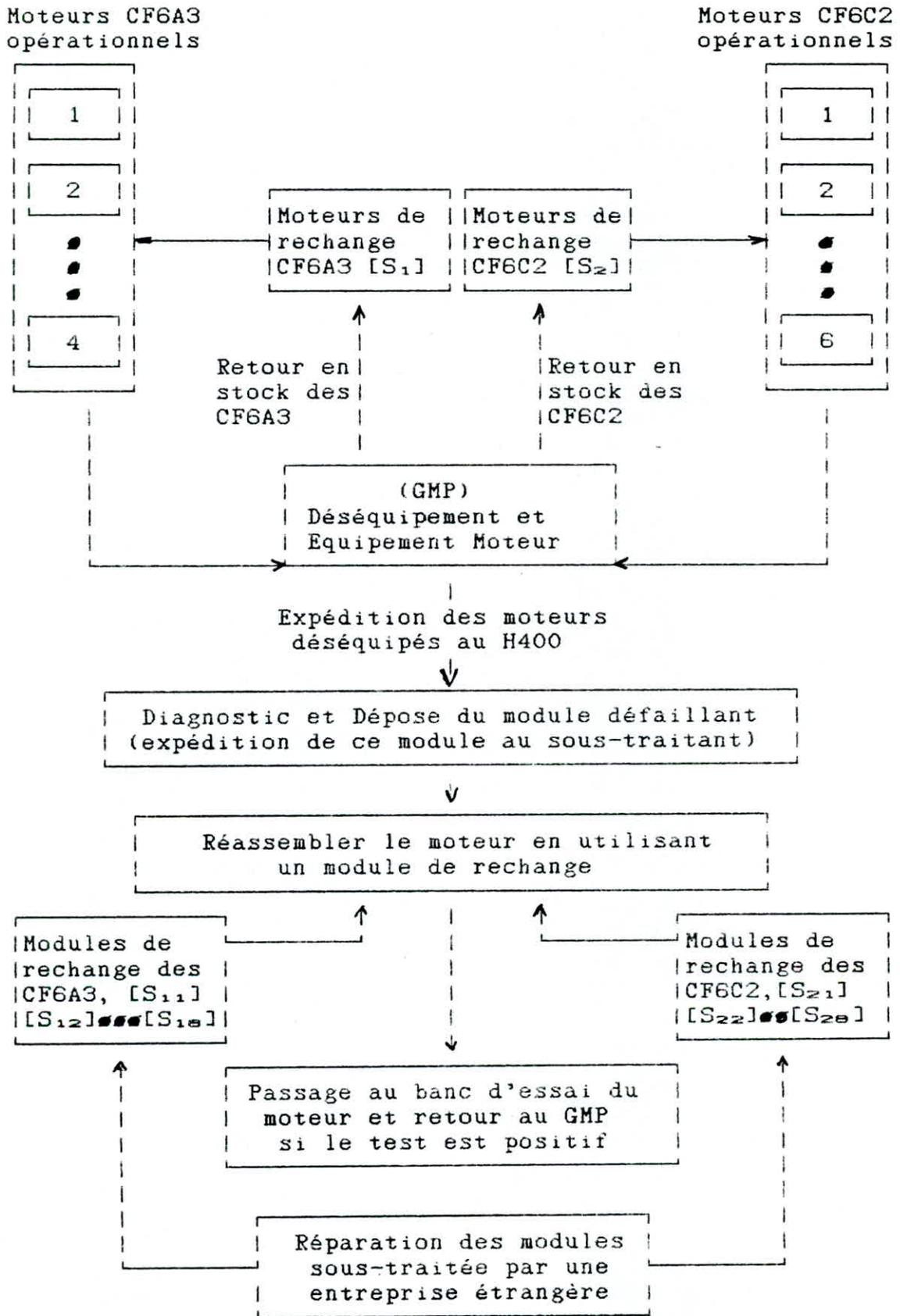
AIR-ALGERIE dispose de deux Airbus et de trois Boeing 767 qui sont utilisés pour le transport de passagers sur certaines lignes de son réseau. Ces avions ont un taux moyen d'utilisation de cinq heures de vol par jour.

Un Airbus est équipé de deux moteurs CF680A3, alors qu'un B-767 est équipé de deux moteurs CF680C2. Ces deux types de moteurs sont incompatibles entre eux (i.e., ils ne sont pas interchangeables).

Lorsqu'un avion tombe en panne pour cause de disfonctionnement moteur, et si cette panne survient dans une escale autre que DAR-EL-BEIDA (aéroport Houari Boumedién), l'avion est ramené à vide (sans passagers à bord) avec un seul moteur aidé par l'unité auxiliaire de puissance, l'APU.

A DAR-EL-BEIDA, un diagnostic sous l'aile est effectué sur le moteur défaillant, lequel est éventuellement déposé. Ces tâches de la maintenance en ligne durent une journée.

Après la dépose, si un moteur de rechange identique est disponible, il est immédiatement remonté sur l'avion; l'activité repose-contrôle dure une journée. Sinon l'avion devra attendre jusqu'à ce qu'un moteur de rechange soit disponible. Cette durée d'attente augmentée des durées nécessaires à la dépose du moteur défaillant et à la repose de sa rechange constitue la durée d'immobilisation de l'avion. Nous avons représenté le système par le schéma suivant:



Représentation schématique du système

Comme il est mentionné sur le schéma, le moteur défaillant est envoyé à l'atelier Groupe Moteurs Propulseurs (GMP) où est effectué le déséquipement du QEC. Notons qu'il y a une file d'attente à l'entrée de cet atelier et que l'opération de déséquipement dure en moyenne deux jours.

Après déséquipement, le moteur est acheminé vers le H400 où il attend l'opération de diagnostic.

Une fois dans le H400, le moteur subira un diagnostic poussé qui déterminera par la suite le ou les modules qui sont défaillants. Les modules qui constituent un moteur CF6 sont :

- \* FAN,
- \* High Pressure Compressor (HPC),
- \* Compressor Rear Frame (CRF),
- \* Combustor Chambre (CC),
- \* High Pressure Turbine (HPT),
- \* Low Pressure Turbine (LPT),
- \* Turbine Rear Frame (TRF), et
- \* Gear-Box (GRB).

Les modules composant les moteurs CF680A3 et les moteurs CF680C2 sont incompatibles.

Si un module de rechange identique à celui déposé est disponible, il est remonté sur le moteur qui subira par la suite un ensemble d'opérations de maintenance. Il existe une file d'attente à ce niveau aussi. Ces opérations durent en moyenne 47 jours.

Entre-temps, le ou les modules défaillants sont expédiés vers un sous-traitant pour réparation. La durée de réparation est fixée par contrat, et est fonction du type de module. Notons qu'il y a une durée additionnelle due au transit, l'aller et le retour du module (les responsables d'AH ont estimé cette durée à 15 jours en moyenne).

Finalement, le moteur est acheminé au banc d'essai pour le test final qui dure en moyenne sept jours. A la fin de ce test, le moteur peut être jugé fiable ou non. Dans le premier cas, il est renvoyé au GMP où il est rééquipé de son QEC, opération qui dure en moyenne trois jours, après quoi le moteur est envoyé en stock où il devient de nouveau disponible pour utilisation. Dans le cas où le test du banc d'essai s'avère négatif, le moteur devra subir de nouveau le même processus et ce au niveau du H400.

Un autre point devrait être pris en considération car susceptible d'influer sur l'objectif assigné: c'est celui de la maintenance avion. En effet, lors d'une grande visite(GV) ou d'une visite de vieillissement(VV), l'avion est dépossédé de ses moteurs qui deviennent alors disponibles, au niveau des stocks moteurs de rechange, pour utilisation. Une fois ces opérations de maintenance terminées, l'avion émet une demande de deux moteurs au niveau du stock des moteurs de rechange. Le délai de réception de cette demande sera comptabilisé comme une indisponibilité de l'avion. Nous n'avons pas comptabilisé la durée de la GV ou de la VV comme une indisponibilité de l'avion à cause du fait que nous nous intéressons seulement à la disponibilité de l'avion en fonction des moteurs et modules de rechange.

Comme nous l'avons déjà signaler, les moteurs qui équipent les Airbus(CF680A3) et les B-767(CF680C2), mêmes s'ils sont tous de conception modulaire et conçus par le même constructeur(General Electric), sont incompatibles. Nous aurions pu traiter ces deux types de moteurs indépendamment l'un de l'autre, si ce n'est le fait qu'ils passent par le même processus de réparation après leurs déposes(puisqu'ils ont les mêmes équipements et personnels de maintenance).

Cette description n'est pas vraiment détaillée, nous avons pensé qu'il vaudrait mieux apporter, au fur et à

mesure que le processus de modélisation progresse et dès que le besoin s'en fera sentir, les détails que nous jugerons nécessaires. Ainsi, nous n'aurons pas à nous répéter.

#### 1-2- Processus de modélisation:

Nous allons présenter dans cette section, le modèle de simulation que nous avons conçu et qui permettra:

i- La détermination sur une base de temps donnée du:

- a) nombre total moyen de déposes moteurs CF680A3;
- b) nombre total moyen de déposes moteurs CF680C2;
- c) nombre total moyen de modules changés par module réparé pour les deux types de moteurs.

ii- L'évaluation du nombre moyen de moteurs de rechange de chaque type en fonction d'un niveau de disponibilité fixé.

iii- L'évaluation du nombre moyen de modules de rechange de chaque type et pour chaque type de moteurs en fonction d'un niveau de disponibilité fixé.

Les hypothèses générales que nous avons considérées sont:

1- Chaque type de moteurs a son propre taux de défaillance exprimé en défaillance par 1000 heures de vol.

2- Le taux d'arrivées des moteurs CF680A3 à l'atelier est dynamique: il sera égal au nombre d'Airbus opérationnels à un instant donné multiplié par deux multiplié par le taux de défaillance de ce moteur. Il en est de même pour les moteurs CF680C2.

3- Le disfonctionnement d'un moteur est causé par

un et un seul module. Ainsi chaque type de module devra avoir sa propre probabilité conditionnelle de défaillance. Cette hypothèse est proche de la réalité parce que les cas où le dysfonctionnement du moteur est causé par plus d'un module sont rares. Notons que cette hypothèse a été acceptée par les responsables d'AH.

4- Tout moteur ou module réparé doit être remis immédiatement en stock.

5- Tout avion qui doit subir une VV ou une GV se verra déposséder de ses moteurs, qui seront alors supposés disponibles comme rechange.

6- Il y a autant de QEC que de moteurs.

7- Nous ne prendrons pas en compte les déposes programmées pour changement de pièces à vie limitée (PVL). Le fait que ces PVL aient une très grande durée de vie (15 à 20.000 heures de vol), et l'entrée récente en opération de ce type de moteurs justifie cette hypothèse.

#### I-2-1- Considérations de base:

Dans notre cas, le système représente les ateliers de maintenance (GMP, H400, banc d'essai). Les composantes principales de ce système sont les stocks de rechange (ressources) et les moteurs défaillants.

Nous avons quatre types d'entités qui peuvent circuler dans le système. Ces entités sont:

- 1) moteur CF6A3 défaillant,
- 2) moteur CF6C2 défaillant,
- 3) avion subissant une grande visite (GV), et
- 4) avion subissant une visite de vieillissement (VV).

Ces entités vont être caractérisées par un certain nombre d'attributs (Date d'entrée en atelier, type de moteurs, type d'avion, etc...). Partant de cette définition, nous pouvons définir un événement comme étant l'arrivée ou

le départ d'une entité, par exemple, le début ou la fin de réparation d'un moteur, ou encore tout ce qui altère l'état du système (affecter la valeur d'une variable, libérer des ressources, etc...).

Deux évènements successifs sont séparés par une activité; les activités dans lesquelles vont s'engager les entités seront de deux types:

- a) les activités correspondantes aux divers opérations de maintenance (dépose, diagnostic, déséquipement, etc...), et
- b) les activités qui orientent l'entité, par exemple, selon le type de module à changer.

Une séquence d'évènements ou d'activités qui définit le cheminement d'une entité constituera un processus.

#### I-2-2- Logique de changement d'état du système:

L'état du système est défini par les variables d'état correspondantes au nombre de moteurs défectueux et au niveau des stocks de rechange.

La logique de changement d'état du système va être gouvernée par:

- \* l'arrivée d'un moteur défectueux,
- \* la libération d'une ressource moteur après réparation,
- \* une demande pour le module qui est requis pour la réparation du moteur défectueux,
- \* la libération d'une ressource module (retour du module de chez le sous-traitant),
- \* l'arrivée d'un avion pour GV ou VV, et
- \* la récupération d'un avion de ses moteurs, suite à une GV ou VV.

Ce changement d'état se fait en des instants discrets et aléatoires entraînant une évolution par saut du système. Ainsi, le type de simulation à adopter est une simulation stochastique discrète.

### I-2-3- Le cadre conceptuel de la simulation:

Comme mentionné précédemment, la modélisation d'un système discret peut se faire selon les trois visions universelles que sont:

- la vision par événement,
- la vision par processus, et
- la vision combinée.

Du fait que tous les cheminements suivis par les entités peuvent être modélisés par un processus, nous avons opté pour une vision par processus.

Notre première préoccupation a donc été la construction du réseau SLAM correspondant au système à simuler. La construction du réseau s'est faite de façon progressive. En fait, nous avons commencé par élaborer un réseau simplifié, puis à augmenter au fur et à mesure le niveau de détail jusqu'à obtenir une représentation finale du système étudié.

### I-2-4- Modélisation du système:

Comme explicité auparavant, nous avons opté pour un processus progressif de modélisation. L'aperçu descriptif de notre démarche passe par la présentation des modèles suivants:

#### Premier modèle:

Ce modèle a été élaboré dans deux optiques:

- \* Apprendre à manier les outils de modélisation offerts par le langage SLAM, à transcrire le réseau et à manier le logiciel.
- \* Faire une première ébauche de représentation du système. Ce modèle nous a fourni une plateforme de travail qui par perfectionnements successifs nous a menés au réseau final.

Caractéristiques du modèle:

- \* Le modèle est bien entendu déterministe, car les temps entre créations des entités et les durées de service sont constants.
- \* Une seul type d'entité a été considéré: le moteur CF6A3 défaillant.
- \* Deux ressources ont été définies: les CF6A3 et un module quelconque.
- \* Toutes les activités de branchements sont déterministes.
- \* 6 activités de service ont été considérées:
  - dépose du moteur,
  - déséquipement du moteur,
  - diagnostic et dépose du module,
  - repose d'un module de rechange,
  - rééquipement du moteur, et
  - repose d'un moteur de rechange sur l'avion.
- \* 2 "Await nodes" ont été représentés:
  - un noeud d'attente pour la ressource CF6A3, et
  - un noeud d'attente pour la ressource module.
- \* Après passage de l'entité par l'activité de dépose moteur, elle est dédoublée au niveau du "Go-On node": la première entité suivra le cheminement à travers l'atelier et la deuxième, représentant l'avion, sera acheminée vers le noeud d'attente pour la ressource moteur.

Bien entendu, beaucoup d'aspects ont été négligés dans ce modèle.

Ce modèle a subi des améliorations successives visant à approcher le plus possible le système étudié. Nous avons développé un grand nombre de modèles intermédiaires, mais nous nous limiterons à décrire les trois plus importants changements apportés au modèle initial.

#### Premier modèle intermédiaire:

Dans ce modèle, nous avons introduit toutes les

ressources (modules de rechange) avec toutes les activités et tous les branchements probabilistiques qui en découlent.

Deuxième modèle intermédiaire:

A ce niveau, nous avons utilisé un sous-programme FORTRAN qui nous permettait d'avoir un TBC variable en fonction du nombre de moteurs opérationnels. Les durées des activités ne sont plus constantes mais aléatoires. De plus, nous avons modélisé le passage du moteur par le banc d'essai.

Troisième modèle intermédiaire:

Dans ce modèle, nous avons modélisé l'entrée des avions en GV et VV. Nous avons aussi introduit des files d'attente au niveau de chaque activité de service.

Considérant que la maintenance des deux types de moteurs était indépendante, nous avons conçu pour chaque type de moteur son réseau et le programme correspondant. Les deux réseaux sont presque identiques, si ce n'est certaines différences de forme.

Les caractéristiques de ce réseau sont:

1) Noeuds de création.

\* Un noeud de création de l'entité CF6A3 défaillant avec un TBC égal à  $USERF(1)$ , où  $USERF(1)$  est une valeur échantillonnée à partir d'une distribution exponentielle de paramètre égal au taux de défaillance moteur multiplié par le nombre de moteurs opérationnels (le nombre de moteurs opérationnels étant égal au nombre d'avions opérationnels multiplié par deux). Cette fonction est traduite par un sous-programme FORTRAN.

\* Un noeud de création des arrivées d'Airbus pour subir une VV avec un TBC égal à  $USERF(2)$ , où  $USERF(2)$  prend ses valeurs dans la première colonne, qui est triée par ordre croissant, d'une matrice où sont stockées les dates des prochaines VV. Cette matrice est remise à jour à chaque fois qu'une VV est créée.

\* Un noeud de création des arrivées d'Airbus pour subir une GV avec un TBC égal à USERF(3), où USERF(3) prend ses valeurs dans la deuxième colonne de la matrice précédente.

2) Ressources: ont été définies. Elles sont explicitées dans le tableau ci-dessous.

Ressource	Capacité	Ressource	Capacité
CF6A3	Variable	HPT	Variable
FAN	//	LPT	//
HPC	//	TRF	//
CRF	//	GRB	//
CC	//		

3) Activités: sont au nombre de 25 (en excluant les activités de branchement).

N°	TYPE d'activité	NATURE de l'activité	LOI ou DUREE de l'activité
01	Dépose moteur	Déterministe	1 journée
02	Déséquipement QEC	//	2 jours
03	Dépose FAN	//	2 jours
04	Dépose HPC	//	2 jours
05	Dépose CRF	//	2 jours
06	Dépose CC	//	2 jours
07	Dépose HPT	//	2 jours
08	Dépose LPT	//	2 jours
09	Dépose TRF	//	2 jours
10	Dépose GRB	//	2 jours

11	Repair FAN	Aléatoire	TRIAG(25.2,28,36.4)
12	Repair HPC	Aléatoire	TRIAG(31.6,34,44.2)
13	Repair CRF	Aléatoire	TRIAG(46.8,52,67.6)
14	Repair CC	Aléatoire	TRIAG(24.3,27,35.1)
15	Repair HPT	Aléatoire	TRIAG(36,40,52)
16	Repair LPT	Aléatoire	TRIAG(36,40,52)
17	Repair TRF	Aléatoire	TRIAG(22.5,25,32.5)
18	Repair GRB	Aléatoire	TRIAG(22.5,25,32.5)
19	Repair Moteur	Aléatoire	TRIAG(42.3,47,61.1)
20	Banc d'essai	Aléatoire	TRIAG(6.3,7,9.1)
21	Equip QEC	Déterministe	3 jours
22	VV	Aléatoire	TRIAG(40.5,45,58.5)
23	Essai_Avion_VV	Aléatoire	TRIAG(13.5,15,19.5)
24	GV	Aléatoire	TRIAG(108,120,156)
25	Essai_Avion_GV	Aléatoire	TRIAG(54,60,78)

Nous avons considéré que certaines durées de service sont constantes du fait que leurs variations sont relativement faibles. En ce qui concerne les durées aléatoires, nous justifierons leur distribution un peu plus loin.

4) Files: Le réseau dispose de 18 files d'attentes dont:

- \* 9 noeuds "AWAIT" pour les différentes ressources,
- et
- \* 9 noeuds "QUEUE".

5) Priorités: Nous avons utilisé une seule priorité au niveau de la file d'attente pour les moteurs de rechange (un avion demandant un moteur est prioritaire sur un avion terminant une VV ou une GV) en demandant deux).

6) Variables: Nous avons utilisé 11 variables qui sont définies comme suit:

- \* deux variables basées sur le temps "timest variables":

XX(1) = nombre d'avions opérationnels à un instant donné,  
XX(2) = nombre de moteurs défectueux à un instant donné.

\* neuf variables basées sur les observations:

XX(3) = nombre de moteurs déposés,  
XX(4) = nombre de FAN déposés,  
XX(5) = nombre d'HPC déposés,  
XX(6) = nombre de CRF déposées,  
XX(7) = nombre de CC déposées,  
XX(8) = nombre d'HPT déposées,  
XX(9) = nombre d'LPT déposées,  
XX(10) = nombre de TRF déposées, et  
XX(11) = nombre de GRB déposés.

Ceci étant les caractéristiques générales du réseau SLAM représentant le système dans le cas où la maintenance des deux types de moteurs (CF6A3 et CF6C2) est complètement indépendante. Mais comme déjà mentionné, ceci n'est pas le cas dans la réalité, ce qui nous amène au modèle final représentant réellement le système étudié.

#### Modèle final:

Nous avons introduit dans le réseau un quatrième noeud de création (pour les entités moteurs CF6C2 défectueux) avec un TBC égal à USERF(4) qui est similaire à USERF(1) décrite précédemment, ainsi que des variables identiques à celles définies, mais destinées au CF6C2. Nous avons utilisé un attribut qui spécifie la nature des entités (si c'est un CF6A3 ou un CF6C2). Nous avons aussi modélisé les branchements probabilistes propres au CF6C2 (les probabilités conditionnelles de défaillance des modules du CF6C2).

Ceci constitue les changements majeurs que nous avons apporté au modèle précédent. Le réseau ainsi que la transcription informatique associée sont en annexe [Modèle CF6].

### I-3- Transcription informatique du réseau:

Le réseau SLAM représentant notre modèle doit être transcrit en SLAM II. Il faut noter que tout symbole représenté sur le réseau se traduit par une instruction SLAM, l'ensemble de ces instructions étant délimité par les déclarations NETWORK et ENDNETWORK. Signalons de plus que la transcription du réseau seule n'est pas suffisante pour que le modèle soit exploitable sur ordinateur. En effet, le concepteur se doit de fixer un certain nombre de paramètres de contrôle de la simulation et cela en établissant des instructions d'input bien spécifiées (voir: "Introduction to simulation and SLAM II" par Alan B.Pritsker).

Conclusion: La procédure de modélisation du CF6A3 et DU CF6C2 a été effectuée de manière progressive et a nécessité un investissement considérable en temps. Ce n'est d'ailleurs qu'au prix de multiples transformations et remodelisations que nous avons pu enfin aboutir à une représentation suffisamment fidèle du système.

### I-4- Identification, collecte et ajustement des données d'input:

Sans données fiables, il est impossible de prétendre à une simulation réussie. Des données d'input biaisées peuvent entraîner des résultats erronés et une analyse de ces résultats totalement hors de propos.

#### I-4-1- Identification des données:

Cette phase est primordiale dans la collecte des données. Elle consiste à recenser tous les paramètres d'input à estimer. la liste exhaustive de ces paramètres est la suivante:

a) Distribution des défaillances moteurs:

Le problème consiste à trouver la distribution des temps de bon fonctionnement des moteurs CF6A3 et CF6C2 pour pouvoir modéliser les distributions des temps entre création des entités "CF6A3 défaillant" et "CF6C2 défaillant".

b) Distribution des durées de service:

Ce sont les durées de service concernant les opérations suivantes:

- \* réparation moteur,
- \* réparation des différents modules,
- \* visite de vieillissement de l'avion, et
- \* grande visite de l'avion.

c) Identification des différentes probabilités conditionnelles de défaillance des modules:

Ces probabilités concernent les différents types de panne du moteur et les cheminements correspondants. Dans notre modèle, nous avons supposé que le dysfonctionnement du moteur est dû à un seul module. Nous nous proposons de calculer la probabilité qu'une dépose moteur soit dû à un module donné.

I-4-2- Collecte et ajustement du TBF CF6A3 et du TBF CF6C2:

Les modèles que l'on peut établir en fiabilité se basent sur un échantillon de la population considérée. On fait l'hypothèse qu'ils suivent une loi particulière (loi log-normale, loi exponentielle, ...) dont il faudra ensuite vérifier la validité. Cette vérification est obtenue par un test d'adéquation. Pour cela, on admet dans l'utilisation des statistiques un risque alpha qui est le niveau de signification du test ou la probabilité de se tromper en utilisant ce test (le risque de première espèce).

Parmi ces tests d'adéquation, nous citons le test du Khi-deux et celui de Kolmogorov-Smirnov. Dans l'application

de ce dernier test aucune restriction n'est nécessaire concernant la taille de l'échantillon,  $n$ . Cependant, si  $n$  est trop grand, il est préférable de regrouper les valeurs en classes et d'utiliser le test du Khi-deux.

a) Test du Khi-deux:

Les  $n$  observations disponibles sont agrégées en  $r$  classes, avec  $r$  donné par la règle de Sturges :

$$r \geq 1 + 3.3 \log(n).$$

Ce test est basé sur l'écart entre les valeurs observées et le modèle théorique. Une fonction indicatrice des écarts est établie de la manière suivante:

$$E = \sum_{i=1}^r [(n_i - np_i)^2 / np_i]$$

où:

- $r$  = nombre de classes,
- $n_i$  = nombre d'individus de la classe  $i$ ,
- $n$  = nombre d'individus total dans l'échantillon, et
- $p_i$  = nombre d'individus attendus théoriquement dans la classe  $i$ .

$E$  suit approximativement une loi de Khi-deux à  $\mu$  degrés de liberté avec  $\mu = r - k - 1$ ,

$k$  étant le nombre de paramètres estimés pour le modèle théorique. Exemples:

loi exponentielle:  $k = 1$

loi normale :  $k = 2$

loi de Weibull :  $k = 3$

De ceci, on peut écrire:

$$P(E > \chi_{\mu, 1-\alpha}^2) = 1 - \alpha$$

si  $E > \chi_{\mu, 1-\alpha}^2$ , on rejette l'hypothèse selon laquelle le modèle théorique est bon.

b) ajustement des TBF du CF6A3 à une loi exponentielle:

\* Collecte des TBF: Ces temps sont relevés lors de chaque dépose de moteurs par les travailleurs du département propulsion/service réacteurs/section GE. Nous avons considéré toutes les données depuis l'entrée en service de ce type de moteurs (en 1984) jusqu'au 1/12/90. Le nombre d'observations est de 24.

\* Regroupement et agrégation:

$$r \geq 1 + 3.3 \log(24) = 5.55 \Rightarrow r = 6.$$

Nous obtenons les résultats suivants regroupés par classes:

TBF	$n_i$
0 - 1250	4
1250 - 2500	4
2500 - 3750	4
3750 - 5000	5
5000 - 6250	4
6250 - 7500	3

Nous faisons l'hypothèse d'une loi exponentielle de paramètre:

$$MTBF = \left( \sum_{i=1}^{24} TBF_i \right) / 24 = 3595,82 \text{ Heures vol}$$

$$\begin{aligned} \text{Taux de défaillance} &= 1/MTBF = 0.000278 \text{ déf/ H.V} \\ &= 0.00139 \text{ déf/jour.} \end{aligned}$$

puisque le moteur est opérationnel en moyenne cinq heures par jour.

Avec  $\alpha = 0.05$ ,

$$p_i = R(t_i) - R(t_{i+1}) \text{ et } R(t) = e^{-0.0002783t}$$

$$R(0) = 1$$

$$R(1250) = 0.706$$

$$R(2500) = 0.499$$

$$R(3750) = 0.353$$

$$R(5000) = 0.249$$

$$R(6250) = 0.180$$

$$R(7500) = 0.124$$

d'où

TBF	$n_i$	$p_i$	$np_i$	$n_i - np_i$
0 - 1250	4	0.294	7.050	- 3.050
1250 - 2500	4	0.207	4.968	- 0.968
2500 - 3750	4	0.146	3.504	0.496
3750 - 5000	5	0.104	2.496	2.504
5000 - 6250	4	0.069	1.656	2.344
6250 - 7500	3	0.056	1.344	1.656

le calcul de E et de  $\chi^2$  donne:

$$E = 9.455$$

$$\chi^2_{4,0.95} = 9.59$$

E  $< \chi^2_{4,0.95}$  l'hypothèse d'une loi exponentielle de la distribution exponentielle des TBF est acceptée.

Conclusion: Avec un risque de 0.05, l'hypothèse que le TBF du CF6A3 suit une loi exponentielle de taux (0.00139 déf/jour, MTBF=3595.82 heures) est acceptée.

c) Distribution des TBF du CF6C2:

L'entrée en service des trois B-767 s'est faite respectivement le 24/04/90, le 10/07/90 et le 02/12/90. Pour cette raison, Air-Algérie ne dispose pas d'historique des

TBF des moteurs CF6C2. Nous avons considéré alors le taux de défaillance contenu dans le rapport annuel des performances techniques (rapport publié par GE). Le taux qui est indiqué correspond à la moyenne pondérée par le nombre de moteurs, des taux de défaillances de toutes les compagnies aériennes à travers le monde.

Nous l'avons trouvé égal à 0.00111 déf/jour. Par analogie à la distribution des TBF CF6A3, nous avons supposé que les TBF des CF6C2 suivent une loi exponentielle de taux de défaillance 0.00111 déf/jour.

#### c) Distribution des durées des activités:

Du fait que le système étudié n'existe pas encore, aucune statistique sur les activités considérées n'est disponible. De ce fait, nous avons utilisé une procédure heuristique qui "est utilisée par beaucoup de praticiens de la simulation" [14] pour choisir une distribution de probabilité pour les activités.

On suppose que la durée de l'activité,  $X$ , est une variable aléatoire continue. La première étape de cette procédure est d'identifier un intervalle  $[a, b]$  ( $a$  et  $b$  étant des nombres réels tel que  $a < b$ ) dans lequel on est à peu près sûr de trouver  $X$  (i.e.,  $P(X < a \text{ ou } X > b) \approx 0$ ). Dans le but d'obtenir des estimations de  $a$  et  $b$ , les gens du métier sont questionnés sur leur estimation la plus optimiste et la plus pessimiste respectivement sur le temps nécessaire pour exécuter cette activité. Lorsqu'un intervalle a été identifié, l'étape suivante est de supposer que la variable aléatoire  $X$  suit une distribution triangulaire sur  $[a, b]$ . Pour déterminer le troisième paramètre de cette distribution, les experts sont questionnés une seconde fois sur leur estimation du temps moyen nécessaire pour accomplir l'activité. Cette estimation  $m$  sera considérée comme le mode de la distribution. Ainsi, ayant  $a$ ,  $b$  et  $m$ , la variable aléatoire  $X$  est considérée avoir une distribution triangulaire sur l'intervalle  $[a, b]$

avec un mode  $m$ .

De ce fait, nous avons considéré que les activités reportées sur le tableau de la page 88 (les activités aléatoires) suivent une distribution triangulaire.

Les paramètres de ces distributions ont été estimés comme suit:

les responsables d'AH nous ont donné le temps moyen nécessaire pour accomplir ces différentes activités. Ils estiment par ailleurs que la valeur optimiste ne dépasse pas en général 90% de la valeur moyenne, et que la valeur pessimiste ne dépasse pas en général 130% de la valeur moyenne (i.e.,  $a = 0.9*m$  et  $b = 1.3*m$ ). L'impact de cette estimation subjective sur les résultats de la simulation sera étudié dans la section validation du modèle.

Pour les autres activités, nous avons supposé, en accord avec les responsables d'AH, leurs durées comme constantes du fait que leurs variations étaient relativement faibles.

#### 3-4- Identification et calcul des différentes probabilités conditionnelles de défaillances:

Comme Air-Algérie ne dispose pas de suffisamment de données sur les causes de disfonctionnement des deux types de moteurs, nous avons dû considérer, là-encore, les statistiques publiées par General Electric sur l'état de ses moteurs à travers toutes les compagnies du monde disposant de ces types de moteurs.

Pour le CF6A3, sur 315 entrées moteurs en atelier:

- \* 25 sont dûes au FAN,
- \* 49 sont dûes au HPC,
- \* 8 sont dûes au CRF,
- \* 89 sont dûes à la CC,
- \* 120 sont dûes à la HPT,

- \* 10 sont dûes à la LPT,
- \* 7 sont dûes à la TRF, et
- \* 7 sont dûes au GRB,

Pour le CF6C2, sur 176 entrées moteurs en atelier:

- \* 16 sont dûes au FAN,
- \* 38 sont dûes au HPC,
- \* 1 est dûe au CRF,
- \* 7 sont dûes à la CC,
- \* 90 sont dûes à la HPT,
- \* 1 est dûe à la LPT,
- \* 6 sont dûes à la TRF, et
- \* 9 sont dûes au GRB,

Les probabilités conditionnelles de défaillance des modules sont consignées dans le tableau suivant:

MODULE	Probabilité cond. de déf. (CF6A3)	Probabilité cond. de déf. (CF6C2)
FAN	0.0794	0.0910
HPC	0.1555	0.2159
CRF	0.0254	0.0057
CC	0.2813	0.0398
HPT	0.3822	0.5568
LPT	0.0318	0.0057
TRF	0.0222	0.0340
GRB	0.0222	0.0511

Conclusion: La procédure d'ajustement des données est le premier jalon de l'étape de mise en oeuvre du modèle. Une fois cette étape terminée, il conviendrait de démontrer la validité de notre modèle. Cette démonstration fait l'objet de la prochaine section.

I-5- Vérification et validation du modèle:

Comme explicité dans le chapitre III, ces deux étapes vont nous permettre de statuer sur les performances de notre modèle du point de vue de sa capacité à refléter fidèlement le système qu'il est sensé décrire.

I-5-1- Vérification du modèle:

Il s'agit de détecter toutes les erreurs logiques (bugs) que comporterait notre transcription et les rectifier jusqu'à ce que cette dernière se comporte conformément à ce qui était prévu.

Pour mener à bien cette procédure de vérification, nous avons fait appel à deux techniques qui se sont avérées particulièrement efficaces.

a) première technique de vérification:

Dans une première étape, la description du système se fait en élaborant un modèle simplifié ne reflétant la réalité que d'une façon approximative. Ce modèle sera ensuite perfectionné jusqu'à obtenir un degré de complexité en rapport avec le système objet de l'étude. Dans notre étude, cette technique a été appliquée tout au long du processus de modélisation décrit auparavant (cf. IV-1-2).

Cette première technique a eu pour effet d'accroître notre vigilance car l'amélioration du modèle s'est faite étape par étape, ce qui nous a permis d'éliminer toute une série d'erreurs difficiles à détecter par la suite dans le modèle final.

b) deuxième technique de vérification:

Elle consiste à utiliser une "trace" et simuler le modèle. La trace permet de suivre la logique de changement d'état du système sur un intervalle de temps spécifié par l'utilisateur. Dès qu'un événement se produit, elle signale son occurrence et tous les changements que cette dernière

entraîne au niveau du système. Grâce à cette technique, la majorité des sources d'erreurs dans la logique de changement d'état du système peuvent être détectées pour être ensuite éliminées.

Le logiciel SLAM a facilité notre tâche car la trace est affichée sur simple demande (instruction MONTR avec option TRACE).

La consultation des experts en SLAM et personnes étrangères à l'étude, autre technique de vérification, nous a permis d'apporter d'autres corrections à notre modèle.

A l'issue de cette étape de vérification, nous pensons que notre modèle est assez représentatif du système étudié, mais ceci n'est pas suffisant. La phase cruciale de validation va renforcer cette confiance en notre modèle et convaincre, de même, le lecteur ainsi que les futurs utilisateurs (responsables d'AH) de sa crédibilité.

Notons qu'il existe un grand nombre de techniques de vérification mais qui ne peuvent être utilisées que sous certaines conditions (voir "Simulation modeling and analysis", pp 334-336 [14]).

#### 5-2- La validation du modèle:

La validation constitue le véritable banc d'essai du modèle. Sans validation, aucun modèle ne peut être déclaré conforme au système qu'il est sensé décrire. C'est dire le caractère crucial que constitue cette étape dans le processus global de simulation. La validation d'un modèle est extrêmement délicate et les recherches dans ce domaine sont assez récentes. Toutefois, certains spécialistes ont élaboré une approche de validation connue sous le nom "approche de Naylor et Finger". et reste la plus utilisée.

a) Considérations générales en validation:

Avant de passer au travail de validation effectué sur notre modèle, il conviendrait d'évoquer un certain nombre de considérations générales concernant cette étape[10]:

\* La validation permet de s'assurer que les impacts d'une décision prise au niveau du modèle sont identiques à ceux observables au niveau du système. Autrement dit, il s'agit de pouvoir affirmer que le modèle réagit de la même manière que le système et qu'observer le comportement du modèle équivaut à observer celui du système.

\* Il est totalement absurde de prétendre à une validité absolue du modèle car ce dernier reste toujours une représentation tronquée du système. Le concepteur se doit de développer un modèle qui se rapproche le plus possible du système.

\* Vu que tout modèle est développé dans des buts précis, il se doit d'être validé relativement à ces buts. Autrement dit, un modèle est valide pour certains objectifs d'étude, et non pour d'autres.

\* Un modèle de simulation est validé relativement à un ensemble spécifique de critères de performances du système. Ces derniers sont généralement ceux qui permettent de mesurer les impacts de toute prise de décision en rapport avec les objectifs de l'étude.

Dans notre cas les critères de validation sont:

- la disponibilité, et
- le nombre de dépose moteurs.

Nous n'avons pas considéré le nombre de modules de chaque type réparés à cause du fait qu'AH ne dispose pas d'un historique riche qui nous permettrait de faire une comparaison entre les résultats obtenus par la simulation et les résultats réels.

b) La phase qualitative de validation:

Elle correspond à la première phase de l'approche de Naylor et Finger. Il s'agit de s'assurer que le modèle développé est suffisamment représentatif aux yeux des

commanditaires de l'étude (Direction du H400). Cette phase a été menée parallèlement au processus de modélisation et nous a permis d'apporter, au fur des visites répétées à la direction du H400, beaucoup de corrections d'erreurs dues au fait de notre ignorance de certaines données techniques d'une part, et à une mauvaise assimilation du processus complexe de maintenance prévu au H400, d'autre part.

c) La première phase quantitative de validation:

Elle correspond à la deuxième phase de l'approche de Naylor et Finger et consiste à tester le bien fondé de toutes les hypothèses initiales de la modélisation. Ce test se fait suivant deux procédures.

- 1- l'ajustement des données d'input, et
- 2- l'analyse de sensibilité des résultats de la simulation concernant les paramètres d'entrées.

c1) L'ajustement des données d'input:

Cette étape a été développée précédemment (cf. IV-I-4).

c2) L'analyse de sensibilité:

Lors du processus de définition du système et de sa modélisation, le concepteur se doit de détecter les paramètres qui semblent être déterminants pour le système et par conséquent pour le modèle.

Un paramètre sera dit déterminant si une faible variation de sa valeur entraîne une forte variation au niveau des outputs.

En validation, l'analyse de sensibilité sur les paramètres du modèle intervient sous deux aspects:

\* vérifier si les paramètres jugés déterminants le sont effectivement, et

\* extraire un certain nombre d'informations sur les variables de contrôle du système, informations qui par la suite se révéleront capitales pour l'analyse du système et l'élaboration de diverses politiques décisionnelles.

Analyse de sensibilité sur les paramètres du modèles:

Cette technique consiste à faire varier les valeurs d'un ou plusieurs paramètres sur un intervalle donné et mesurer les performances correspondantes du système.

Les paramètres sur lesquels a porté l'analyse de sensibilité de notre modèle sont:

- \* taux de défaillance des CF6A3,
- \* taux de défaillance des CF6C2,
- \* le MTTR moteur,
- \* les MTTR des modules FAN, HPC, CC et HPT,
- \* les paramètres de la distribution des activités de réparation de ces quatre modules (on garde la même moyenne et on fait varier les bornes de l'intervalle [a, b]),
- \* la probabilité d'échec au banc d'essai moteur, et
- \* les niveaux de stocks de rechange (les ressources).

1) Analyse de sensibilité sur le MTBF CF6A3:

- Durée de simulation: 7500 jours,
- paramètre, Taux de défaillance du moteur CF6C3,
- valeur de référence:  $LAM1 = 139 E^{-5}$  def/jour,
- intervalle de variation:  $0.00080 \leq LAM1 \leq 0.00250$ , et
- aucune ressource disponible au H400.

Les variations d'output obtenues sont consignées dans le tableau 1 de l'annexe résultats. Notons que chaque résultat est la moyenne des résultats obtenus à partir de cinq exécutions indépendantes (issus d'un "seed" différent).

Comme on peut le voir sur la figure (1.a), le taux de défaillance, a une influence directe sur le nombre de moteurs réparés. Cette relation de proportionnalité est évidente. De même nous remarquons sur la figure (1.b) que la disponibilité des AIRBUS est inversement proportionnel au taux de défaillance. Cette relation est tout à fait logique car: du moment que les arrivées des moteurs défaillants sont de plus en plus fréquentes, ce qui entraîne de plus en plus d'immobilisations des AIRBUS d'où l'effet sur la disponibilité de ces derniers. Notons enfin qu'une diminution moyenne de 1% du taux de défaillance entraîne un

gain de disponibilité de l'ordre de 0.29% .

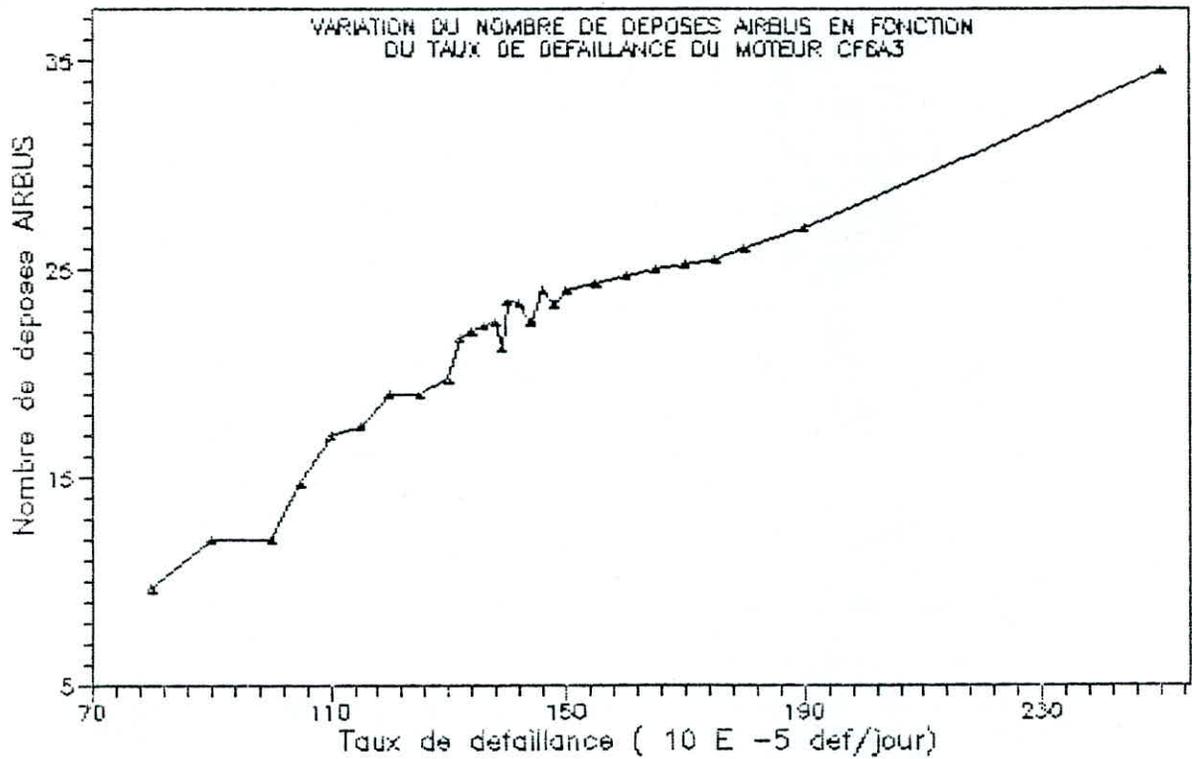


Figure 1.a

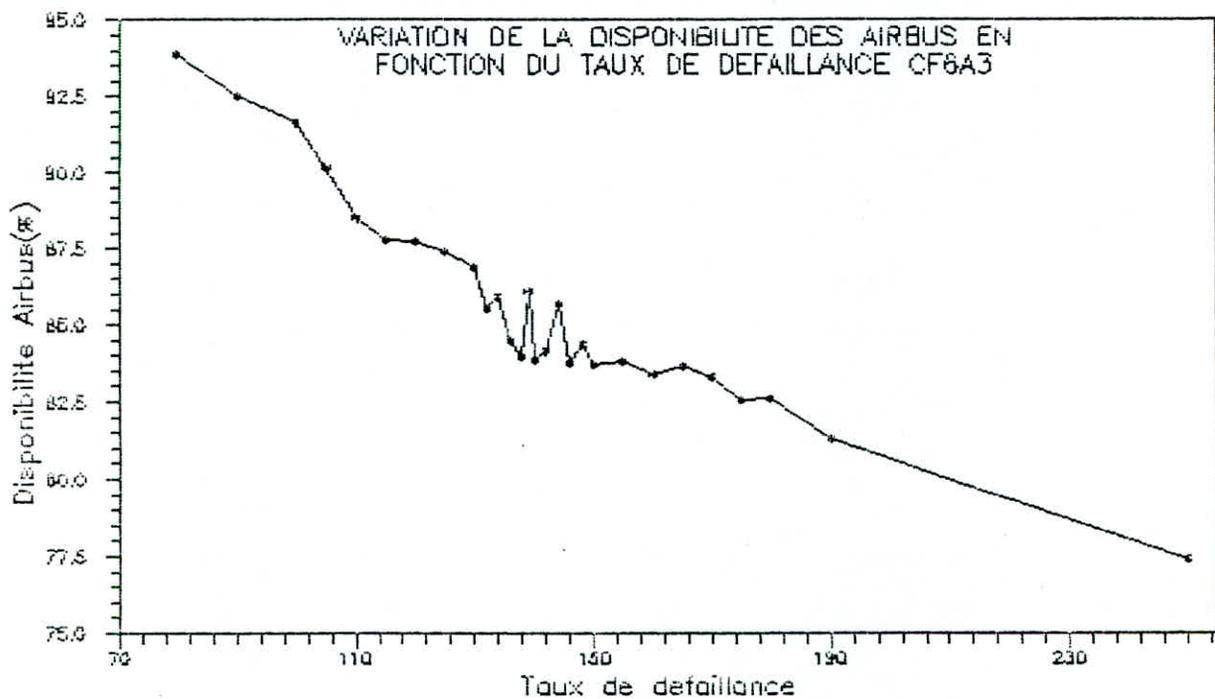


Figure 1.b

ii) Analyse de sensibilité sur le MTBF des CF6C2:

- Durée de simulation: 7500 jours,
- paramètre, Taux de défaillance du moteur CF6C2,
- valeur de référence: LAM1 = 111 E -5 def/jour,
- intervalle de variation:  $0.00076 \leq \text{LAM1} \leq 0.00201$ ,
- aucune ressource disponible au H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 2 (Annexe résultats).

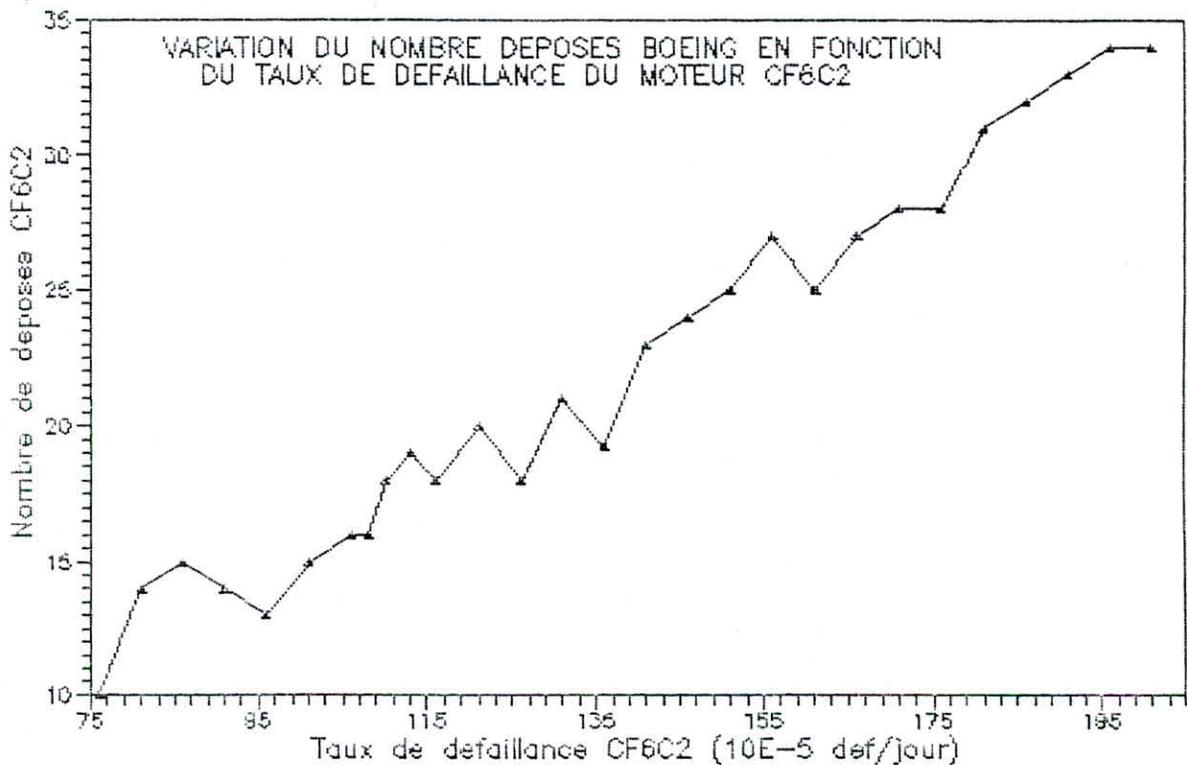


Figure 2.a

La même tendance est remarquée en ce qui concerne le nombre de moteurs déposés pour réparation (voir figure 2.a) et la disponibilité des Boeing (voir figure 2.b). Notons que cette dernière est relativement moins sensible à une variation du taux de défaillance vu le nombre plus élevé

d'avions de ce type (une diminution relative moyenne du taux de défaillance CF6C2 de 1% entraîne un gain moyen de l'ordre de 0.12% .

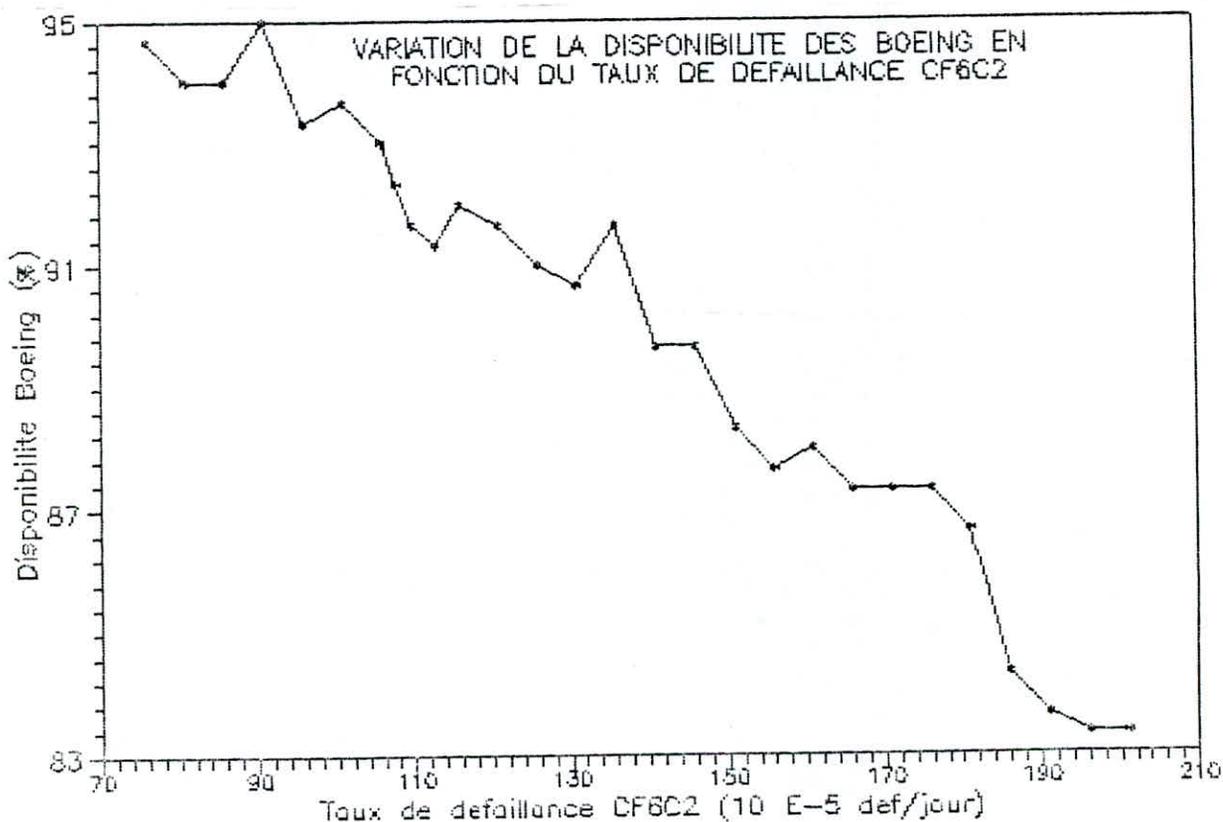


Figure 2.b

111) Analyse de sensibilité sur le MTTR moteur:

- Durée de simulation: 7500 jours,
- paramètre: durée moyenne de réparation moteur,
- valeur de référence: TAT\_MOY = 45 jours,
- intervalle de variation:  $30 \leq TAT\_MOY \leq 200$ , et
- aucune ressource disponible au H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 3 (Annexe résultats).

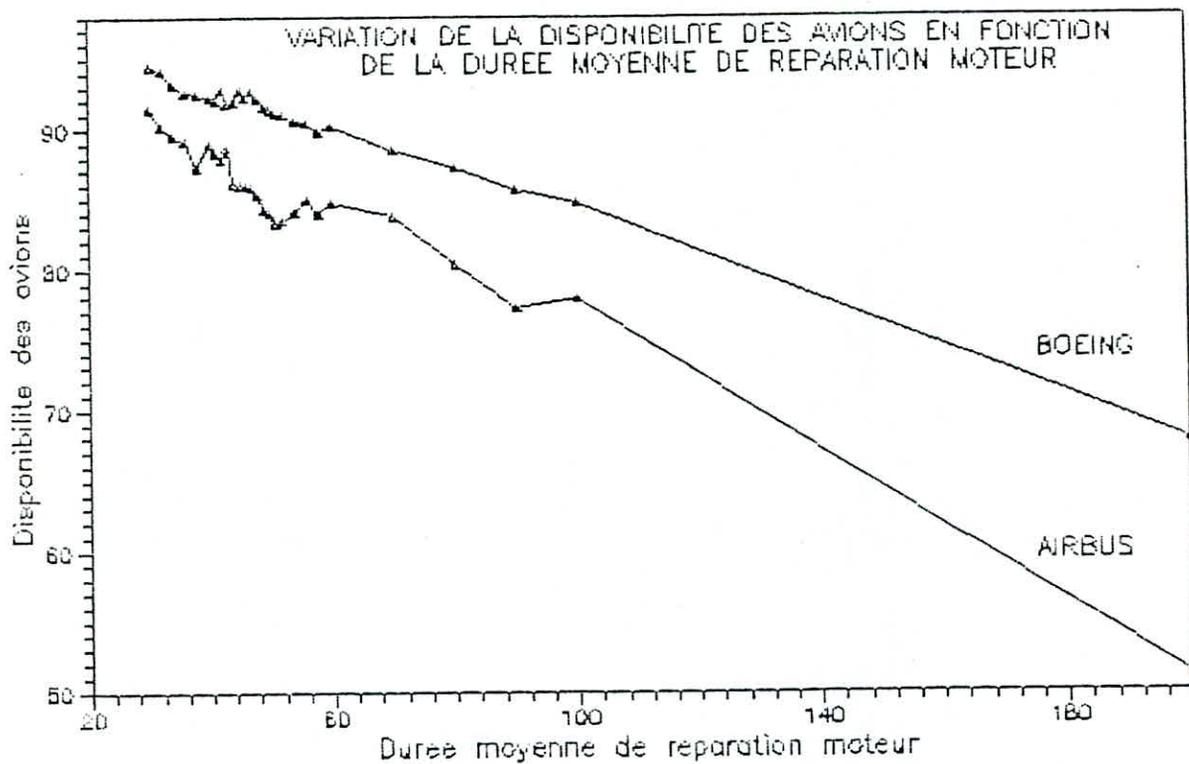


Figure 3.a

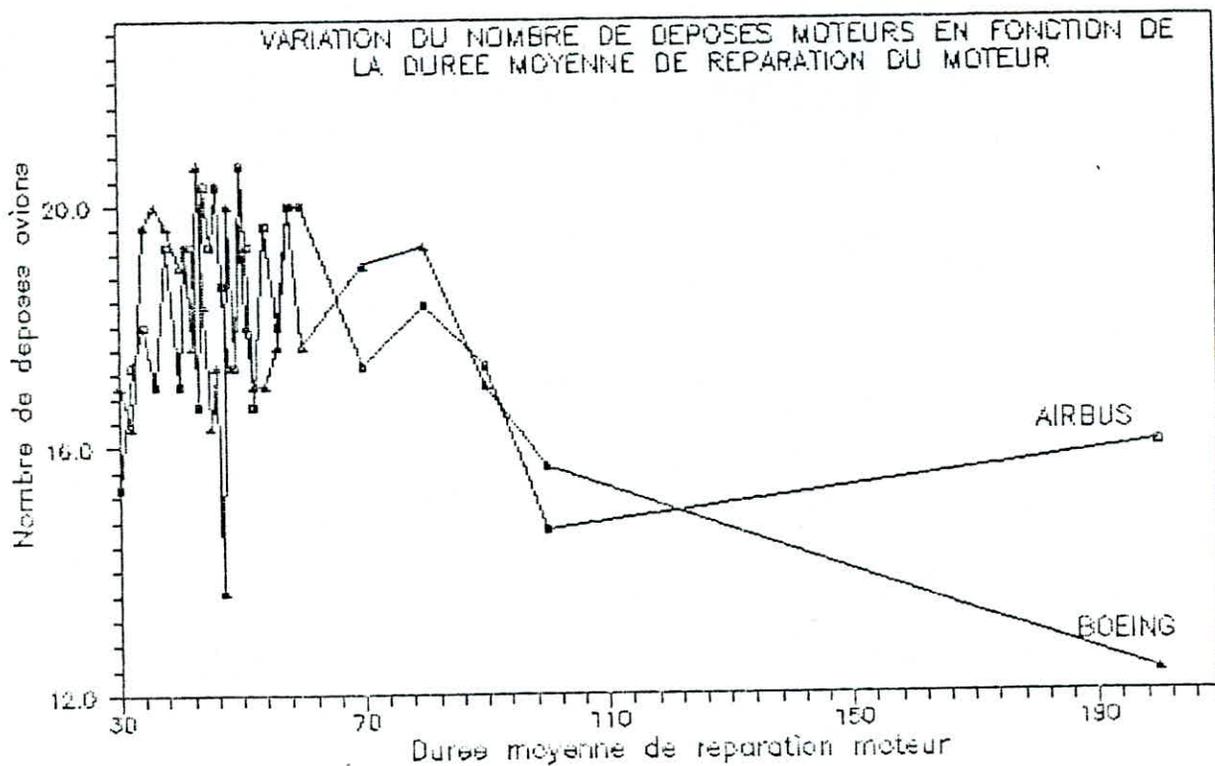


Figure 3.b

La durée moyenne de réparation des moteurs constitue une variable de contrôle importante et qui a un effet direct sur la disponibilité des avions. Ceci est parfaitement illustré par la figure (3.a), où nous remarquons la tendance à la baisse de la disponibilité lorsque la moyenne des temps de réparation des moteurs tend à augmenter. Notons qu'une augmentation relative moyenne du MTTR moteur de l'ordre de 1% entraîne une diminution de la disponibilité de 0.52%. Déjà, nous pouvons avancer qu'un gain dans la productivité au niveau du H400 permet une amélioration sensible de la disponibilité de la flotte d'AH.

La figure (3.b), représentant la variation du nombre de moteurs déposés en fonction du MTTR moteur, indique qu'il n'y a pas d'influence directe du MTTR sur le nombre de moteurs déposés. Nous pensons qu'au contraire, il existe une certaine proportionnalité entre ces deux paramètres. En effet lorsque le MTTR est faible, le retour des avions dans un état opérationnel est plus rapide, accroissant ainsi le taux de défaillance du système ce qui entraîne l'accroissement du nombre de moteurs déposés. Ce résultat s'explique par le fait que le nombre d'exécutions que nous avons effectué (5 exécutions indépendantes par valeur du critère: nombre de moteurs déposés) est relativement faible, ce qui donne des estimateurs biaisés.

iv) Analyse de sensibilité sur le taux d'échec au banc d'essai:

- Durée de simulation: 7500 jours,
- paramètre: taux d'échec au banc d'essai moteur,
- valeur de référence: TX\_ECHEC = 0.02,
- intervalle de variation:  $0.02 \leq TX\_ECHEC \leq 0.9$ , et
- aucune ressource disponible au H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 4 (Annexe résultats).

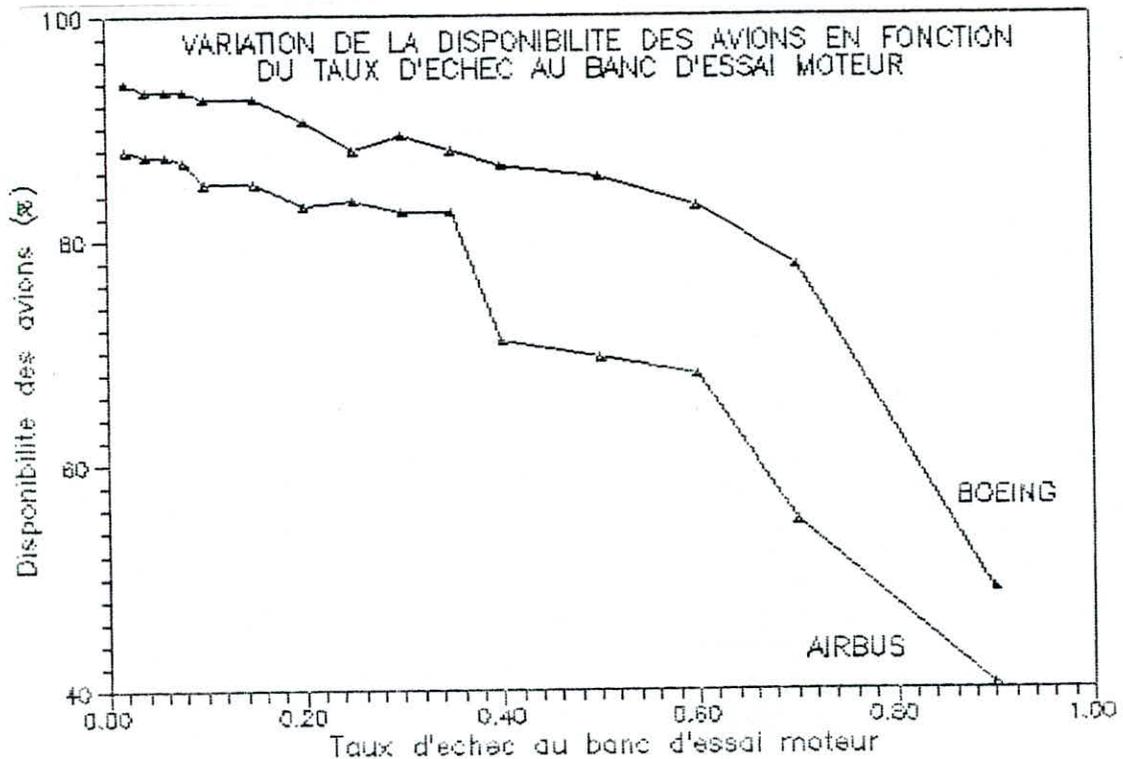


Figure 4

Comme le montre la figure, la disponibilité des deux types d'avions diminue inversement avec le taux d'echec au banc d'essai. Ceci est évident à cause du fait qu'une augmentation du taux d'echec est équivalente à une augmentation du MTTR moteur dont l'influence a déjà été commentée ci-dessus. Notons qu'une augmentation relative moyenne de 1% du taux d'echec entraîne une diminution relative moyenne de l'ordre de 0.55% dans la disponibilité des AIRBUS et de 0.5% pour les Boeing. D'où l'effet de la qualité de service de maintenance sur la disponibilité de la flotte.

v) Analyse de la sensibilité sur la borne inférieure de la loi triangulaire:

- Durée de la simulation: 7500 jours,
- paramètre à varier: la borne inférieure de la distribution triangulaire des activités,
- valeur de référence:  $ec\_inf = 0.95$ ,
- intervalle de variation:  $0.05 < ec\_inf < 0.95$ , et
- aucune ressource n'est disponible au niveau du H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 5 (annexe résultat)

En observant la courbe de variation de la disponibilité en fonction de la borne inférieure (voir Figure (5.a)), on remarque que la disponibilité des avions a tendance à croître quand la borne inférieure diminue, chose tout à fait normale car dans ce cas là toutes les durées (générées) d'activités ont tendance à baisser (en gardant la même moyenne), ce qui entraîne une diminution du MTTR moteur d'où une plus grande disponibilité.

Notons enfin qu'une diminution relative moyenne de la borne inférieure de l'ordre de 1% entraîne un accroissement relatif de la disponibilité de l'ordre de 0.09% pour l'AIRBUS et de 0.12% pour le BOEING.

vi) Analyse de la sensibilité sur la borne supérieure de la loi triangulaire

- Durée de la simulation: 7500 jours,
- paramètre à varier: la borne supérieure de la distribution triangulaire des activités,
- valeur de référence:  $ecart\_sup = 1.30$ ,
- intervalle de variation:  $1.05 < ecart\_sup < 2.00$  et
- aucune ressource n'est disponible au niveau du H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 5 (annexe résultat)

La figure (5.b) (courbe de variation de la disponibilité en fonction de la borne supérieure) indique que la disponibilité des avions a tendance à diminuer quand la borne supérieure augmente. Ceci s'explique par le fait

que dans ce cas la, toute les durées (générées) d'activités ont tendance a croître (en gardant la même moyenne), ce qui entraîne une augmentation du MTTR moteur d'ou une disponibilité moindre.

Notons enfin qu'un accroissement relatif moyen de la borne supérieure de l'ordre de 1% entraîne une perte relative dans la disponibilité de l'ordre de 0.14% pour les AIRBUS et de 0.15% pour les BOEING.

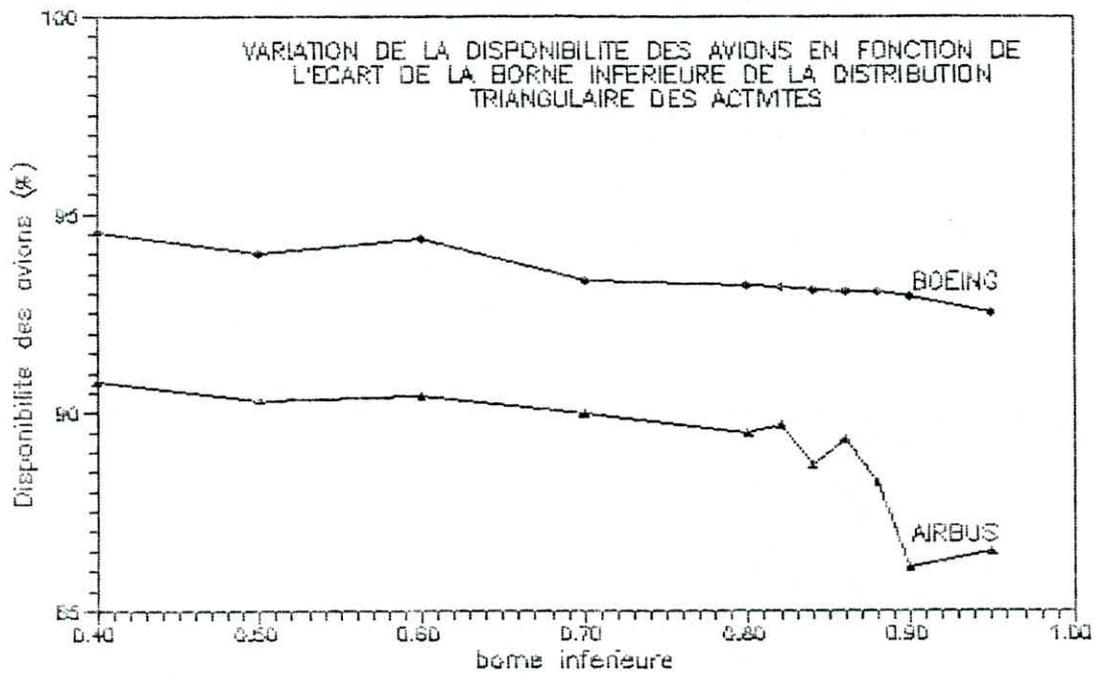


Figure 5.a

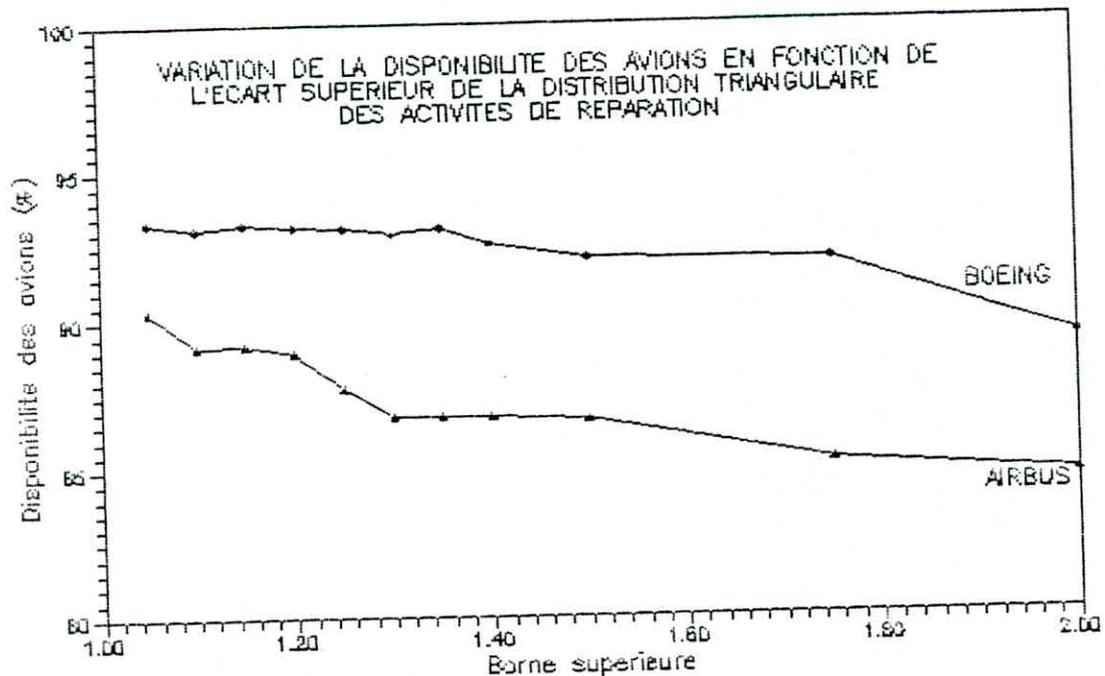


Figure 5.b

vii) Analyse de la sensibilité sur la durée de réparation des modules

- Durée de la simulation: 7500 jours,
- parametre à varier: Ecart par rapport a la moyenne,
- valeur de reference: ecart = 0,
- intervalle de variation:  $-10 < \text{ecart} < +10$ , et
- aucune ressource n'est disponible au niveau du H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 6 (annexe résultat)

La figure 6 fait apparaître l'effet d'une variation de la durée de réparation (réparations sous-traitées) sur la disponibilité avion. En effet nous remarquons qu'une diminution de cette durée entraîne un gain de disponibilité et inversement une augmentation des durées de réparation des modules entraîne une diminution de la disponibilité.

Nous noterons qu'une variation (augmentation ou diminution) moyenne de 2 jours dans la moyenne de réparation des modules entraînera une variation (diminution ou augmentation) de l'ordre de 1.1% de la disponibilité des AIRBUS et de 0.9% pour la disponibilité des BOEING.

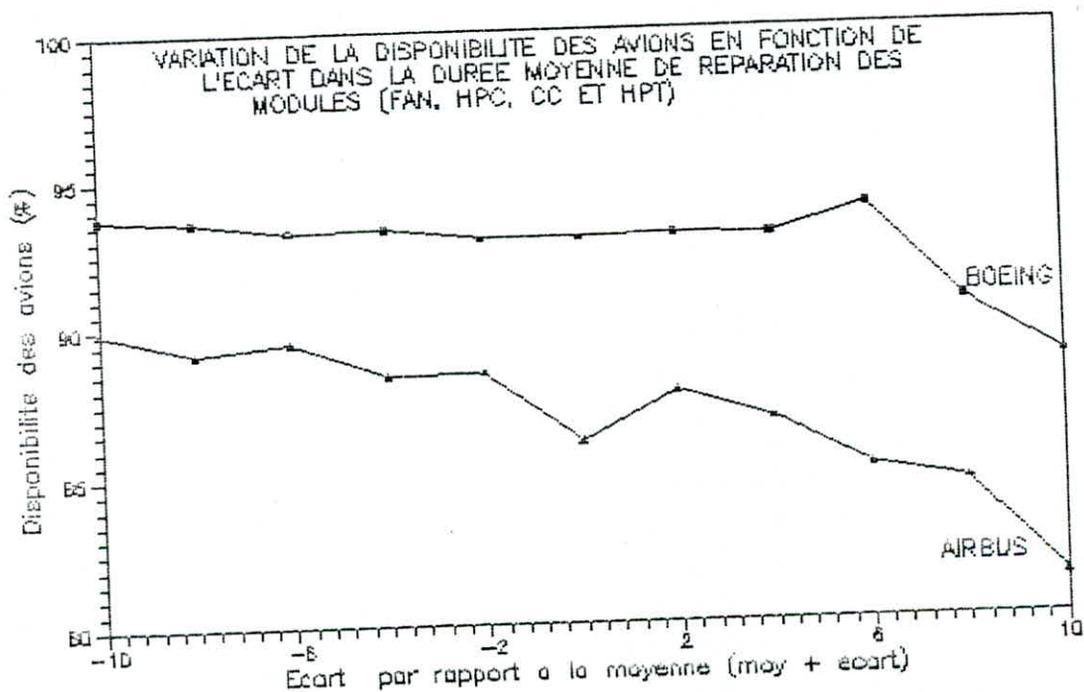


Figure 6

viii) Analyse de la sensibilité sur le nombre de moteurs de rechanges

- Durée de la simulation: 7500 jours,
- paramètres à varier: \* nombre de CF6A3 de rechange  
\* nombre de CF6C2 de rechange,
- Valeur de référence: Nbre de CF6A3 = 2  
Nbre de CF6C2 = 3,
- intervalle de variation: \*  $0 < NCF6A3 < +10$   
\*  $0 < NCF6C2 < +10$ , et
- aucune ressource n'est disponible au niveau du H400 (les ressources modules sont nulles).

Les résultats sont consignés dans le tableau 7 (annexe résultat)

En consultant la figure (7.a), nous remarquons que la disponibilité des avions augmente avec le nombre de moteurs de rechange, puis tend à stagner à partir d'un certain niveau de moteurs de rechange, c'est à ce niveau que nous pouvons remarquer les effets d'une mauvaise gestion et la nécessité d'un calcul économique rigoureux des niveaux de stocks de moteurs et modules de rechange pareil.

En effet à partir d'un certain seuil les moteurs seront inutilisés ce qui équivaut à une immobilisation de plusieurs millions de \$ qui auraient pu être investit dans d'autres activités plus rentables.

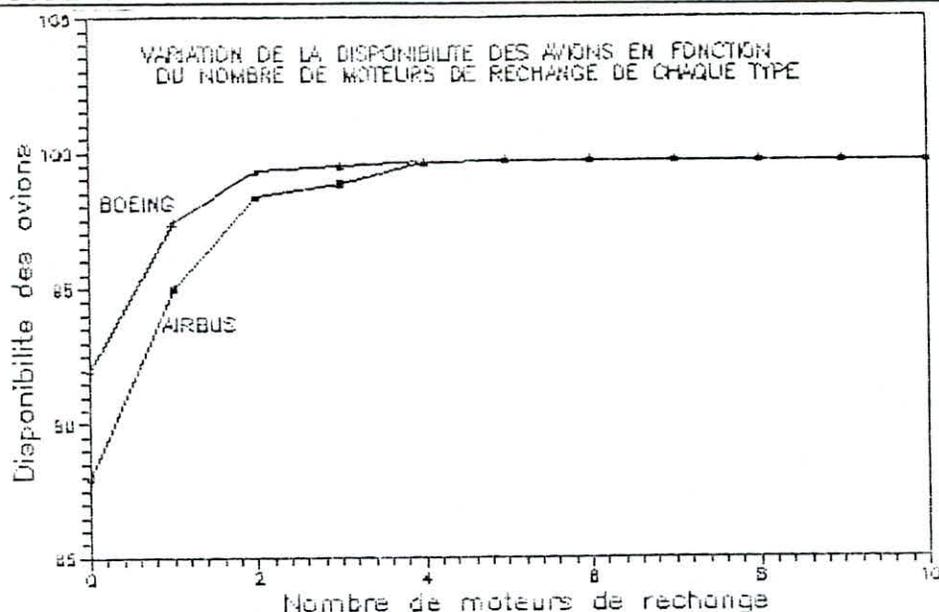


Figure 7.a

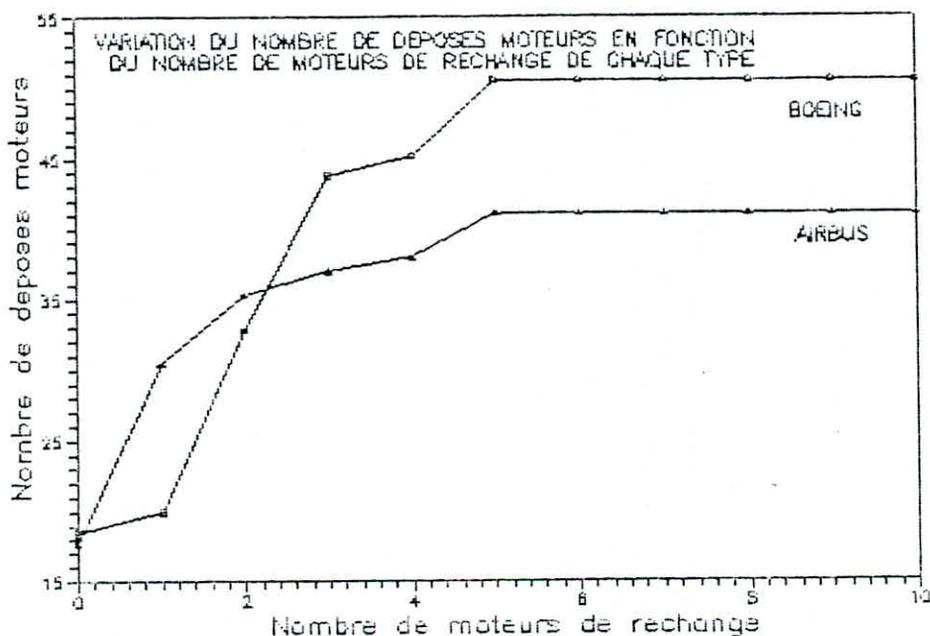


Figure 7.b

La figure (7.b), représentant le nombre moyen de déposes moteurs en fonction du nombre de moteurs de rechange, indique que le nombre de déposes moteurs croît dans le même sens que la disponibilité. Ceci provient du fait que les avions sont le plus souvent opérationnels donc plus assujetties à des disfonctionnements moteurs. Nous pourrions penser que puisqu'il y a plus de pannes, la disponibilité devra normalement diminuer. Mais ceci n'est pas le cas puisque dans le cas d'une grande disponibilité

des rechanges au niveau des stocks, la durée d'immobilisation de l'avion au sol se limite au temps de dépose du moteur défaillant et à celui de la repose de sa rechange.

ix) Analyse de la sensibilité sur le nombre de modules de rechange de chaque type

- Durée de la simulation: 7500 jours,
  - paramètres à varier: \* nombre de module\_A3 de rechange  
\* nombre de module\_C2 de rechange,
- dans cette analyse de sensibilité, nous avons considéré l'effet des niveaux de stocks des modules de rechange sur la disponibilité des avions. De plus, nous avons considéré quatre modules (FAN, HPC, CC et HPT), qui causent le plus souvent le disfonctionnement du moteur (probabilités conditionnelles de défaillance élevées), toutes les autres ressources sont supposées nulles. En faisant varier ces quatre ressources (en fait elles sont huit, puisque les modules de rechange des deux types de moteurs sont incompatibles) à tour de rôle, nous avons essayé d'analyser leurs effets sur la disponibilité des deux types d'avions.
- valeur de référence: \* Nbre de "I"\_A3 = 0,  
\* Nbre de "I"\_C2 = 0,
  - intervalle de variation: \*  $0 < N\_I\_A3 < 6$   
\*  $0 < N\_I\_C2 < 6$ ,
- I = FAN, HPC, CC ou HPT,
- les autres ressources sont considérées nulles.

Les résultats sont consignés dans le tableau 8 (annexe résultat)

La figure (8) montre l'effet des niveaux des stocks des modules de rechange sur la disponibilité des avions. Nous remarquons que cet effet devient presque insignifiant dès que nous avons plus d'un module de rechange de chaque type en stock. Cela est dû d'une part au faible taux de demandes pour les modules de rechange, et d'autre part, du retour relativement rapide de ceux réparés.

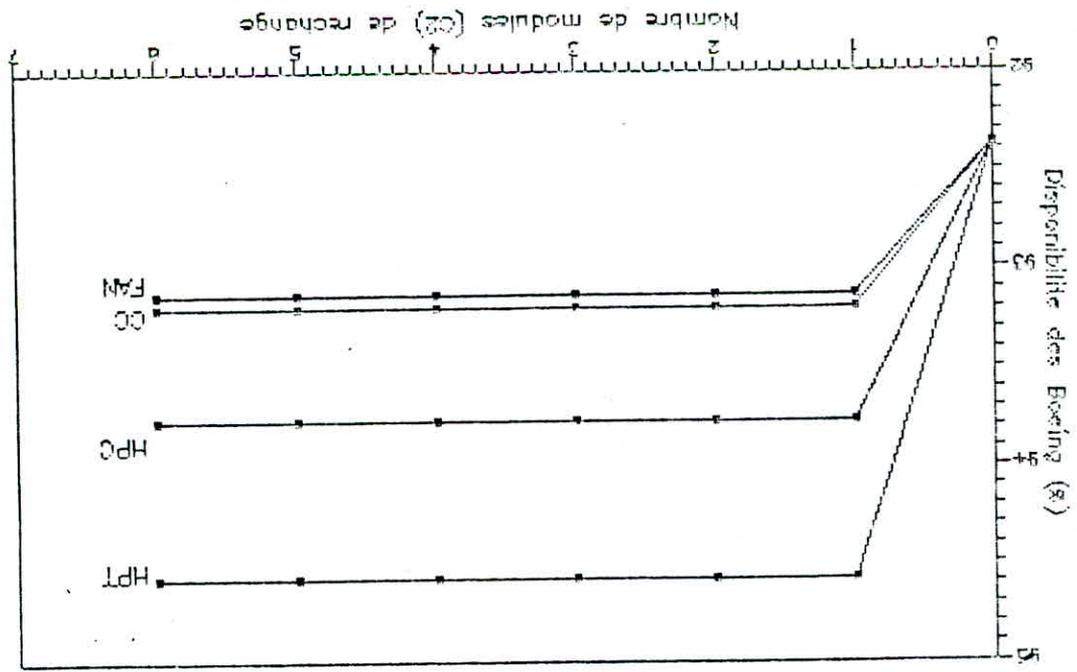


Figure 8.b

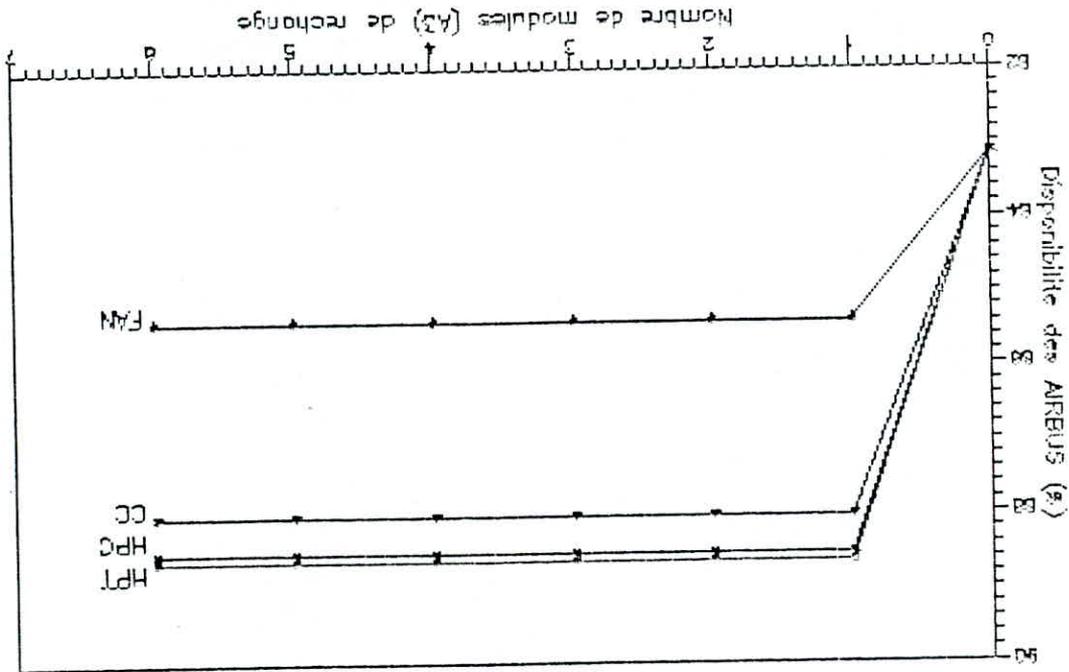


Figure 8.a

d) La deuxième phase quantitative de validation:

Cette phase correspond à la troisième étape de l'approche de Taylor et Finger. Elle consiste à déterminer le degré de représentativité des résultats obtenus par la simulation en les comparant à ceux du système réel. Si cette comparaison est positive, la validité du modèle peut être affirmée. Pour procéder à la comparaison des résultats, les tests statistiques vont nous permettre de statuer sur le caractère significatif de la différence entre les résultats expérimentaux et résultats réels.

Toutefois, la comparaison des résultats par l'utilisation des tests statistiques n'est pas si simple qu'elle peut paraître de prime abord. En effet, les conditions de stationnarité du système et d'indépendances entre les observations sont rarements satisfaites. Aussi, les tests statistiques classiques ne sont pas applicables directement.

Il existe deux approches statistiques de comparaison couramment utilisées:

- \* l'approche par inspection, et
- \* l'approche par intervalle de confiance.

Position du problème:

Supposons que l'on dispose, pour une même variable, de  $K$  observations  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_K$  tirées du système et  $l$  observations  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_l$  tirées du modèle simulé. Il s'agit de tester si les différences entre les deux séries d'observations sont significatives ou non.

d1) L'approche par inspection:

Cette approche est utilisée lorsque les observations sur le système ne sont pas nombreuses. Dans notre cas, elle est la technique la plus adaptée car nous ne disposons que de peu de données sur le système.

Procédure:

Il s'agit de comparer une donnée réelle appropriée à une donnée obtenue par simulation et cela pour chaque

critère de validation.

Ceci est la procédure normale à suivre, mais dans notre cas, nous ne disposons que d'une seule donnée réelle qui est le nombre moyen de moteurs CF6A3 déposés. Nous avons considéré donc le nombre de déposes moteurs CF6A3 depuis l'entrée en service des AIRBUS en 1984 jusqu'au 12/12/90. Durant sept années, il y eut 13 déposes moteurs CF6A3.

En partant des mêmes conditions initiales (système vide), nous avons simulé sur une période de sept ans en considérant les mêmes niveaux des stocks de rechange dont dispose actuellement AH (i.e. 2 moteurs CF6A3 et 3 moteurs CF6C2, les autres ressources sont nulles).

Plan d'expérience:

Nous avons effectué 35 exécutions indépendantes (en faisant varier le "seed").

Nous avons trouvé pour le critère nombre de déposes CF6A3:

$$E (XX(19)) = 11.4 \text{ et } \text{Ecart type} = 3.4$$

Ce résultat approche le résultat réel (13 déposes).

d2) L'approche par intervalle de confiance:

Elle nécessite un nombre élevé d'observations simulées.

Principe:

Soient  $m$  observations tirées de  $n$  simulations indépendantes ( $Y_i$   $i = 1, n$ )

On calcule l'estimateur de la moyenne théorique  $\mu$ :

$$\mu_y = \sum Y_i / n.$$

Il s'agit de construire un intervalle de confiance pour  $E = \mu - \mu_y$ .

L'intervalle de confiance nous donne directement le résultat du test.

Procédure:

L'intervalle à  $100(1 - \text{Alpha})\%$  est construit à partir de la valeur de  $t$  de student.

Si  $0 \in [l(\alpha), u(\alpha)]$  alors la différence entre  $\mu$  et  $\mu_y$  est statistiquement significative; Ceci équivaut à rejeter l'hypothèse nulle  $H_0: \mu_y = \mu$  et le modèle ne peut être considéré valide.

Pour plus de détails concernant cette technique, le lecteur trouvera de plus amples détails dans l'ouvrage de law et Kelton "Simulation modeling and analysis"

Cette procédure ne peut être appliquée à notre système car le nombre d'observations, comme nous l'avons déjà fait remarquer, est limitée à une seule donnée réelle.

Conclusion: Malgré le fait que la troisième étape de la procédure de validation de Naylor et Finger est très peu significative (la comparaison n'a pu être faite que pour un seul critère de validation, qu'est le nombre de déposes CF6A3), nous pouvons affirmer, au vu des deux premières étapes de validation (surtout de la partie analyse de sensibilité où nous avons vu que le modèle réagissait d'une manière logique aux variations des paramètres retenues), que notre modèle est une représentation assez fidèle (relativement aux objectifs de l'étude) du système objet de l'étude.

Une fois le modèle validé, nous allons passer à l'étape d'exploitation de ce modèle, à savoir exécutions et analyse de l'output, objet de la section suivante.

### I-6- Analyse des outputs, présentation et interprétation des résultats:

L'analyse de l'output, partie intégrante de l'aspect statistique de la simulation, constitue une étape importante du processus de simulation d'un système modélisé, vérifié et validé.

#### 6-1- Notion de base:

Avant d'aborder le problème de l'analyse de l'output, nous allons donner un certain nombre de définitions qui nous semblent nécessaires pour la suite. Notons que ces définitions concernent seulement les techniques pouvant être appliquées à notre système.

##### a) Estimation et comparaison:

Il est important de souligner qu'une simulation peut répondre notamment à deux types de problématiques:

- une analyse absolue du système et une détermination des paramètres régissant son comportement, ou
- une étude comparative de plusieurs configurations possibles du système.

Concernant notre étude, la deuxième alternative est plus appropriée du fait que nous avons à comparer entre plusieurs niveaux de stocks, donc entre plusieurs politiques d'approvisionnement, et mesurer leurs impacts sur la disponibilité des avions. Le problème de comparaison se réduit à l'estimation d'une différence entre les résultats de deux politiques différentes.

##### b) Etat stationnaire / état transitoire:

Ces deux notions sont fondamentales en simulation. De leurs définitions, découlent les différentes techniques d'analyse de l'output à appliquer. L'évolution dynamique du système peut être définie par trois états:

- l'état initial,

- l'état transitoire, et
- l'état stationnaire.

Partant de l'état initial, le système passe par une série d'états transitoires avant d'atteindre l'état stationnaire, si ce dernier existe. Ces transitions sont dues aux effets des conditions initiales qui contrôlent l'évolution du système, et qui généralement ne sont pas représentatives de l'état stationnaire. Une fois en état stationnaire, l'évolution du système devient indépendante des conditions initiales.

c) Simulation terminale / Simulation vers l'état stationnaire:

Eu égard aux objectifs et au type de système considéré, on distingue deux types de simulations.

1- la simulation terminale ou simulation à horizon fini. Le modèle est simulé sur une période  $[0, T_E]$  où  $T_E$  est l'instant d'occurrence de l'événement E. Notons que dans ce type de simulation, les performances obtenues dépendent de l'état initial du modèle.

2- la simulation vers l'état stationnaire est une simulation à horizon infini, jusqu'à l'état stationnaire. Une fois ce dernier atteint, on pourra procéder à l'estimation des mesures de performances du système.

Vu les limitations imposées par la version de SLAM disponible, nous avons dû opter pour une simulation terminale. Nous avons simulé le modèle sur 7500 jours.

d) Estimation des mesures de performances:

L'objectif de l'analyse de l'output est l'obtention d'estimateurs convenables des mesures de performances. Pour cela, des techniques d'analyse ont été conçues en rapport avec le type de simulation choisi.

Du fait que notre simulation est à horizon fini, nous n'exposerons que la technique de simulation terminale à plusieurs répliques. Concernant les autres techniques, le

lecteur intéressé pourra consulter, entre autres, "Simulation modeling and analysis" par Law et Kelton.

Simulation terminale à plusieurs répliques:

Le moyen le plus simple de répondre au problème de corrélation entre les observation est d'effectuer plusieurs répliques indépendantes d'une même exécution. En générant les repliques à partir de courant aléatoire différents, elles pourront être supposées indépendantes.

Construction de l'intervalle de confiance:

Soient:

- n le nombre de répliques effectuées
- $X_i$ ,  $i = 1, n$ , la moyenne des  $r_i$  observations obtenues à la ième réplique.

On aura donc:  $X(n) = \Sigma X_i/n$  et  $s^2(n) = \Sigma (X_i - X(n))^2/(n-1)$

Sous l'hypothèse que les observations sont indépendantes et identiquement distribuées suivant une loi normale, alors un intervalle de confiance à  $100(1 - \alpha)\%$  pour  $\mu$  (mesure réelle de performance) est donné par:

$$X(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{s^2(n)/n}$$

L'exactitude que fournit l'intervalle de confiance en terme de couverture dépend de la validité de l'hypothèse de normalité des  $X_i$  (hypothèse vérifiée lorsque le nombre d'observation est grand ( $n > 30$ ): théorème central limite).

1-6-2- Présentation et interprétation des résultats:

Comme évoqué précédemment, le choix des conditions initiales est un paramètre décisif quant à la fiabilité des résultats. Pour notre part, nous avons choisis comme conditions initiales la situation de la flotte moteur au 31/12/90.

Nous avons effectué 35 répliques indépendantes pour chaque politique ( $n > 30$ ), ce qui nous permet l'application du théorème central limite. Pour la construction des intervalles de confiance, nous avons considéré un risque d'erreur  $\alpha = 5\%$ .

La durée de la simulation a été fixée à 7500 jours. Avant de chercher quels sont les niveaux de stocks adéquats qui nous permettent d'obtenir une disponibilité donnée, nous avons fait deux séries d'exécutions qui nous permettent de déterminer les limites de la disponibilité (les autres paramètres sont fixés à leurs valeurs de références).

Limite inférieure de la disponibilité:

Aucune ressource disponible ou niveaux de stocks de rechange nuls.

Les résultats obtenus sont:

Disponibilité Airbus = 87.75 %,  $s = 2.7\%$

Disponibilité Boeing = 91.93 %,  $s = 4.1\%$

Les intervalles de confiance à 95 % pour chacune de ces deux mesures sont:

- pour les Airbus [86.84, 88.66]

- pour les Boeing [91.00, 92.86]

Ainsi pour des niveaux de stocks nuls, AIR-ALGERIE peut disposer pleinement de ses deux A-310 durant 88.75% des 7500 jours considérés (i.e., 2 Airbus sont disponibles durant 6656 jours), et de ses trois B-767 durant 91.93% des 7500 jours (i.e., 3 B-767 sont disponibles durant 6895 jours).

Rappelons que les immobilisations des avions dues à d'autres causes que les disfonctionnements moteurs n'ont pas été considéré comme une indisponibilité (visite de vieillesse et grande visite).

Limite supérieure de la disponibilité:

Ressources infinies (nous avons supposé la disponibilité de 10 unités de rechange pour chaque type de

ressource).

Les résultats obtenus sont:

Disponibilité Airbus = 99.72 %,  $s = 0.47\%$

Disponibilité Boeing = 99.76 %,  $s = 0.03\%$

Les intervalles de confiance à 95 % pour chacune de ces deux mesures sont:

- pour les Airbus [99.56, 99.88]

- pour les Boeing [99.75, 99.77]

Remarque: Le temps d'indisponibilité se limite, dans ce cas, au temps nécessaire à la dépose et repose du moteur défaillant.

Après avoir fixé les limites extrêmes entre lesquels la disponibilité (fonction des autres politiques) devra obligatoirement varier, nous avons déterminé les niveaux de stocks désirés permettant d'avoir la disponibilité fixée par les commanditaires de l'étude, à savoir 96%, ce qui revient à dire qu'il faut déterminer les niveaux de stocks assurant une disponibilité des avions durant 7200 jours au minimum.

Nous sommes partis d'une situation de stocks nuls incrémenté à chaque fois d'une unité. Nous n'avons considéré que les ressources ayant un impact relativement plus important sur la disponibilité des avions. Ces ressources comme l'a montré l'étude de sensibilité sont:

\* pour les Airbus:

- moteur CF6A3,
- module HPT et
- module CC.

\* pour les Boeing:

- moteur CF6C2,
- module HPT et
- module HPC.

Remarque: Actuellement AIR-ALGERIE dispose de deux moteurs CF6A3 et de trois moteurs CF6C2 de rechange pour lesquels nous avons tenu à calculer les mesures de performances

fixées.

Niveaux de stocks de rechange	Disponibilité A310 et intervalle de confiance	Disponibilité B767 et intervalle de confiance
A310: 1 CF6A3, 0 HPT et 0 CC. B767: 1 CF6C2, 0 HPT et 0 HPC.	DA310 = 95% s = 2% [93.6, 96.4]	DB767 = 97.33% s = 0.33% [97.30, 97.36]
A310: 1 CF6A3, 1 HPT et 0 CC. B767: 1 CF6C2, 1 HPT et 0 CC.	DA310 = 96.60% s = 1.37% [96.13, 97.07]	DB767 = 97.60% s = 0.94% [97.28, 97.92]
A310: 1 CF6A3, 1 HPT et 1 CC. B767: 1 CF6C2, 1 HPT et 1 HPC.	DA310 = 96.94% s = 1.18% [96.53, 97.35]	DB767 = 97.91% s = 0.88% [97.57, 98.25]
A310: 1 CF6A3, 0 HPT et 0 CC. B767: 2 CF6C2, 0 HPT et 0 HPC.	DA310 = 95.80% s = 1.61% [95.24, 96.36]	DB767 = 99.13% s = 0.40% [98.99, 99.27]
A310: 1 CF6A3, 1 HPT et 0 CC. B767: 2 CF6C2, 1 HPT et 0 CC.	DA310 = 97% s = 1.4% [96.52, 97.48]	DB767 = 99.30% s = 0.38% [99.24, 99.36]
A310: 2 CF6A3, 0 HPT et 0 CC. B767: 3 CF6C2, 0 HPT et 0 CC.	DA310 = 98.80% s = 1.21% [98.38, 99.22]	DA767 = 99.63% s = 0.40% [99.49, 99.77]

Au vu de ces résultats, nous remarquons que pour un niveau de stocks moteurs identiques pour les deux types d'avions et malgré le fait qu'on ait deux Airbus et trois Boeing, la disponibilité des ces derniers est supérieure à celle des AIRBUS. Ceci s'explique par le fait que les moteurs CF6C2 ont un taux de défaillance plus faibles (0.00111 contre 0.00139 def/jour), ainsi que par le fait qu'un avion A-310 immobilisé (la moitié de la flotte Airbus) a un plus grand impact sur la disponibilité des AIRBUS que celle d'un avion Boeing immobilisé (le tiers de la flotte B-767). Finalement, nous pouvons affirmer que pour la politique d'approvisionnement consistant en: 1 moteur CF6A3, 1 module HPT\_A3 et 1 moteur CF6C2 nous permet d'avoir une disponibilité dépassant l'objectif assigné (96%). Mais en tant qu'ingénieurs en génie industriel, notre mission première est de préparer les éléments nécessaires à une prise de décision et laisser les décisions aux concernés. A cet effet, nous allons présenter quelque suggestions liées à la politique d'approvisionnement au niveau du H400.

#### I-6-3- Suggestions:

Le premier point qui attire l'attention est qu'AIR-ALGERIE n'aura pas à faire des investissements supplémentaires. Mieux encore elle peut tirer profit de son stock actuel. En effet les alternatives suivantes peuvent être entrevues:

1ère Alternative: Vendre un moteur CF6A3 et deux moteurs CF6C2 et acquérir en contrepartie un module HPT\_A3.

2ème Alternative: Vendre 1 ou 2 moteurs CF6C2 et négocier un contrat de sous-traitance des modules moins coûteux avec des durées de réparation relativement plus longues. Notre modèle peut calculer les durées maximales qu'AH peut se permettre (assurant la disponibilité souhaitée avec les niveaux de stocks suivants: 1 moteur CF6A3 et 1 ou 2 moteur CF6C2).

3ème Alternative: Dans le cas d'une impossibilité de vente des moteurs, AIR-ALGERIE pourra toujours louer ces moteurs aux compagnies aériennes des pays voisins.

4ème Alternative: L'acquisition (peu probable) d'un nouveau Boeing 767 sans moteur de rechange.

Ceci conclue la première partie de notre étude portant sur la détermination des niveaux de stocks appropriés, permettant d'assurer une disponibilité fixée par les responsables d'AH. La majeure partie de notre temps a été consacrée à cette première partie de l'étude. Du fait qu'il fallait en premier lieu saisir tous les éléments nécessaires à la compréhension du système complexe qu'est la maintenance en aéronautique et l'assimilation de la technique de simulation et du langage SLAM.

Nous passons maintenant à la deuxième partie de notre étude et qui va porter sur la modélisation du système propre aux moteurs du type JT8D.

II- TRAITEMENT DES B-727 et B-737:

Dans cette deuxième partie, nous traitons le problème de la disponibilité de la flotte des Boeing 727 et 737 en fonction des niveaux de stocks de moteurs de rechanges.

Comme nous l'avons déjà signalé dans le chapitre I, ce type d'avions est équipé de moteurs de conception non modulaire, de plus, l'intervention au niveau du H400 sur ce type de moteur sera beaucoup plus poussée.

Avant d'aborder la description du système, nous donnons ci-dessous une description sommaire de la conception élémentaire de ce type de moteur.

II-1- Description sommaire du JT8D [Engine Manuell]:

Les constructeurs PRATT & WHITNEY ont défini douze groupes (ou sections) principaux qui constituent le moteur JT8D. Un groupe principal est défini comme étant l'assemblage le plus commode de composants qui peut être déposé ou installé pour faciliter l'accès au moteur ou son montage, basé sur le degré de l'intervention désiré. Ces dix groupes sont (nous avons gardé la nomenclature anglo-saxonne):

- \* FAN INLET GROUP
- \* FRONT COMPRESSOR GROUP
- \* COMPRESSOR INTERMEDIAT GROUP
- \* REAR COMPRESSOR GROUP
- \* DIFFUSER GROUP
- \* DIFFUSER OUTER FAN DUCT GROUP
- \* COMBUSTION AND NO.5 BEARING SECTION
- \* TURBINE NOZZLE GROUP
- \* REAR COMPRESSOR DRIVE TURBINE GROUP
- \* FRONT COMPRESSOR DRIVE TURBINE GROUP
- \* ENGINE EXHAUST CASE SECTION GROUP
- \* MAIN ACCESSORY GEARBOX GROUP

Chacun de ces groupes est constitué par un grand nombre de composants élémentaires.

Notons qu'AIR-ALGERIE dispose de trois séries du JT8D

qui sont le JT8D-9A, le JT8D-15 et le JT8D-17A. La différence entre ces trois versions réside dans la poussée, comme il existe aussi des composants qui sont incompatibles entre séries. Ces différences n'empêchent pas l'interchangeabilité de ces trois séries de moteurs.

#### II-2- Description du système:

AIR-ALGERIE dispose de 16 boeing 737 dont 1 est destiné au fret, et de 11 Boeing 727. Ces avions ont eux aussi un taux moyen d'utilisation de cinq heures de vol par jour.

Un B-727 est équipé de trois moteurs JT8D, alors qu'un B-737 est équipé de deux moteurs.

Chaque moteur est déposé de l'avion après un certain nombre d'heures de vol pour une maintenance systématique. Il y a deux types de maintenance programmées: la révision générale (niveau de maintenance B3) et l'inspection de la partie chaude (Hot Section Inspection: HSI).

De plus, le moteur peut être déposé à des instants aléatoires pour cause de défaillance d'un ou de plusieurs composants.

Après la dépose, si un moteur de rechange identique ou compatible est disponible, il est immédiatement remonté sur l'avion; l'activité de repose-contrôle dure une journée. Sinon l'avion devra attendre jusqu'à ce qu'un moteur de rechange soit disponible. Cette durée d'attente augmentée des durées nécessaires à la dépose du moteur défaillant et à la repose de sa rechange constitue la durée d'immobilisation de l'avion.

Entre-temps le moteur défaillant est envoyé à l'atelier (GMP) où s'effectue le déséquipement du QEC. Notons qu'il y a une file d'attente à l'entrée de cet atelier et que l'opération de déséquipement dure en moyenne une semaine.

Après déséquipement, le moteur est acheminé vers le H400 où il prend une autre file en attendant l'opération de diagnostic

Une fois dans le H400, le moteur subit un diagnostic poussé, suivi du traitement adéquat (HSI, RG ou REPARATION).

Parmi les différences entre la conception modulaire du CF6 et celle élémentaire du JT8D, nous rappellerons l'absence de déposes programmées pour le premier ainsi que le degré d'intervention. En effet, si pour les premiers on se limite au changement des modules, pour les JT8D on est obligé de descendre jusqu'au niveau des composants à l'origine du disfonctionnement du moteur.

Les composants défaillants sont démontés et remplacés par d'autres identiques, s'ils sont disponibles au niveau des stocks de rechange. Généralement, les composants défaillants sont constitués en partie de consommables, c'est à dire non révisables et qui ne peuvent être réutilisés une seconde fois.

Comme nous l'avons mentionné, l'entrée des moteurs en atelier peut être due à l'une des trois raisons suivantes:

Dépose pour révision générale:

Théoriquement, toutes les 13000 heures, le moteur est déposé de l'avion pour subir une révision générale. Normalement, pour une flotte de 27 avions (i.e., 65 moteurs opérationnels), opérant chacun en moyenne 1825 heures par an, il devrait y avoir une RG tous les 40 jours (entre 9 et 10 RG par an). En pratique, il existe des déviations substantielles par rapport à ce qui devrait réellement être (ceci est dû au fait que l'acquisition des avions s'est faite progressivement, s'étalant sur une période de 13 ans (71-84)). Par exemple pour l'année 86, il y a eu 14 RG, alors que pour l'année 87 il y en a eu seulement 2.

Durant la révision générale, le moteur est totalement éclaté. Ces composants subissent un nettoyage (chimique, à l'abrasive, etc...). Puis ils passent une série d'inspections (visuelle, dimensionnelle, magnétique, aux

rayons X, à l'ultra-son, etc...) durant lesquels s'effectue la détection des "cracks" ou fissures et des pièces défectueuses éventuellement. L'opération se poursuit par le remplacement des composants défectueux qui sont envoyés en réparation (s'ils sont réparables, sinon, ils sont rebutés). Une fois les opérations terminées, les composants sont réassemblés et le moteur subit un ensemble de tests (pesage, équilibrage statique et dynamique, banc d'essai) avant d'être de nouveau disponible au niveau du stock pour utilisation. Cette opération dure en moyenne 95 jours.

Dépose pour une inspection de la partie chaude:

Durant ces dernières années, les temps entre HSI ont été graduellement augmentés jusqu'à atteindre les 6000 heures de vol.

Actuellement, un moteur subit une HSI toutes les 6000 heures de vol. Ce qui donnerait presque 20 HSI par an. En pratique et comme pour les RG, il existe des déviations substantielles entre le nombre de HSI faites annuellement et le nombre théorique de HSI. Par exemple, pour l'année 87 il y a eu 25 HSI, alors que pour l'année 90, il y en a eu seulement 5.

Lors d'une HSI, la partie chaude (chambre de combustion et les aubes directrices (NGV)) est inspectée, et les pièces défectueuses sont remplacées. Notons que les injecteurs sont systématiquement remplacés et que le rotor du FAN, le premier étage de l'ensemble statorique du compresseur ainsi que le compresseur avant peuvent y être remplacés.

Sa durée moyenne est de 15 jours.

Dépose pour cause de panne:

Dans ce cas, le moteur est déposé suite à une défaillance d'un ou de plusieurs composants. Une fois dans l'atelier, le moteur subit un diagnostic au bout duquel sont déterminés les composants à l'origine du dysfonctionnement. Après le déséquipement Q.E.C, le moteur est désassemblé

jusqu'à atteindre les composants en question, qui sont remplacés. le moteur est réassemblé puis subit toute la gamme d'opérations (nettoyage, pesage, équilibrage, etc...) jusqu'au banc d'essai et devient de nouveau disponible au niveau du stock. Notons que dans ce cas-ci la durée de réparation dépend de la nature de la défaillance (nombre et localisation des composants défaillants dans le moteur).

C'est à ce niveau qu'apparait la complexité du système étudié. Ainsi, un problème majeure s'est posé : un disfonctionnement du moteur peut être dû à la défaillance de plusieurs composants. Dans ce contexte, il nous a été impossible de recenser à chaque fois les origines de la panne. Pour mieux expliciter ce problème nous allons l'illustrer par un exemple : dans l'historique des moteurs, nous avons relevé parmi les causes de déposes, que certaines sont dues au FOD (pénétration d'un corps étranger dans le moteur : Foreign Object Damage). Généralement, le FOD cause des dommages à plusieurs composants, alors que sur le rapport, nous ne retrouvons que la mention FOD. Cette situation se répète pour beaucoup d'autres pannes, ce qui fait que nous nous sommes retrouvés dans l'incapacité d'estimer les probabilités conditionnelles de défaillance des composants.

De plus, plusieurs composants sont spécifiques à un seul type de moteur, donc incompatibles avec les deux autres séries. Cette situation fait qu'il faut estimer les niveaux de rechange des composants spécifiques à chaque série de moteur ; ce qui nous aurait obligés à faire une distinction entre les trois séries de moteurs accentuant par là même la complexité de notre étude.

Tous ces problèmes, en plus de celui de l'absence de données relatives au MTTR (temps de réparation) des composants, font que l'estimation des niveaux de stocks des composants de rechange devient difficile voire impossible. Ceci nous a amené à limiter notre étude à l'estimation du niveau de stock des moteurs de rechange, objectif principal

de l'étude telle qu'elle a été formulée par les responsables d'AIR-ALGERIE. A cet effet, nous avons émis un certain nombre d'hypothèses simplificatrices mais néanmoins justifiées comme nous le verrons dans la prochaine section dont l'objet est la conception du modèle.

Finalement, le moteur est acheminé au banc d'essai pour le test final qui dure en moyenne 7 jours. A la fin de ce test, le moteur peut être jugé fiable ou non. Dans le premier cas, il est envoyé au GMP où il est rééquipé de son QEC, opération qui dure en moyenne sept jours, après quoi il est envoyé en stock où il devient de nouveau disponible. Dans le cas où le test du banc d'essai s'avère négatif, le moteur doit subir une révision générale.

Comme pour les CF6, il y a un autre point qui devrait être pris en compte : c'est celui de la maintenance avion.

En effet, lors d'une grande visite ou d'une visite de vieillissement, l'avion est dépossédé de ses moteurs qui deviennent alors disponibles, au niveau du stock des moteurs de rechange, pour utilisation. Une fois ces opérations de maintenance terminées, l'avion émet une demande de deux ou trois moteurs (suivant le type d'avion : B-737 ou B-727) au niveau du stock de moteurs de rechange. Le délai de réception de cette demande sera comptabilisé comme une indisponibilité de l'avion puisque nous nous intéressons seulement à la disponibilité des avions en fonction des moteurs de rechange.

### II-3 MODELISATION DU SYSTEME

Dans cette section, nous allons présenter le modèle de simulation que nous avons élaboré et qui va permettre :

- i)- l'évaluation sur une base de temps donnée du :
  - a) nombre total moyen de déposes moteurs JT8D ;
  - b) nombre total moyen de déposes moteurs pour HSI ;
  - c) nombre total moyen de déposes moteurs pour RG ;

d) nombre total moyen de déposes moteurs dûes à des pannes.

ii)- l'évaluation du nombre moyen de moteurs de rechange en fonction d'un niveau de disponibilité fixé.

Les hypothèses générales que nous avons considérées sont :

1) Dans les statistiques que nous avons consultées, nous avons relevé que les échéances des déposes programmées (HSI et RG) sont rarement respectées. Ainsi, la RG et la HSI ont lieu, généralement, avant que leur échéance n'arrive. Ceci s'explique par la durée très élevée entre deux visites programmées, ce qui fait qu'une HSI ou une RG est souvent décidée par les techniciens d'AH après diagnostic, éliminant par là-même le côté programmé de la maintenance qui tend à devenir 'on condition'[d'après les responsables d'AH]. A titre d'exemple, nous relevons sur l'historique des moteurs que les temps entre deux HSI varient entre 3736 heures de vol (moteur JT8D-15, numéro de série 688611) et 10693 heures (moteur JT8D-15, numéro de série 688600). De plus, un certain nombre de déposes pour panne (presque toute les déposes pour cause d'EGT température élevée des gaz d'évacuation des turbines) sont transformées soit en RG soit en HSI, ce qui accentue encore plus le caractère aléatoire de ce type de maintenance. Cette situation a fait que nous avons considéré (en accord avec les responsables d'AH) les déposes programmées comme déposes aléatoires et nous les avons intégrées dans l'estimation du taux de défaillance moteur.

2) En tenant compte de l'hypothèse 1, nous avons calculé le taux de défaillance moteur (en supposant que les déposes pour visite générale et inspection de la partie chaude, qui sont théoriquement programmées, sont en fait aléatoires).

3) Le taux d'arrivées des moteurs à l'atelier est fonction du nombre de moteurs opérationnels.

4) Une dépose moteur peut être due à l'une des causes principales suivantes (celles qui reviennent le plus souvent dans l'historique moteurs) :

a) consommation excessive d'huile impliquant une défaillance au niveau de la GEARBOX ;

b) température des gaz d'évacuation (à la sortie du réacteur) anormalement élevée impliquant des problèmes au niveau de la HPT ;

c) inspection de la partie chaude ;

d) révision générale ;

e) autres causes.

Ainsi, chaque type de panne devra avoir sa propre probabilité conditionnelle de défaillance.

5) Les durées de réparation pour un type donné de panne sont considérées comme des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées.

6) Tout moteur réparé est immédiatement envoyé au stock.

7) Tout avion qui doit subir une visite (VV ou GV) se verra déposséder de ses moteurs qui seront alors disponibles au niveau du stock.

8) Il y a autant de Q.E.C que de moteurs.

9) Nous ne prendrons pas en compte les déposes programmées pour changement de pièces à vie limitée (PVL) à cause du fait que leur durée de vie limite est très grande (de 15000 à 20000 heures de vol).

#### Modélisation du système :

Le système représente les ateliers de maintenance (GMP, H400, le banc d'essai). Les composantes principales de ce système sont le stock de moteurs de rechange (ressources) et les moteurs déposés.

Nous avons trois types d'entités qui peuvent circuler dans le système. Ces entités sont :

- 1) un moteur JT8D provenant d'un B-737 ;
- 2) un moteur JT8D provenant d'un B-727 ;
- 3) un avion subissant une grande visite ;
- 4) un avion subissant une visite de vieillissement.

Ces entités vont être caractérisées par un certain nombre d'attributs (date d'entrée en atelier, type d'avion, type de visite avion, nombre de ressources demandées, ...etc).

Dans la modélisation de ce système, nous avons utilisé une approche par processus. Nous avons donc procédé à la conception du réseau SLAM (modèle final) correspondant au système à simuler, dont les caractéristiques générales sont:

#### 1) Noeuds de création:

\* un noeud de création de l'entité JT8D provenant d'un B-727 avec un TBC égal à  $USERF(1)$ , où  $USERF(1)$  est une valeur échantillonnée à partir d'une distribution exponentielle de paramètre égal au taux de défaillance moteur multiplié par le nombre de B-727 opérationnels multiplié par trois (un B-727 est équipé de trois moteurs JT8D). Cette fonction est traduite par un sous-programme FORTRAN.

\* un noeud de création de l'entité JT8D provenant d'un B-737 avec un TBC égal à  $USERF(2)$ , où  $USERF(2)$  est une valeur échantillonnée à partir d'une distribution exponentielle de paramètre égal au taux de défaillance moteur multiplié par le nombre de B-737 opérationnels multiplié par deux (un B-737 est équipé de deux moteurs JT8D).

\* un noeud de création des arrivées des avions pour subir une VV ou une GV avec un TBC égal à  $USERF(3)$ , où  $USERF(3)$  prend ses valeurs dans une matrice où sont stockés les potentiels (temps) restants des avions pour une VV ou une GV des avions.

#### 2) Ressources:

Une seule ressource a été définie : les moteurs JT8D de rechange.

3) Activités :

Les activités sont au nombre de 13 (en excluant les activités de branchement). Elles sont explicitées dans le tableau ci-dessous.

N°	TYPE d'activité	NATURE de l'activité	LOI ou DUREE de l'activité
01	Dépose moteur	Déterministe	1 journée
02	Déséquipement QEC	Aléatoire	TRIAG(6.3,7,9.1)
03	Révision générale	//	TRIAG(85.5,95,123.5)
04	HSI	//	TRIAG(13.5,15,19.5)
05	REPAIR_PANNE_FOD	//	TRIAG(36,40,52)
06	REPAIR_PANNE_GRB	//	TRIAG(18,20,26)
07	REPAIR_AUTRE_PANNE	//	TRIAG(40.5,45,58.5)
08	BANC D'ESSAI	//	TRIAG(6.3,7,9.1)
09	EQUIPE_QEC	//	TRIAG(6.3,7,9.1)
10	VV	//	TRIAG(15,18,21)
11	ESSAI_AVION_VV	//	TRIAG(3,5,7)
12	GV	//	TRIAG(60,80,90)
13	ESSAI_AVION_GV	//	TRIAG(3,5,7)

Les distributions triangulaires des durées des activités aléatoires ont été choisies pour les mêmes raisons que celles des activités aléatoires dans le modèle traitant le CF6.

4) Files d'attente :

- Le réseau dispose de 7 files d'attentes dont :
- \* 1 noeud "AWAIT" pour la ressource moteur ;
  - \* 6 noeuds "QUEUE".

5) Priorités :

Nous avons utilisé deux règles de priorités au niveau de la file de l'"AWAIT" pour la ressource moteur de rechange.

- \* Un B-727 demandant un moteur de rechange est

prioritaire sur un B-737 demandant lui aussi un moteur de rechange. La capacité de transport d'un B-727 est supérieure à celle d'un B-737.

\* Un avion demandant un moteur de rechange est prioritaire sur l'avion, terminant une VV ou une GV, en demandant deux ou trois.

#### 6) Variables :

Nous avons utilisé huit variables qui sont définies comme suit :

\* deux variables basées sur le temps :

XX(1) = nombre d'avions opérationnels à un instant donné, et

XX(2) = nombre de moteurs défectueux à un instant donné.

\* six variables basées sur les observations :

XX(3) = nombre de moteurs déposés,

XX(4) = nombre total de révisions générales,

XX(5) = nombre total d'inspections de la partie chaude,

XX(6) = nombre total de pannes dues à un FOD,

XX(7) = nombre total de pannes dues à la GEAR-BOX, et

XX(8) = nombre total de pannes dues à d'autres causes.

Ceci étant les caractéristiques générales du réseau SLAM représentant le système objet de l'étude. Le réseau ainsi que la transcription informatique se trouve en annexe [Modèle JT8D].

Conclusion: La procédure de modélisation du moteur du type JT8D a été plus facile et moins longue relativement à l'investissement considérable en temps alloué à la modélisation du moteur du type CF6.

II-4- Identification, collecte et ajustement des données d'input :II-4-1- Identification des données:

La liste exhaustive des paramètres d'input à estimer est la suivante:

a) Distribution des défaillances moteurs:

Le problème consiste à trouver la distribution des temps de bon fonctionnement du moteur JT8D pour pouvoir modéliser les distributions des temps entre création des entités JT8D.

b) Distribution des durées de service:

Ce sont les durées de service concernant les activités sus-cités.

c) Identification des différentes probabilités conditionnelles de défaillance moteur :

Ces probabilités concernent les différents types de panne du moteur requis pour déterminer les branchements correspondants dans le réseau. Nous avons défini six causes de dépose moteur possibles. Nous nous proposons de déterminer la probabilité qu'un moteur est déposé pour une cause donnée.

II-5-2- Collecte et ajustement du TBF JT8D :

\* Collecte des TBF : Ces temps sont relevés lors de chaque dépose moteur par les travailleurs du département propulsion/service réacteurs/section PRATT & WHITNEY. Nous avons considéré un historique de 26 moteurs (toutes séries confondues). Nous avons recensé 142 observations, pour lesquelles nous avons appliqué le test d'ajustement du Khi-deux.

\* Regroupement et agrégation :

$$r \geq 1 + 3.3 \log(142) = 8.10 \quad \Rightarrow \quad r = 9.$$

On obtient les résultats suivants regroupés par classe :

TBF	n <sub>i</sub>
0 - 900	15
900 - 1400	16
1400 - 1800	18
1800 - 2500	17
2500 - 3200	15
3200 - 3900	18
3900 - 4470	13
4470 - 4600	15
4600 - 6000	16

L'ajustement de la distribution des durées de vie à une loi exponentielle a été rejeté par le test du Khi-deux.

Mais nous avons quand même fait l'hypothèse d'une loi exponentielle de paramètre : MTBF = 2777,37 heures de vol, soit un taux de défaillance égal à 0.36 défaillances par 1000 heures de vol (0.0018 def/jour). Cette hypothèse a été prise pour les simplifications qu'elle apporte au niveau de la modélisation du processus d'arrivées des moteurs JT8D défaillants.

#### II-4-3- Distribution des durées des activités :

Le choix de la distribution des durées des activités ainsi que le calcul des paramètres de la loi ont fait de la même manière que pour les durées des activités du modèle traitant de la disponibilité des Airbus et Boeing 767.

#### II-4-4- Identification et calcul des différentes probabilités de branchements :

L'estimation des différentes probabilités s'est faite sur les données relatives aux causes de déposes moteurs. Ces données ne concernent que les déposes qui ont eu lieu à partir de 1981, année à partir de laquelle la flotte des Boeing 727 et 737 s'est relativement stabilisée.

Pour la période allant de 1981 au 15/3/1991, nous avons recensé 512 déposes moteurs (suivies d'interventions), dont :

- \* 201 pour inspection de la partie chaude (HSI) ;
- \* 115 pour révision générale ;
- \* 42 interventions sur la Gear-Box ;
- \* 39 déposes dûes à un FOD ;
- \* 115 déposes pour raisons diverses ;

Les différentes probabilités de branchement sont consignées dans le tableau suivant :

Cause de la dépose moteur	Probabilité de branchement
Révision générale	0.393
HSI	0.225
FOD	0.075
Gear-Box	0.082
Autres	0.225

De la même manière que pour le modèle CF6, il nous faut maintenant valider notre le modèle JT8D.

I-5- Vérification et validation du modèle:

De même que pour le modèle CF6, ces deux étapes, cruciales dans le processus de simulation, vont nous permettre de statuer sur les performances du modèle JT8D du point de vue de sa capacité à refléter fidèlement le système qu'il est sensé décrire.

II-5-1- Vérification du modèle:

La procédure de vérification de la transcription du modèle JT8D a été menée de la même manière que pour le modèle CF6. Pour mener à terme cette étape du processus de simulation, nous avons utilisé les deux techniques déjà citées (le tracing et la vérification progressive des modèles intermédiaires), à l'issue desquelles nous pensons que notre modèle est assez représentatif du système étudié.

II-5-2- La validation du modèle:

Comme cité précédemment, la validation constitue le véritable banc d'essai du modèle, sans laquelle aucun modèle ne peut être déclaré conforme au système qu'il est sensé décrire. Comme pour la validation du modèle CF6, nous allons utiliser l'approche de Naylor et Finger pour valider le modèle JT8D.

Nous savons qu'un modèle de simulation est validé relativement à un ensemble spécifique de critères de performances du système. Dans notre cas les critères de validation sont:

- la disponibilité de la flotte Boeing 727 et 737,
- la disponibilité des B-727, et
- la disponibilité des B-737.

a) La phase qualitative de validation:

Elle correspond à la première phase de l'approche de Naylor et Finger. Il s'agit de s'assurer que le modèle développé est suffisamment représentatif aux yeux des commanditaires de l'étude (Direction du H400). Cette phase a été menée parallèlement au processus de modélisation et nous a permis le choix d'un niveau de détails pour lequel nous avons pu modéliser le système.

b) Analyse de sensibilité sur les paramètres du modèles:

Les paramètres sur lesquels a porté l'analyse de sensibilité de notre modèle sont:

- \* taux de défaillance des moteurs JT8D,
- \* les MTTRs moteur,
- \* le niveau de stock de moteurs de rechange (la ressource considéré).

1) Analyse de sensibilité sur le Taux de défaillance JT8D:

- Durée de simulation: 5000 jours,
- paramètre, Taux de défaillance du moteur JT8D,
- valeur de référence:  $TxDef = 180 E^{-5}$  def/jour,
- intervalle de variation:  $0.001 \leq TxDef \leq 0.003$ , et
- aucune ressource disponible au H400.

Les variations d'output obtenues sont consignées dans le tableau 9 de l'annexe Résultats. Notons que chaque résultat est la moyenne des résultats obtenus à partir de six exécutions indépendantes (issues d'un "seed" différent).

Comme on peut le voir sur la figure (9), le taux de défaillance, a une influence directe sur la disponibilité de la flotte Boeing. Nous remarquons aussi que la disponibilité des B-727 n'est pas trop affectée par la variation du taux de défaillance. Cette relation est tout à fait logique du fait que les demandes émises pour les moteurs de rechange par les B-727 sont prioritaires sur celles des B-737 (pour des raisons de capacités). En ce qui concerne la flotte des Boeing, la tendance de la disponibilité est à la baisse lorsque le taux de défaillance augmente. Notons enfin qu'une

diminution moyenne de  $1 \text{ E-}4$  def/jour du taux de défaillance entraîne un gain de disponibilité de l'ordre de 1.9% .

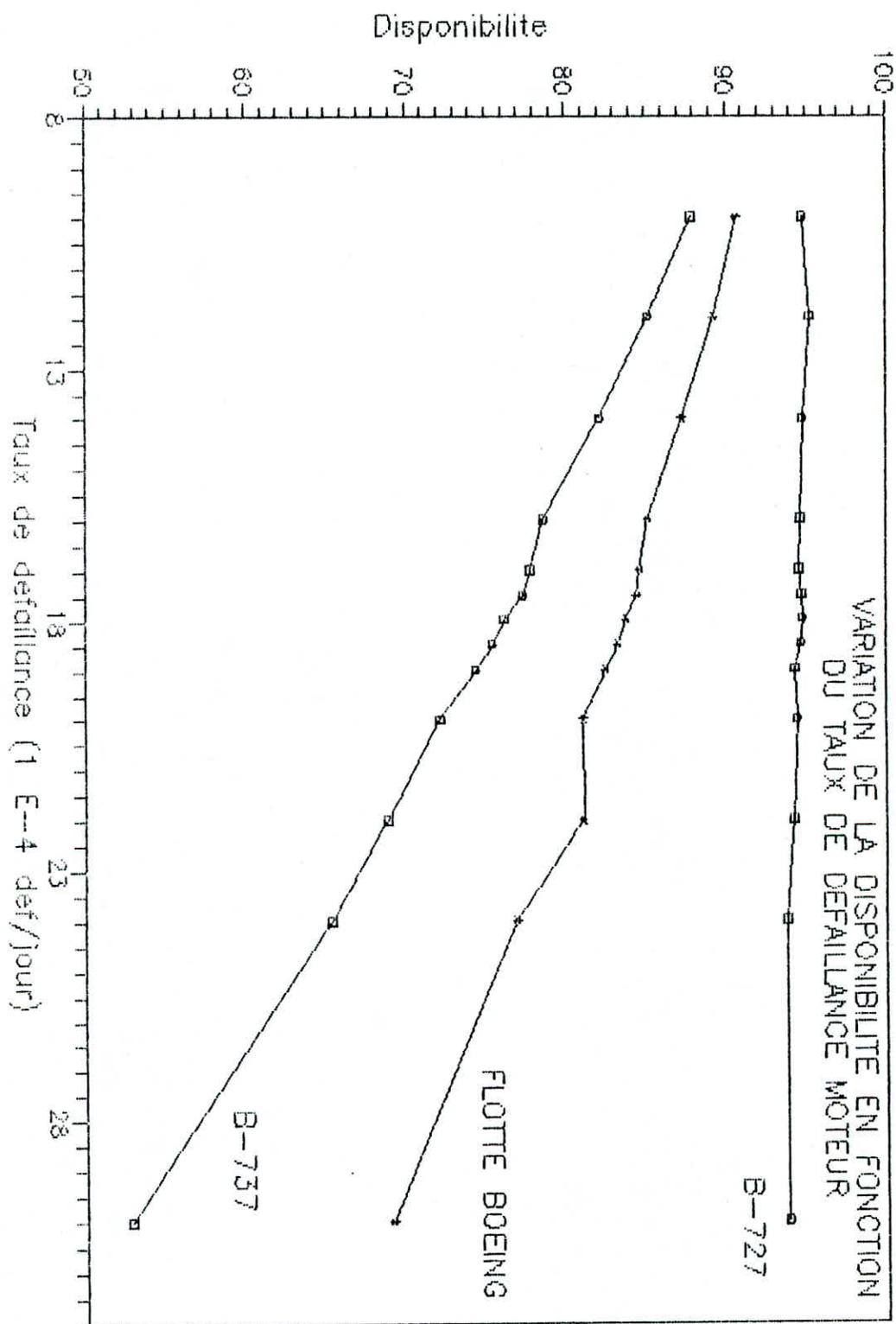


Figure 9

11) Analyse de sensibilité sur les MTTRs moteur:

- Durée de simulation: 5000 jours,
- paramètre: durée moyenne de réparation moteur,
- valeurs de références: DUREE\_MOY\_RG = 95 jours,  
                                   DUREE\_MOY\_HSI = 15 jours,  
                                   DUREE\_MOY\_FOD = 40 jours,  
                                   DUREE\_MOY\_GRB = 20 jours, et  
                                   DUREE\_MOY\_DIV = 45 jours.
- écart par rapport à la moyenne:  $-10 \leq \text{ECART} \leq 10$ , et
- aucune ressource disponible au H400.

Les résultats sont consignés dans le tableau 10 (Annexe résultats).

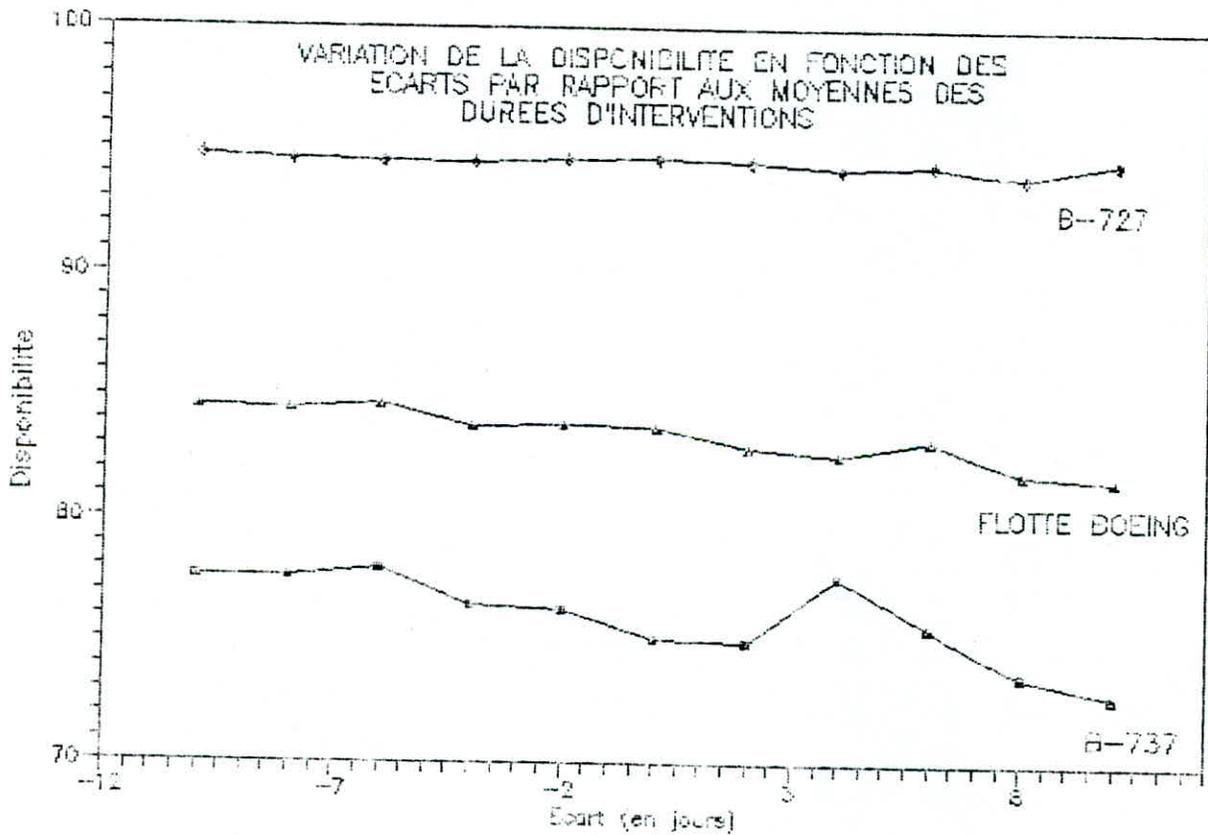


Figure 10

L'effet des durées moyennes d'interventions sur les moteurs apparait clairement sur la figure 10, où nous remarquons la tendance à la baisse de la disponibilité de la flotte lorsque les moyennes des temps d'interventions tendent à augmenter. Nous remarquons toujours l'effet minime d'une variation de ces durées sur la disponibilité des B-727 pour les raisons sus-citées. Notons qu'une augmentation d'une journée dans les durées d'interventions entraîne une diminution de la disponibilité de 0.5 %. Déjà, nous pouvons avancer qu'un gain dans la productivité au niveau du H400 permet une amélioration sensible de la disponibilité de la flotte d'AH.

iii) Analyse de la sensibilité sur le nombre de moteurs de rechanges

- Durée de la simulation: 5000 jours,
- paramètre à varier: \* nombre de moteurs JT8D de rechange
- Valeur de référence: Nbre de JT8D = 23,
- intervalle de variation: \*  $0 < NJT8D < 30$ , et

Les résultats sont consignés dans le tableau de la section II-6.

En consultant la figure 11, nous remarquons que la disponibilité des avions augmente avec le nombre de moteurs de rechange, puis tend à stagner à partir d'un certain niveau de moteurs de rechange. Une fois encore, apparaît la nécessité d'un calcul économique rigoureux des niveaux de stocks de moteurs. En effet à partir d'un certain seuil les moteurs n'auront plus aucun effet sur la disponibilité, rendant par là même un investissement supplémentaire en stock inopportun.

c) La deuxième phase quantitative de validation:

Il nous a été impossible d'appliquer cette procédure à notre modèle du fait de données de référence, vu que le système étudié n'est encore qu'un projet en état de réalisation.

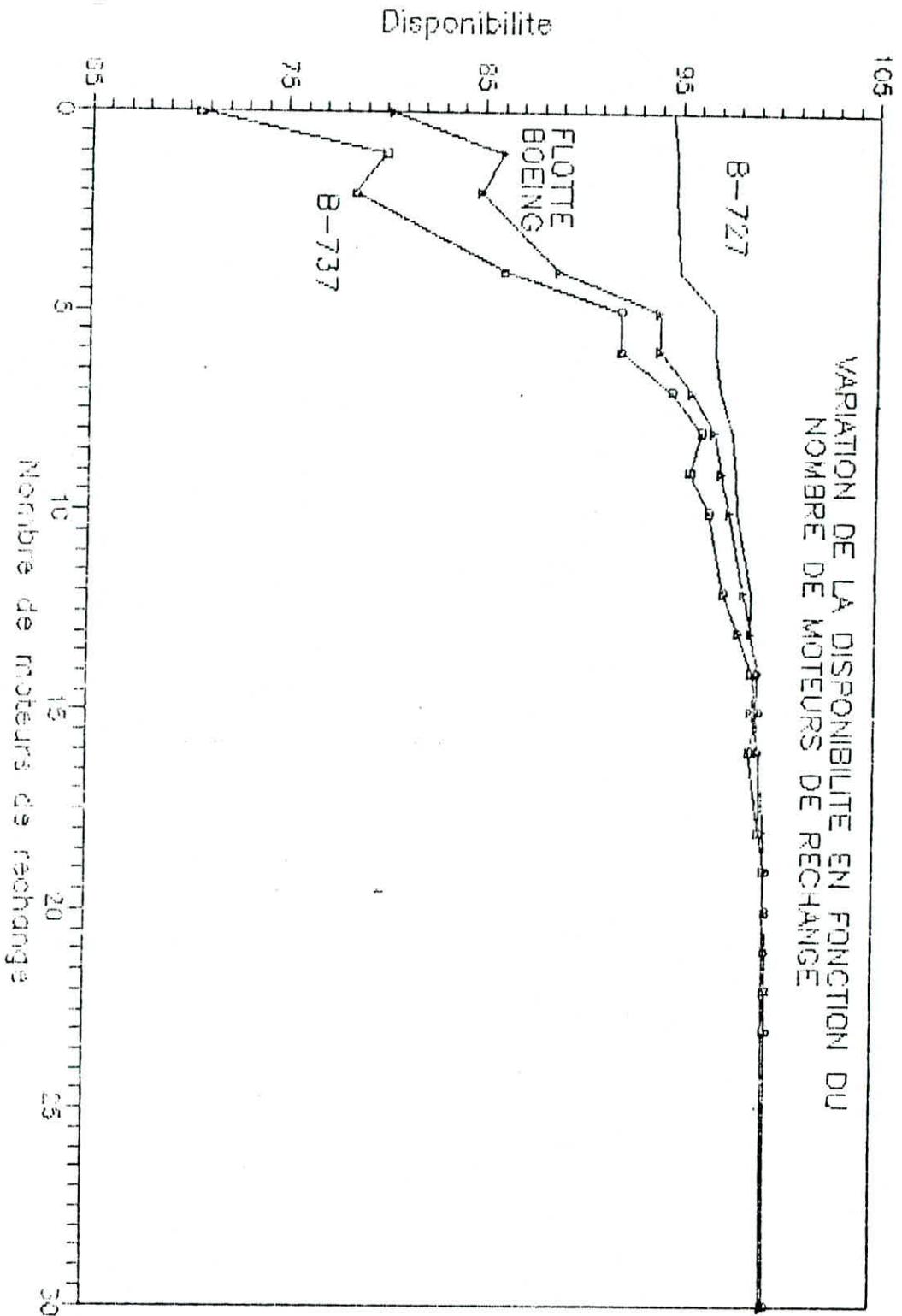


FIGURE 11

Conclusion: Malgré le fait que l'approche de validation de Naylor et Finger n'a pu être menée complètement à terme pour ce modèle (ceci est dû à l'indisponibilité des micro-ordinateurs durant la dernière phase de l'étude). Mais au vu de la validation qualitative, de la complexité réduite du

modèle et de la modeste expérience acquise, nous pouvons affirmer que notre modèle est une représentation assez fidèle (relativement aux objectifs de l'étude) du système étudié.

#### II-6- Présentation et interprétation des résultats :

Comme évoqué précédemment, le choix des conditions initiales est un paramètre décisif quant à la fiabilité des résultats. Pour notre part, nous avons choisis comme conditions initiales la situation de la flotte au 15/3/91.

pour les raisons sus-citées, nous n'avons pu effectuer, pour certains niveaux de stock de rechange, qu'une seule exécution. Ce qui fait qu'on a obtenu des estimateurs ponctuels des disponibilités, mais qui restent assez fiables au vu du grand nombre d'observations relevées (de l'ordre de 450).

La durée de la simulation a été fixée à 5000 jours.

Les résultats des différentes exécutions sont consignés dans le tableau suivant.

Remarque: Actuellement AIR-ALGERIE dispose de vingt trois moteurs JT8D de rechange pour lesquels nous avons tenu à calculer les mesures de performances fixées.

Niveaux de moteurs JT8D de rechange	Disponibilité B-727 en %	Disponibilité B-737 en %	Disponibilité de la flotte Boeing en %
0 moteur	94.56	70.50	80.30
1 moteur	94.72	78.42	84.85
2 moteurs	94.74	79.99	85.99
4 moteurs	94.93	86.08	88.82
5 moteurs	96.79	92.04	93.97

6 moteurs	96.79	92.04	93.97
7 moteurs	97.07	94.64	95.63
8 moteurs	97.71	96.15	96.79
9 moteurs	96.94	95.56	96.12
10 moteurs	98	97.32	97.60
12 moteurs	98.74	98.09	98.35
13 moteurs	98.77	98.78	98.77
14 moteurs	99.14	99.18	99.16
15 moteurs	98.90	98.70	98.78
16 moteurs	99.20	99.20	99.20
18 moteurs	99.31	99.56	99.46
19 moteurs	99.47	99.58	99.47
20 moteurs	99.47	99.60	99.58
21 moteurs	99.50	99.65	99.59
22 moteurs	99.50	99.68	99.60
23 moteurs	99.52	99.68	99.61
30 moteurs	99.52	99.68	99.61

Au vu de ces résultats, nous remarquons qu'un niveau de stock de moteurs JT8D supérieur ou égal à huit nous permet d'avoir une disponibilité dépassant l'objectif assigné qui est de 96% (tous les autres paramètres sont fixés à leurs valeurs de référence).

La première remarque qui s'impose est la grande différence entre le nombre de moteurs de rechange, disponibles actuellement à Air-Algérie (23), et celui pouvant assurer la disponibilité souhaitée (8). Ce qui confirme encore plus l'opportunité d'une telle étude.

A cet effet, nous présentons maintenant quelques suggestions liées à la politique d'approvisionnement au niveau du H400.

Suggestions :

1ère suggestion : Vendre un certain nombre de moteurs et acquérir en contre-partie des stocks de composants de rechange.

2ème suggestion : Dans le cas d'une impossibilité de vente des moteurs, AIR-ALGERIE pourrait louer ces moteurs aux compagnies aériennes des pays voisins.

3ème Alternative : L'acquisition (peu probable) de nouveaux Boeing 727 et 737 sans moteurs de rechange.

Ceci conclue la deuxième et dernière partie de notre étude portant sur la détermination des niveaux de stocks appropriés, permettant d'assurer une disponibilité fixée par les responsables d'AH.

V- CONCLUSION ET SUGGESTIONS:

A l'issue de cette étude, nous avons pu tirer un certain nombre d'enseignements dont les plus importants sont:

1- Dans le cadre du H400 et pour un objectif de disponibilité fixée à 96 %, Air-Algérie devra disposer des stocks suivants :

- \* un moteur CF6A3,
- \* un moteur CF6C2,
- \* une turbine haute pression pour le CF6A3, et
- \* huit moteurs JT8D.

2- La nécessité d'un calcul économique rigoureux des niveaux de stocks de rechange et surtout lorsqu'il s'agit d'articles de valeur. En effet et à travers notre étude, nous avons pu constater l'effet, néfaste sur la situation financière de l'entreprise, d'une surestimation des niveaux de stocks. Pour avoir un ordre de grandeur et dans le cadre du H400 : si l'entreprise AIR-ALGERIE garde les moteurs, que nous considérons comme des surstocks (1 CF6A3, 2 CF6C2 et 15 JT8D qui valent respectivement 6, 6 et 2.5 Millions de dollars l'unité), pour une disponibilité fixée à 96%, ceci équivaldrait à un surinvestissement, de 55.5 millions de dollars en stocks, incompatible avec les objectifs de l'entreprise.

3- L'importance d'un calcul économique de ce genre a fait, et comme nous l'avons vu à travers la revue de littérature, qu'il y a un grand nombre de travaux traitant ce type de problème et dont la majorité a été initiée par l'armée américaine. Vue l'originalité de l'étude, cette partie a été détaillée dans le but de servir de support pour de prochaines études de ce genre.

4- La simulation est un outil puissant d'investigations et de résolutions de problèmes aussi complexes que variées. Cet outil permet à un gestionnaire d'évaluer immédiatement les effets d'une politique sur un système donné. Mais en contrepartie, cet outil nécessite un investissement considérable en temps et en efforts. De plus cette étude nous a permis d'acquérir et de maîtriser, à un certain niveau, le langage de simulation utilisée, le SLAM II.

5- L'objectif premier de l'étude était l'élaboration d'un modèle implémenté sur micro-ordinateur, qui permet l'évaluation des niveaux de stocks de moteurs de rechange assurant une certaine disponibilité de la flotte avions d'AIR-ALGERIE. Notre travail a consisté en l'élaboration de deux modèles distincts de simulations, qui nous ont permis, nous pensons, d'atteindre l'objectif de l'étude.

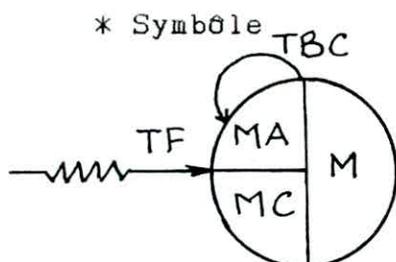
6- En plus de l'aspect théorique du problème que nous avons tenu à ne pas négliger, nous avons tenté, dans la mesure du possible, d'exploiter nos modèles afin d'analyser les effets de certaines variables de contrôle sur le système étudié. Ces études sensibles ont montré que Air-Algérie n'aura pas à faire d'investissements supplémentaires en moteurs et pièces de rechange.

7- Lors de notre étude, nous avons eu à constater l'importance des techniques de recherche opérationnelles dans le transport aérien. A cet effet, nous suggérons aux responsables la création d'un département de R.O au niveau d'Air-Algérie qui pourrait prendre en charge de nombreux problèmes se posant.

Finalement, notons que notre étude peut et devrait faire l'objet de futures développements et prolongements. On pourrait, ainsi, pousser encore plus loin les investigations, surtout en ce qui concerne le modèle JT8D,

en cas de disponibilité future de certaines données et d'une version de SLAM plus puissante.

Une étude technico-économique portant sur l'aspect financier de notre problème, qui consisterait à déterminer le meilleur rapport disponibilité/investissement en analysant la rentabilité de l'entreprise en fonction de la disponibilité de la flotte, qui est elle même fonction des investissements en stocks.

PRESENTATION DES OUTILS DE MODELISATION DU SLAMa) Le "create node" ou noeud de création:

\* Déclaration Slam

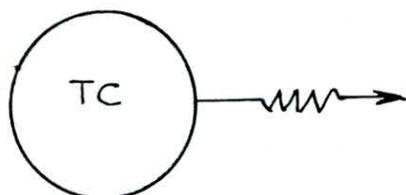
CREATE, TBC, TF, MA, MC, M;

Le noeud de création génère les entités et les dirige dans le système le long des activités émanant de ce noeud.

Le temps de la première entité créée par ce noeud est spécifié par la variable TF. Le temps entre création des entités est spécifié par la variable TBC, qui peut être une constante, une variable SLAM ou une variable aléatoire SLAM. Les entités continueront à être créées jusqu'à ce qu'une certaine limite soit atteinte. Cette limite est spécifiée par MC, le nombre maximum de créations permis par ce noeud. L'instant de création de l'entité est enregistré sur le MAième attribut de cette entité.

b) Le "Terminate node" ou noeud de destruction:

\* Symbole



\* Déclaration SLAM

TERMINATE, TC;

Ce noeud est destiné à détruire les entités arrivant à son niveau. Lorsque le nombre d'entités détruites atteint TC, la simulation est stoppée. Si la valeur de TC n'est pas spécifiée, elle est égale implicitement à l'infini. Autrement dit: TC constitue un critère d'arrêt de la simulation.

c) Le "Queue node" ou noeud d'attente:

\* Symbole



\* Déclaration SLAM

QUEUE(IFL), IQ, QC, BLOCK ou  
BALK(NLBL), SLBL;

Dans l'attente d'un service, les entités sont stockées au niveau de la file n°= IFL et cela jusqu'à ce que le serveur soit disponible.

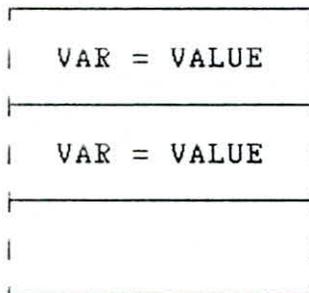
Au début de la simulation, la file contient IQ entités et sa capacité maximale est fixée à QC.

L'option BLOCK ou BALK définit le sort d'une entité arrivant au niveau d'une file dont la capacité QC est atteinte. La spécification BLOCK maintiendra l'entité engagée dans l'activité précédant le noeud QUEUE. Elle ne rejoindra la file que lorsque le nombre d'entités présentes dans cette dernière sera devenu inférieur à QC.

La spécification BALK permet d'orienter l'entité refoulée par la file vers le noeud dont le label est NLBL. Le label SLBL est celui du "SELECT NODE" ou noeud de sélection en rapport avec le noeud QUEUE.

d) "ASSIGN node" ou noeud d'assignation:

\* Symbole



\* Déclaration SLAM

ASSIGN, VAR=VALUE, ..., M;

Le noeud d'assignation est utilisé pour assigner des valeurs aux attributs d'une entité passant à travers ce

noeud ou pour assigner des valeurs aux variables du système se rapportant au réseau en général.

La valeur assignée à une variable dans ce noeud peut être une constante, le temps courant, un échantillon d'une loi de probabilité, ou une valeur fixée par une fonction établie par l'utilisateur.

e) Le "SERVICE activity" ou activité de service:

\* Symbôle

\* Déclaration SLAM

DUR, PROB  
----->  
N A

ACTIVITY(N)/A,DUR,PROB ou  
COND,NLBL;ID

Une activité de service émane toujours d'un "QUEUE node". Elle est utilisée en conjonction avec ce noeud pour modéliser le service à N serveurs (ayant même durée de service) en parallèle.

Le numéro de l'activité est spécifiée par A (un entier);

DUR est la durée spécifiée pour cette activité;

PROB est la probabilité spécifiée pour sélectionner cette activité. COND dans le cas d'une activité conditionnelle;

NLBL est le label du noeud, il n'est requis que dans le cas où le noeud destination n'est pas le prochain noeud listé;

ID est utilisé pour fournir une description textuelle de l'activité.

f) "REGULAR activity" ou branche de connection:

\* Symbôle

\* Déclaration SLAM

DUR, PROB ou COND  
----->  
A

ACTIVITY/A,DUR,PROB ou  
COND,NLBL;

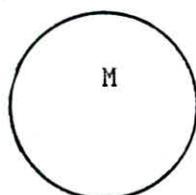
L'activité régulière apparaît dans deux cas:

- lorsque le système est modélisé en termes de ressources, l'activité régulière joue le même rôle que l'activité de service.
- l'activité régulière peut acheminer avec une probabilité PROB ou avec une condition COND, des entités vers des noeuds de label NLBL.

Cet acheminement de l'entité peut être instantané (DUR=0) ou non.

g) "GOON node":

\* Symbole



\* Déclaration SLAM

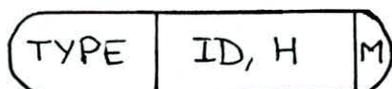
GOON, M;

Le GOON node est utilisé pour modéliser des activités séquentielles ( $M = 1$ ), ou bien parallèles ( $M > 1$ ).

Notons que lorsque une entité arrive au niveau de ce noeud et que  $M$  est égale à 2, par exemple, l'entité est dédoublée. C'est à dire qu'il y aura deux entités identiques à la sortie de ce noeud.

h) "COLCT node" ou noeud de collecte:

\* Symbole



\* Déclaration SLAM

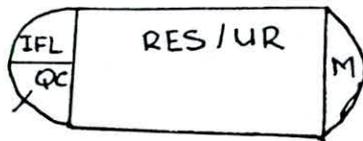
COLCT(N), TYPE, ID, NCEL/  
HLOW/HWID, M;

Ce noeud permet de collecter des statistiques sur un type donné de variables. On l'identifie par un numéro de code  $N$ . La variable est identifiée par  $ID$ . Un histogramme peut être tracé sur la variable  $ID$  et l'on s'en doit de spécifier les caractéristiques.  $NCEL$  est le nombre

d'intervalles; HLOW est la limite inférieure du premier intervalle; et la longueur de l'intervalle est HWID.

i) "AWAIT node" ou noeud d'attente ressource:

\* Symbôle



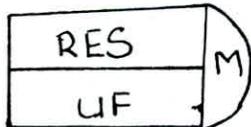
\* Déclaration SLAM

AWAIT(IFL/QC),RES/UR,M;

L'entité arrivant à l'AWAIT node attend au niveau de la file IFL de capacité QC, UR unités de ressources. M est le nombre de branches émanant de ce noeud.

j) "FREE node" ou noeud de libération de ressources:

\* Symbôle



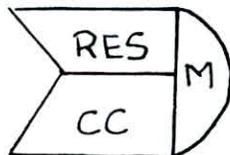
\* Déclaration SLAM

FREE,RES/UF,M;

A chaque passage d'une entité par ce noeud, UF unités de ressources sont libérées et sont de nouveau disponible.

k) "ALTER node" ou noeud d'altération de ressources:

\* Symbôle



\* Déclaration SLAM

ALTER,RES/CC,M;

Ce noeud est utilisé pour changer la capacité d'une ressource de type RES de CC unités. CC peut être une constante ou une variable SLAM. Si CC est positif, le nombre d'unités de ressources disponibles augmente de CC unités. Sinon, il est diminué de CC unités.

```

GEN,BAH,CF6AH,25/05/1991,6,,,,,1;
LIM,27,5,905;
PRIORITY/1,LVF(2)/2,LVF(2);
;
;-----Définition des Variables-----
;
EQUIVALENCE/XX(1),NBR_A310_OPE/XX(2),NBR_B767_OPE;
EQUIVALENCE/XX(19),NBR_A3_INOP;
EQUIVALENCE/XX(20),NBR_CE_INOP/XX(21),NRT1/XX(22),NRT2;
EQUIVALENCE/XX(23),IDA1/XX(24),VVA1/XX(25),GVA1;
EQUIVALENCE/XX(26),IDA2/XX(27),VVA2/XX(28),GVA2;
EQUIVALENCE/XX(29),IDB1/XX(30),VVB1/XX(31),GVB1;
EQUIVALENCE/XX(32),IDB2/XX(33),VVB2/XX(34),GVB2;
EQUIVALENCE/XX(35),IDB3/XX(36),VVB3/XX(37),GVB3;
;
;-----Initialisation des Variables-----
;
INTLC,XX(1)=2,XX(2)=3,,XX(3)=0,XX(4)=0,XX(5)=0,XX(6)=0;
INTLC,XX(7)=0,XX(8)=0,XX(9)=0,XX(10)=0,XX(11)=0,XX(12)=0;
INTLC,XX(13)=0,XX(14)=0,XX(15)=0,XX(16)=0,XX(17)=0;
INTLC,XX(18)=0,XX(19)=0,XX(20)=0,XX(21)=5,XX(22)=7;
INTLC,XX(23)=1,XX(24)=253,XX(25)=1513,XX(26)=2;
INTLC,XX(27)=653,XX(28)=1853XX(29)=3,XX(30)=987;
INTLC,,XX(31)=2187,XX(32)=4,XX(33)=1145;
INTLC,XX(34)=2345,XX(35)=5,XX(36)=1874,XX(37)=3074;
;
;-----Déclaration des Variables basées sur le Temps-----
;
TIMST,XX(1),NBR_A310_OPE,45,0,100;
TIMST,XX(2),NBR_B767_OPE,45,0,100;
TIMST,NNQ(1),Nbre d'AIRBUS en attente;
TIMST,NNQ(10),Nbre de B767 en attente;
;-----Réseau-----
;
NETWORK;
;-----Ressources-----
;
RES/CF6A3(1),1/FAN_A3(0),2/HPC_A3(0),3/CRF_A3(0),4/CC_A3(0),5;
RES/HPT_A3(0),6/LPT_A3(0),7;
RES/TRF_A3(0),8/GRB_A3(0),9;
RES/CF6C2(1),10/FAN_C2(0),11/HPC_C2(0),12/CRF_C2(0),13;
RES/CC_C2(0),14;
RES/HPT_C2(0),15;
RES/LPT_C2(0),16/TRF_C2(0),17/GRB_C2(0),18;
;
;-----Création des pannes de CF6A3-----
;
A CREATE,USERF(1),0,1,,1;
ASSIGN,TRIB(2)=1,TRIB(3)=10,1;
ASSIGN,TRIB(5)=XX(21)-XX(19),1;
ACT,,TRIB(5).LE.1,DE;
ACT,,ZE;
DE ASSIGN,XX(19)=XX(19)-1,1;
TERM;
ZE ASSIGN,XX(1)=XX(1)-1,1;

```

```
ACT,,,DES;
;
; ----- Création des pannes de CF6C2 -----
;
C   CREATE,USERF(2),46,1,,1;
    ASSIGN,ATRIB(2)=1,ATRIB(3)=20,1;
    ASSIGN,ATRIB(5)=XX(22)-XX(20),1;
    ACT,,,ATRIB(5).LE.1,WE;
    ACT,,,XE;
WE  ASSIGN,XX(20)=XX(20)-1,1;
    TERM;
XE  ASSIGN,XX(2)=XX(2)-1,1;
;
; ----- Debut des opérations -----
;
DES  GOON,1;
     ACT(1)/1,1;DIAG_&_DEPOSE
     GOON,2;
     ACT,,,Q1;
     ACT,,,AS;
Q1  QUEUE(19);
     ACT(1)/2,RNORM(2,0.2),,GO;DESEQ_QEC
AS  GOON,1;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.20,C267;
     ACT;
A310 AWAIT(1/10),CF6A3/ATRIB(2),,1;
     ACT;
     ASSIGN,XX(1)=XX(1)+1,1;
     ACT;
     COLCT,XX(1),NBR_A310_OPE,50/0/60,1;
     ACT,,,YO;
C267 AWAIT(10/10),CF6C2/ATRIB(2),,1;
     ACT;
     ASSIGN,XX(2)=XX(2)+1,1;
     ACT;
     COLCT,XX(2),NBR_B767_OPE,50/0/60,1;
YO  GOON,1;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.11,SV;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.21,SV;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.12,SG;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.22,SG;
     ACT;
     TERM;
GO  GOON,1;
     ACT;
Q2  QUEUE(20);
     ACT;
     GOON,1;
     ACT,,,ATRIB(3).EQ.20,LE;
     ACT(1)/3,RNORM(2,0.2),0.0794,G1;DESEQ_FAN
     ACT(1)/4,RNORM(2,0.2),0.1555,G2;DESEQ_HPC
     ACT(1)/5,RNORM(2,0.2),0.0254,G3;DESEQ_CRF
     ACT(1)/6,RNORM(2,0.2),0.2813,G4;DESEQ_CC
     ACT(1)/7,RNORM(2,0.2),0.3822,G5;DESEQ_HPT
     ACT(1)/8,RNORM(2,0.2),0.0318,G6;DESEQ_LPT
     ACT(1)/9,RNORM(2,0.2),0.0222,G7;DESEQ_TRF
```

```

LE      ACT(1)/10,RNORM(2,0.2),0.0222,G8;DESEQ_GRB
        GOON,1;
        ACT(1)/3,RNORM(2,0.2),0.0910,G1;DESEQ_FAN
        ACT(1)/4,RNORM(2,0.2),0.2159,G2;DESEQ_HPC
        ACT(1)/5,RNORM(2,0.2),0.0057,G3;DESEQ_CRF
        ACT(1)/6,RNORM(2,0.2),0.0398,G4;DESEQ_CC
        ACT(1)/7,RNORM(2,0.2),0.5568,G5;DESEQ_HPT
        ACT(1)/8,RNORM(2,0.2),0.0057,G6;DESEQ_LPT
        ACT(1)/9,RNORM(2,0.2),0.0340,G7;DESEQ_TRF
        ACT(1)/10,RNORM(2,0.2),0.0511,G8;DESEQ_GRB

```

```
;
```

```
-----FAN-----
```

```
;
```

```

G1      GOON,2;
        ACT(1)/11,USERF(5),,M1;REPAIR_FAN
        ACT;
        GOON,1;
        ACT,,ATRIB(3).EQ.20,F1;
        ACT;
        AWAIT(2/10),FAN_A3,1,,1;
        ACT,,,Q;
F1      AWAIT(11/10),FAN_C2,1,,1;
        ACT,,,Q;
M1      GOON,1;
        ACT,,ATRIB(3).EQ.20,F2;
        ACT;
        ASSIGN,XX(3)=XX(3)+1,1;
        FREE,FAN_A3/1,1;
        COLCT,XX(3),Nbre FAN_A3_REP;
        ACT,,,T1;
F2      ASSIGN,XX(4)=XX(4)+1,1;
        FREE,FAN_C2/1,1;
        COLCT,XX(4),Nbre FAN_C2_REP;
T1      TERM;

```

```
;
```

```
-----HPC-----
```

```
;
```

```

G2      GOON,2;
        ACT(1)/12,USERF(6),,M2;REPAIR_HPC
        ACT,,ATRIB(3).EQ.20,H1;
        ACT;
        AWAIT(3/10),HPC_A3,1,,1;
        ACT,,,Q;
H1      AWAIT(12/10),HPC_C2,1,,1;
        ACT,,,Q;
M2      GOON,1;
        ACT,,ATRIB(3).EQ.20,H2;
        ACT;
        ASSIGN,XX(5)=XX(5)+1,1;
        FREE,HPC_A3/1,1;
        COLCT,XX(5),NBRE HPC_A3_REP;
        ACT,,,T2;
H2      ASSIGN,XX(6)=XX(6)+1,1;
        FREE,HPC_C2/1,1;
        COLCT,XX(6),Nbre HPC_C2_REP;
T2      TERM;

```

```
;
;-----CRF-----
;
G3    GOON,2;
      ACT(1)/13,TRIAG(46.8,52,67.6),,M3;REPAIR_CRF
      ACT,,ATRIB(3).EQ.20,CR1;
      ACT;
      AWAIT(4/10),CRF_A3,1,,1;
      ACT,,,Q;
CR1   AWAIT(13/10),CRF_C2,1,,1;
      ACT,,,Q;
M3    GOON,1;
      ACT,,ATRIB(3).EQ.20,CR2;
      ACT;
      ASSIGN,XX(7)=XX(7)+1,1;
      FREE,CRF_A3/1,1;
      COLCT,XX(7),Nbre CRF_A3_REP;
      ACT,,,T3;
CR2   ASSIGN,XX(8)=XX(8)+1,1;
      FREE,CRF_C2/1,1;
      COLCT,XX(8),Nbre CRF_C2_REP;
T3    TERM;
;
;-----CC-----
;
G4    GOON,2;
      ACT(1)/14,USERF(7),,M4;REPAIR_CC
      ACT,,ATRIB(3).EQ.20,CC1;
      ACT;
      AWAIT(5/10),CC_A3,1,,1;
      ACT,,,Q;
CC1   AWAIT(14/10),CC_C2,1,,1;
      ACT,,,Q;
M4    GOON,1;
      ACT,,ATRIB(3).EQ.20,CC2;
      ACT;
      ASSIGN,XX(9)=XX(9)+1,1;
      FREE,CC_A3/1,1;
      COLCT,XX(9),Nbre CC_A3_REP;
      ACT,,,T4;
CC2   ASSIGN,XX(10)=XX(10)+1,1;
      FREE,CC_C2/1,1;
      COLCT,XX(10),Nbre CC_C2_REP;
T4    TERM;
;
;-----HPT-----
;
G5    GOON,2;
      ACT(1)/15,USERF(8),,M5;REPAIR_HPT
      ACT,,ATRIB(3).EQ.20,HP1;
      ACT;
      AWAIT(6/10),HPT_A3,1,,1;
      ACT,,,Q;
HP1   AWAIT(15/10),HPT_C2,1,,1;
      ACT,,,Q;
M5    GOON,1;
```

```

ACT,, ATRIB(3).EQ.20,HP2;
ACT;
ASSIGN,XX(11)=XX(11)+1,1;
FREE,HPT_A3/1,1;
COLCT,XX(11),Nbre HPT_A3_REP;
ACT,,,T5;
HP2  ASSIGN,XX(12)=XX(12)+1,1;
FREE,HPT_C2/1,1;
COLCT,XX(12),Nbre HPT_C2_REP;
T5   TERM;
;
;-----LPT-----
;
G6   GOON,2;
ACT(1)/16,TRIAG(36,40,52),,M6;REPAIR_LPT
ACT,, ATRIB(3).EQ.20,LP1;
ACT;
AWAIT(7/10),LPT_A3,1,,1;
ACT,,,Q;
LP1  AWAIT(16/10),LPT_C2,1,,1;
ACT,,,Q;
M6   GOON,1;
ACT,, ATRIB(3).EQ.20,LP2;
ACT;
ASSIGN,XX(13)=XX(13)+1,1;
FREE,LPT_A3/1,1;
COLCT,XX(13),Nbre LPT_A3_REP;
ACT,,,T6;
LP2  ASSIGN,XX(14)=XX(14)+1,1;
FREE,LPT_C2/1,1;
COLCT,XX(14),Nbre LPT_C2_REP;
T6   TERM;
;
;-----TRF-----
;
G7   GOON,2;
ACT(1)/17,TRIAG(22.5,25,32.5),,M7;REPAIR_TRF
ACT,, ATRIB(2).EQ.2,TR1;
ACT;
AWAIT(8/10),TRF_A3,1,,1;
ACT,,,Q;
TR1  AWAIT(17/10),TRF_C2,1,,1;
ACT,,,Q;
M7   GOON,1;
ACT,, ATRIB(2).EQ.2,TR2;
ACT;
ASSIGN,XX(15)=XX(15)+1,1;
FREE,TRF_A3/1,1;
COLCT,XX(15),Nbre TRF_A3_REP;
ACT,,,T7;
TR2  ASSIGN,XX(16)=XX(16)+1,1;
FREE,TRF_C2/1,1;
COLCT,XX(16),Nbre TRF_C2_REP;
T7   TERM;

```

```

;
;-----GRB-----
;
G8   GOON,2;
     ACT(1)/18,TRIAG(22.5,25,32.5),,M8;REPAIR_GRB
     ACT,,ATRIB(3).EQ.20,GB1;
     ACT;
     AWAIT(9/10),GRB_A3,1,,1;
     ACT,,Q;
GB1  AWAIT(18/10),GRB_C2,1,,1;
     ACT,,Q;
M8   GOON,1;
     ACT,,ATRIB(3).EQ.20,GB2;
     ACT;
     ASSIGN,XX(17)=XX(17)+1,1;
     FREE,GRB_A3/1,1;
     COLCT,XX(17),Nbre GRB_A3_REP;
     ACT,,T8;
GB2  ASSIGN,XX(18)=XX(18)+1,1;
     FREE,GRB_C2/1,1;
     COLCT,XX(18),Nbre GRB_C2_REP;
T8   TERM;
Q    QUEUE(21);
     ACT(1)/19,USERF(9);
;
;-----PASSAGE AU BANC D'ESSAI-----
;
     QUEUE(22);
     ACT(1)/20,TRIAG(6.3,7,9.1);
     GOON,1;
     ACT,,0.02,GO;Banc d'essai
     ACT;
     QUEUE(23);
     ACT(1)/21,3;EQUIP_QEC
     GOON,1;
     ACT,,ATRIB(3).EQ.20,CF6C;
     ACT;
     FREE,CF6A3/1,1;
     ASSIGN,XX(19)=XX(19)-1,1;
     COLCT,XX(19),Nbre A3 en Panne,1;
     TERM;
CF6C FREE,CF6C2/1,1;
     ASSIGN,XX(20)=XX(20)-1,1;
     COLCT,XX(20),Nbre C2 en panne,1;
     TERM;
;
;-----VISITE DE VIEILLESSE-----
;
R    CREATE,USERF(3),253,,1;
     ASSIGN,ATRIB(2)=2,1;
     ACT,,11.EQ.1.OR.11.EQ.2,VV1;
     ACT,,VV2;
VV1  ASSIGN,ATRIB(4)=1,ATRIB(3)=11,1;
     ACT,,XX(19).GE.XX(21),PP1;
     ACT,,PP2;
PP1  ASSIGN,NNQ(1)=NNQ(1)-1,XX(1)=XX(1)+1,1;

```

```

ACT,,,Q4;
PP2  ALTER,CF6A3/2,1;
      ASSIGN,XX(19)=XX(19)+2,1;
      ACT,,,Q4;
VV2  ASSIGN,ATRIB(4)=2,ATRIB(3)=21,1;
      ACT,,XX(20).GE.XX(22),PP3;
      ACT,,,PP4;
PP3  ASSIGN,NNQ(10)=NNQ(10)-1,XX(2)=XX(2)+1,1;
      ACT,,,Q4;
PP4  ALTER,CF6C2/2,1;
      ASSIGN,XX(20)=XX(20)+2,1;
Q4   QUEUE(24);
      ACT(1)/22,TRIAG(40.5,45,58.5);Visite de vieillesse
      GOON,1;
      ACT,,ATRIB(4).EQ.1,UT1;
      ACT,,,UT2;
UT1  ASSIGN,XX(1)=XX(1)-1,1;
      ACT,,,A310;
UT2  ASSIGN,XX(2)=XX(2)-1,1;
      ACT,,,C267;
SV   GOON,1;
      ACT,,ATRIB(4).EQ.2,LIB;
      ACT;
      ASSIGN,XX(19)=XX(19)-2,1;
      ACT,,,Q5;
LIB  ASSIGN,XX(20)=XX(20)-2,1;
Q5   QUEUE(25);
      ACT(1)/23,TRIAG(13.5,15,19.5);Essai_AVION_VV
      GOON,1;
      ACT,,ATRIB(4).EQ.2 ,BIL;
      ACT,,II.EQ.1,PVV1;
      ACT,,,IND1;
PVV1 ASSIGN,XX(25)=TNOW+1200,1;
      ACT,,,A2;
IND1 ASSIGN,XX(28)=TNOW+1200,1;
      ACT,,,A2;
BIL  GOON,1;
      ACT,,II.EQ.3,PVV2;
      ACT,,II.EQ.4,PVV3;
      ACT,,,IND2;
PVV2 ASSIGN,XX(31)=TNOW+1200,1;
      ACT,,,A2;
PVV3 ASSIGN,XX(34)=TNOW+1200,1;
      ACT,,,A2;
IND2 ASSIGN,XX(37)=TNOW+1200,1;
A2   TERM;
;
;-----GRANDE VISITE-----
;
X    CREATE,USERF(4),1516,,,,1;
      ASSIGN,ATRIB(2)=2,1;
      ACT,,II.EQ.1.OR.II.EQ.2,GV1;
      ACT,,,GV2;
GV1  ASSIGN,ATRIB(3)=12,ATRIB(4)=1,1;
      ACT,,XX(19).GE.XX(21),PP5;
      ACT,,,PP6;

```

```
PP5  ASSIGN, NNQ(1)=NNQ(1)-1, XX(1)=XX(1)+1, 1;  
      ACT, , , Q6;  
PP6  ALTER, CF6A3/2, 1;  
      ASSIGN, XX(19)=XX(19)+2, 1;  
      ACT, , , Q6;  
GV2  ASSIGN, ATRIB(3)=22, ATRIB(4)=2, 1;  
      ACT, , XX(20).GE.XX(22), PP7;  
      ACT, , , PP8;  
PP7  ASSIGN, NNQ(10)=NNQ(10)-1, XX(2)=XX(2)+1, 1;  
PP8  ALTER, CF6C2/2, 1;  
      ASSIGN, XX(20)=XX(20)+2, 1;  
QB   QUEUE(26);  
      ACT(1)/24, TRIAG(108, 120, 156); Grande visite  
      GOON, 1;  
      ACT, , ATRIB(4).EQ.1, UT11;  
      ACT, , , UT22;  
UT11 ASSIGN, XX(1)=XX(1)-1, 1;  
      ACT, , , A310;  
UT22 ASSIGN, XX(2)=XX(2)-1, 1;  
      ACT, , , C267;  
SG   GOON, 1;  
      ACT, , ATRIB(4).EQ.2, LIB1;  
      ACT;  
      ASSIGN, XX(19)=XX(19)-2, 1;  
      ACT, , , Q7;  
LIB1 ASSIGN, XX(20)=XX(20)-2, 1;  
Q7   QUEUE(27);  
      ACT(1)/25, TRIAG(54, 60, 78); Essai_AVION_GV  
      GOON, 1;  
      ACT, , ATRIB(4).EQ.2 , BIL1;  
      ACT, , II.EQ.1, PGV1;  
      ACT, , , NID2;  
PGV1 ASSIGN, XX(24)=TNOW+1200, 1;  
      ACT, , , A4;  
NID2 ASSIGN, XX(27)=TNOW+1200, 1;  
      ACT, , , A4;  
BIL1 GOON, 1;  
      ACT, , II.EQ.3, PGV2;  
      ACT, , II.EQ.4, PGV3;  
      ACT, , , IND3;  
PGV2 ASSIGN, XX(30)=TNOW+1200, 1;  
      ACT, , , A4;  
PGV3 ASSIGN, XX(33)=TNOW+1200, 1;  
      ACT, , , A4;  
IND3 ASSIGN, XX(36)=TNOW+1200, 1;  
A4   TERM;  
      END;  
      INIT, 0, 7500;  
;    MONTR, TRACE, 0, 1000;  
      FIN;
```

```

$INCLUDE: 'PRCTL.FOR'
$DEBUG
PROGRAM MAIN
PARAMETER (n=5)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
MFA, MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
SS(100), SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100);
COMMON /UCOM1/ LAM1,LAM2,NMR1,NMR2,NRT1,NRT2,ifan,mfan,sfan,
ihpc,mhpc,shpc,icc,mcc,sc, ihpt,mhpt,shpt,itat,mtat,
stat

Dimension a(3,N)
C NOMBRE DE COLONNES = NOMBRES D'APPAREILS
C La première ligne de A contient les identificateurs des
C appareils
C la 2ème contient les VV des appareils et
C la 3ème contient les GV
integer nmr1,nmr2,mtr1,mtr2
real lam1, lam2, ifan, icc, ihpt, ihpc, mfan, mhpc,
mcc,mhpt,sfan, shpt, sc, shpc, itat,mtat,stat
Equivalence (XX(23), A(1,1))
Equivalence (XX(38),TXEHEC)

1 format(5X,A11,$)
write(*,*) '----INTRODUIRE LES TAUX DE DEFAILLANCE'
write(*,1) 'TXDEFA3 = '
read(*,*) lam1
write(*,1) 'TXDEFC2 = '
read(*,*) lam2
write(*,*) '-INTRODUIRE LE NOMBRE DE MOTEURS DE RESERVE-'
write(*,1) 'NMR1 = '
read(*,*) nmr1
write (*,1) 'NMR2 ='
read(*,*) nmr2
write(*,*) '___INTRODUIRE LES ECARTS TYPES__'
write(*,1)'EC_INF= '
read(*,*) ecinf
write(*,1)'EC_SUP= '
read(*,*) ecsup
write(*,*) '_____INTRODUIRE LE TAT MOTEUR_____'
write(*,1)'MOY_TAT = '
read(*,*) mtat
itat=ecinf*mtat
stat=ecsup*mtat
write(*,13)'INF_TAT = ', itat
write(*,13)'SUP_TAT = ',stat
13 Format(5X,A11,F10.5)
write(*,*) '-INTRODUIRE LES DUREES DE REPARATION MODULE-'
write(*,*) ' FAN'
write(*,1) 'MOY_FAN = '
read(*,*) mfan
IFAN=mfan*ecinf
write(*,13)'INF_FAN = ', ifan
sfan=ecsup*mfan
write(*,13) 'SUP_FAN =',sfan
write(*,*) ' HPC'

```

```

write(*,1) 'MOY_HPC = '
read(*,*) mhpc
ihpc=ecinf*mhpc
shpc=ecsup*mhpc
write(*,13) 'INF_HPC = ',ihpc
write(*,13) 'SUP_HPC = ',shpc
write(*,*) '                CC'
write(*,1) 'MOY_CC = '
read(*,*) mcc
icc=ecinf*mcc
scc=ecsup*mcc
write(*,13) 'INF_CC = ',icc
write(*,13) 'SUP_CC = ',scc
write(*,*) '                HPT'
write(*,1) 'MHPT_HPT = '
read(*,*) mhpt
ihpt=ecinf*mhpt
shpt=ecsup*mhpt
write(*,13) 'INF_HPT = ',ihpt
write(*,13) 'SUP_HPT = ',shpt
write(*,*) 'INTRODUIRE LE TAUX D"ECHEC AU BANC D"ESSAI
MOTEUR'
write(*,1) 'TXECHEC = '
read(*,*) TXECHEC
NRT1 = NMR1+4
NRT2 = NMR2+6
open(1, file='userf.dat', status='new')

CALL SLAM
STOP ' Terminé'
END

Subroutine Event(iiii)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
- MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
- SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)

Write(1,*) '-----event-----'
WRITE(1,*) 'XX'
Write(1,20) (i, XX(i), i=23,37)
20 Format(5X, 'XX(',i3, ') = ', f12.6)
end

Subroutine Imprime(ior)
PARAMETER (n=5)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)

Dimension a(3,N)
Equivalence (XX(23), A(1,1))

write(1,*) 'Fonction ', ior
write(1,*) 'Tnow=', Tnow
20 Format(5X, 'XX(',i3, ') = ', f12.6)
c WRITE(1,*) 'XX'

```

```

c      Write(1,20) (i, XX(i), i=23,37)
c      write(1,*) 'Matrice A'
c      DO 30 I=1, 3
c30   Write(1,*) (a(i,j), j=1,N)

```

End

```

c-----*
FUNCTION USERF(iln)
Parameter (n=5)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
      MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
      SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)
COMMON /UCOM1/ LAM1,LAM2,NMR1,NMR2,NRT1,NRT2,ifan,mfan,
      sfan,ihpc,mhpc,shpc,icc,mcc,sc, ihpt,mhpt,shpt,itat,
      mtat,stat
Dimension A(3,N)
Equivalence (XX(23), A(1,1))
real TBF, lam1, lam2,ifan,mfan,sfan,ihpc,mhpc,shpc,
-   icc, mcc,sc, ihpt,mhpt,shpt,itat,mtat,stat
integer NMR1, NMR2, NRT1, NRT2
10  format(5X, A9, $)
Goto(1,2,3,4,5,6,7,8,9) iln
Write(*,*) Char(7),Char(7), 'Fonction inconnue'
Stop

```

```

c-----*
c      Première fonction
c      LAM=0.00139
1     XX(19)=XX(19)+1
      IF(XX(19).LE.NMR1) THEN
          NRO1=NRT1-NMR1
          TXD1=NRO1*LAM1
          write(1,*) 'NRO1 = ', NRO1
      ELSE
          NRO1=NRT1-XX(19)
          IF(NRO1.LE.0) NRO1=0
          write(1,*) 'NRO1 = ', NRO1
          J=MOD(NRO1,2)
          IF(J.EQ.1) THEN
              TXD1=(NRO1-1)*LAM1
          ELSE
              TXD1=NRO1*LAM1
          END IF
      END IF
      IF(TXD1.LE.0) TXD1=1
      TBF1=1/TXD1
      Write(1,*) 'TBF1 = ', TBF1
      USERF=EXPON(TBF1,9)
      call imprime(1)
      RETURN

```

```

c-----*
c      Deuxième fonction
c      LAM=0.00111
2     XX(20)=XX(20)+1
      IF(XX(20).LE.NMR2) THEN

```

```
      NRO2=NRT2-NMR2
      TXD2=NRO2*LAM2
    ELSE
      NRO2=NRT2-XX(21)
      IF (NRO2.LE.0) NRO2=0
      J=MOD(NRO2,2)
      IF(J.EQ.1) THEN
        TXD2=(NRO2-1)*LAM2
      ELSE
        TXD2=NRO2*LAM2
      END IF
    END IF
    IF(TXD2.LE.0) TXD2=1
    TBF2=1/TXD2
    WRITE(1,*) 'TBF2 = ', TBF2
    USERF=EXPON(TBF2,9)
    call imprime(1)
    RETURN
  C-----*
C   troisième fonction
3   Do 20 l=1, N
      IF (a(2,l).eq.TNOW) THEN
        II=1
        a(2,l)=999999
      ENDIF
20  CONTINUE
    CALL MINI(a,AMIN,2)
    USERF = AMIN - TNOW
    write(1,*) 'userf(3)=', userf
    write(1,*) (a(2,l), l=1,n), ' II=',II, ' amin =',amin
    call imprime(2)
    RETURN
  C-----*
C   Quatrième Fonction
4   Do 30 l=1, N
      IF (abs(a(3,l)-TNOW).LE.12) THEN
        II=1
        a(3,l)=999999
      END IF
30  Continue
    CALL MINI(a,AMIN,3)
    USERF = AMIN-TNOW
    write(1,*) 'userf(4)=', userf
    write(1,*) (a(3,l), l=1,n), ' II=',II, ' amin =',amin
    call imprime(3)
    RETURN
  C-----*
C   Cinquième fonction
5   USERF=TRIAG(ifan,mfan,sfan,8)
    return
  C-----*
C   Sixième fonction
6   USERF=TRIAG(ihpc,mhpc,shpc,7)
    return
C   Septième fonction
7   USERF=TRIAG(icc,mcc,scc,6)
```

```

      return
C      Huitième fonction
8      USERF=TRIAG(ihpt,mhpt,shpt,5)
      return
C      Neuvième fonction
9      USERF=TRIAG(itat,mtat,stat,3)
      return
      end
C-----*
      SUBROUTINE MINI(a,amin,K)
C      K = 2 POUR LES VV ET K = 3 POUR LES GV
      Parameter (n=5)
      Dimension A(3,N)

      lmin = 1
      Amin = A(K,1)
      Do 10 i=2, N
         If(Amin .gt. A(k,i)) Then
            Amin = A(k,i)
         End If
10      Continue
      End

C-----*
      SUBROUTINE MINIO(a,imin,amin,K)
C      K = 2 POUR LES VV ET K = 3 POUR LES GV
      Parameter (n=5)
      Dimension A(3,N), Tri(2,N)

      do 40 i=1,N
         Tri(1,i) = A(1,i)
40      Tri(2,i) = A(k,i)

      Do 50 i=1, n-1
         Do 50 j=i+1, n
            If(Tri(2,i) .gt. Tri(2,j)) Then
               st = Tri(2,i)
               Tri(2,i) = Tri(2,j)
               Tri(2,j) = st
               st = Tri(1,i)
               Tri(1,i) = Tri(1,j)
               Tri(1,j) = st
            End If
50      Continue
      Imin = Tri(1,1)
      Amin = Tri(2,1)

      Write(1,*) '=====MATRICE TRI====='
      Do 10 i=1, 2
10      Write(1,*) (Tri(i,j), j=1, n)
         write(1,*) 'amin =', amin, ' imin= ',imin, ' 3 ',
(a(k,i),i=1,n)
      End

```

```

GEN,BNM,JT8D,21/05/1991,35,,,,,1;
LIM,8,8,905;
PRIORITY/1,LVF(2)/1,LVF(3);
EQUIVALENCE/XX(1),Nbre D'AVIONS_OPE;
EQUIVALENCE/XX(2),Nbre de B727dispo;
EQUIVALENCE/XX(3),Nbre de B737 dispo;
EQUIVALENCE/XX(4),Nbre de HSI/XX(5),Nbre de RVG;
EQUIVALENCE/XX(6),Nbre de PAN;
EQUIVALENCE/XX(7),Nbre_FOD/XX(8),Nbre_GRB;
EQUIVALENCE/XX(9),Nbre_DIVERS;
EQUIVALENCE/XX(10),VA27_1/XX(11),VA27_2/XX(12),VA27_3;
EQUIVALENCE/XX(13),VA27_4/XX(14),VA27_5/XX(15),VA27_6;
EQUIVALENCE/XX(16),VA27_7/XX(17),VA27_8/XX(18),VA27_9;
EQUIVALENCE/XX(19),VA27_10/XX(20),VA27_11/XX(21),VA37_1;
EQUIVALENCE/XX(22),VA37_2/XX(22),VA37_3/XX(23),VA37_4;
EQUIVALENCE/XX(24),VA37_5/XX(25),VA37_6/XX(26),VA37_7;
EQUIVALENCE/XX(27),VA37_8/XX(28),VA37_9/XX(29),VA37_10;
EQUIVALENCE/XX(30),VA37_11/XX(31),VA37_12/XX(32),VA37_13;
EQUIVALENCE/XX(33),VA37_14/XX(34),VA37_15/XX(35),VA37_16;
EQUIVALENCE/ATRIB(2),Nbre_JT8D/ATRIB(3),IDTYPA;
EQUIVALENCE/ATRIB(4),IDOP/ATRIB(5),NBMOTDIS;
EQUIVALENCE/ATRIB(6),DUR_OPE/ATRIB(7),IDVA;
EQUIVALENCE/ATRIB(8),DUR_VA;
INTLC,XX(1)=27,XX(2)=11,XX(3)=16,XX(4)=0,XX(5)=0;
INTLC,XX(6)=0,XX(7)=0,XX(8)=0,XX(9)=0;
INTLC,XX(36)=0,XX(37)=65,XX(38)=11,XX(39)=16;
TIMST,XX(2),Nbre DE B727_OPE;
TIMST,XX(3),Nbre DE B737_OPE;
TIMST,XX(1),Nbre D'AVIONS_OPE;
NETWORK;
RES/JT8D(0),1;
B27 CREATE,USERF(1),0,1,,1;
ACT,,XX(38).LE.O,END;
ACT;
ASSIGN,XX(2)=XX(2)-1,ATRIB(3)=2,1;
ALTER,JT8D/1,1;
ACT,,GO;
END ASSIGN,XX(38)=XX(38)+1,1;
TERM;
B37 CREATE,USERF(2),0,1,,1;
GOON,1;
ACT,,XX(39).LE.O,DEN;
ACT;
ASSIGN,XX(3)=XX(3)-1,ATRIB(3)=3,1;
ALTER,JT8D/1,1;
ACT,,GO;
DEN ASSIGN,XX(39)=XX(39)+1,1;
TERM;
GO ASSIGN,XX(1)=XX(1)-1,ATRIB(2)=2,ATRIB(4)=0,1;
ASSIGN,XX(36)=XX(36)+1,1;
QUEUE(2);
ACT(1)/1,1;DIAG_&_DEPOSE
GOON,2;
ACT,,Q1;
ACT;
EEA AWAIT(1/70),JT8D/ATRIB(2),1,1;

```

```

ACT,,ATRIB(4).EQ.1,SV;
ACT,,ATRIB(3).EQ.2,LIB2;
ACT;
ASSIGN,XX(1)=XX(1)+1,XX(3)=XX(3)+1,1;
ASSIGN,XX(39)=XX(39)+1,1;
COLCT,XX(3),Nbre de B737 disponible,1;
ACT,,SRT;
LIB2 ASSIGN,XX(1)=XX(1)+1,XX(2)=XX(2)+1,1;
ASSIGN,XX(38)=XX(38)+1,1;
COLCT,XX(2),Nbre de B727 disponible,1;
SRT COLCT,XX(1),Nbre BOEING disponible,1;
TERM;
Q1 QUEUE(3);
ACT(1)/2,TRIAG(6.3,7,9.1);DESEQUI_QEC
GOON,1;
QUEUE(4);
ACT(1),TRIAG(6.3,7,9.1);
GOON,1;
ACT,,0.225,HSI;
ACT,,0.393,RVG;
ACT,,0.082,GRB;
ACT,,0.075,FOD;
ACT,,0.225,DIV;
HSI ASSIGN,XX(4)=XX(4)+1,ATRIB(6)=USERF(4);
COLCT,XX(4),Nbre tot de HSI;
ACT,,Q2;
RVG ASSIGN,XX(5)=XX(5)+1,ATRIB(6)=USERF(5),1;
COLCT,XX(5),Nbre tot de RG;
ACT,,Q2;
FOD ASSIGN,XX(6)=XX(6)+1,ATRIB(6)=USERF(6),XX(7)=XX(7)+1,1;
COLCT,XX(7),Nbre de depo_FOD,1;
ACT,,Q2;
GRB ASSIGN,XX(6)=XX(6)+1,XX(8)=XX(8)+1,ATRIB(6)=USERF(7),1;
COLCT,XX(8),Nbre DEdepo_GRB,1;
ACT,,Q2;
DIV ASSIGN,XX(6)=XX(6)+1,XX(9)=XX(9)+1,ATRIB(6)=USERF(8),1;
Q2 COLCT,XX(9),Nbre de depo_divers,1;
ASSIGN,XX(6)=XX(6)+1,1;
COLCT,XX(6),NBRE DE PANNE;
ACT(1)/3,ATRIB(6);Reparation de reacteur
QUEUE(5);
ACT(1)/5,TRIAG(6.3,7,9.1);Banc d'essai
GOON,1;
ACT,,0.02,Q1;Echec au banc d'essai
ACT,3,,EQUI_QEC
FREE,JT8D/1,1;
ASSIGN,XX(36)=XX(36)-1,1;
COLCT,XX(36),Nbre de reacteurs N_0;
TERM;

;
;-----VISITE D'AVIONS-----
;
V CREATE,USERF(3),0,,1;
ASSIGN,ATRIB(4)=1,XX(40)=XX(40)+1,1;
COLCT,XX(40),Nbre de visit,1;
ACT,,II.LE.11,A27;

```

```
ACT;
ASSIGN, XX(39)=XX(39)-1, 1;
ASSIGN, ATRIB(2)=2, ATRIB(3)=3, 1;
ACT, ,, LIB;
A27 ASSIGN, ATRIB(2)=2, ATRIB(3)=2, 1;
ASSIGN, XX(38)=XX(38)-1, 1;
LIB GOON, 1;
ACT, ,, XX(36).GE.XX(37), PP1;
ACT, ,, PP2;
PP1 ASSIGN, NNQ(1)=NNQ(1)-1, 1;
ACT, ,, ATRIB(3).EQ.2, R1;
ACT;
ASSIGN, XX(1)=XX(1)+1, XX(3)=XX(3)+1, 1;
ACT, ,, G1;
R1 ASSIGN, XX(1)=XX(1)+1, XX(2)=XX(2)+1, 1;
ACT, ,, G1;
PP2 ASSIGN, ATRIB(5)=XX(37)-XX(36), 1;
ACT, ,, ATRIB(5).GT.0.AND.ATRIB(5).LE.2, L1;
ACT, ,, L2;
L1 ALTER, JT8D/ATRIB(5), 1;
ASSIGN, XX(36)=XX(36)+ATRIB(5), 1;
ACT, ,, G1;
L2 ALTER, JT8D/ATRIB(2), 1;
ASSIGN, XX(36)=XX(36)+ATRIB(2), 1;
ACT;
G1 GOON, 1;
ACT, ,, ATRIB(7).EQ.1, VV;
ACT, ,, GV;
VV ASSIGN, ATRIB(6)=1, 1;
QUEUE(6);
ACT(1)/6, TRIAG(18.9, 21, 27.3), , REA;
GV ASSIGN, ATRIB(6)=2, 1;
QUEUE(7);
ACT(1)/7, TRIAG(54, 60, 78), , REA;
SV ASSIGN, XX(36)=XX(36)-ATRIB(2), 1;
GOON, 1;
ACT, ,, ATRIB(3).EQ.3, INI;
ACT, ,, XX(38).GE.11, D1;
ACT;
ASSIGN, XX(38)=XX(38)+1, 1;
ACT, ,, D1;
INI GOON, 1;
ACT, ,, XX(39).GE.16, D1;
ACT;
ASSIGN, XX(39)=XX(39)+1, 1;
D1 GOON, 1;
ACT(1)/7, TRIAG(6.3, 7, 9.2), ATRIB(6).EQ.1, FI;
ACT(1)/7, TRIAG(6.3, 7, 9.2);
EVENT, 1, 1;
ACT;
FI TERM;
END;
INIT, 0, 5000;
; MONTR, TRACE, 0, 5000;
FIN;
```

```

$INCLUDE: 'PRCTL.FOR'
$DEBUG
PROGRAM MAIN
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)
COMMON /UCOM1/ LAM1,NMR,NRT, IHSI,MHSI,SHSI,IRVG,MRVG,
SRVG,IREFOD,MREFOD,SREFOD,IREGRB,MREGRB,SREGRB,
IREDIV,MREDIV,SREDIV
COMMON /Avions/ Avions(26,3)

integer nmr,nrt
real lam1, lam2, IHSI, MHSI, SHSI, IRVG, MRVG, SRVG, IREFOD, MREFOD,
- SREFOD, IREGRB, MREGRB, SREGRB, IREDIV, MREDIV, SREDIV, ecinf,
- ec moy, ecsup

1 format(5X, A, $)
write(*,*) '-----INTRODUIRE LE TAUX DE DEFAILLANCE-----'
write(*,1) 'LAM1 = '
read(*,*) lam1
write(*,*) '-INTRODUIRE LE NOMBRE DE MOTEURS DE RESERVE-'
write(*,1) 'NMR = '
read(*,*) nmr
write(*,*) '----INTRODUIRE LES ECARTS DESIRES-----'
write(*,1) 'Ecart_INF = '
read(*,*) ecinf
write(*,1) 'Ecart_sup = '
read(*,*) ecsup
write(*,*) '-----INTRODUIRE LA DUREE D"UNE HSI-----'
write(*,1) ' MOY_HSI= '
read(*,*) MHSI
MHSI=MHSI+ecmoy
IHSI=ecinf*MHSI
SHSI=ecsup*MHSI
write(*,13) 'HSI_INF = ', IHSI
write(*,13) 'HSI_SUP = ', SHSI
write(*,*) '-INTRODUIRE LA DUREE D"UNE REVISION GENERALE--'
13 format(13X, A, F9.3)
write(*,1) 'MOY_RVG = '
read(*,*) MRVG
IRVG=ecinf*mrvg
SRVG=ecsup*mrvg
write(*,13) 'INF_RVG = ', IRVG
write(*,13) 'SUP_RVG = ', SRVG
write(*,*) '----INTRODUIRE LA DUREE D"UNE REP_FOD-----'
write(*,1) 'MOY_REP_FOD = '
read(*,*) mrefod
IREFOD=ecinf*mrefod
SREFOD=ecsup*mrefod
write(*,13) 'INF_RE_FOD = ', irefod
write(*,13) 'SUP_RE_FOD = ', srefod
write(*,*) '-----INTRODUIRE LA DUREE D"UNE REP_GRB-----'
write(*,13) 'MOY_RE_GRB = '
read(*,*) mregrb
IREGRB=ecinf*mregrb
SREGRB=ecsup*mregrb

```

```

write(*,*) 'INF_RE_GRB = ',iregrb
write(*,*) 'SUP_RE_GRB = ',sregrb
write(*,*) '-----INTRODUIRE LA DUREE D"UNE REP_DIV-----'
read(*,*) mrediv
IKEDIV=ecinr*mrediv
SREDIV=ecsup*mrediv
write(*,13) 'INF_RE_DIV = ',irediv
write(*,13) 'SUP_RE_DIV = ',srediv
write(*,*) 'INTRODUIRE LE TAUX D"ECHEC AU BANC D"ESSAI
MOTEUR'
write(*,1) 'TXECHEC = '
read(*,*) TXECHEC
NRT = NMR+65
open(1, file='userf.dat', status='new')
Call InitAvions
CALL SLAM
STOP ' Terminé'
END

```

```

-----*
c
FUNCTION USERF(iln)
Parameter (n=26)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
- MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
- SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)
COMMON /UCOM1/ LAM1,NMR,NRT,IHSI,MHSI,SHSI,IRVG,MRVG,
- SRVG,IREFOD,MREFOD,SREFOD,IREGRB,MREGRB,SREGRB,IREDIV,
- MREDIV,SREDIV
Common /Avions/ Avions(26,3)

integer nmr,nrt
real lam1, lam2,IHSI,MHSI,SHSI,IRVG,MRVG,SRVG,IREFOD,
- MREFOD,SREFOD,IREGRB,MREGRB,SREGRB,IREDIV,MREDIV,
- SREDIV,ecinr,ecmoy,ecsup

Goto(1,2,3,4,5,6,7,8) iln
Write(*,*) Char(7),Char(7), 'Fonction inconnue'
Stop
-----*
c
c Première fonction
1 XX(38)=XX(38)-1
RAM=3*Lam1
TXD1=XX(38)*RAM
if (TXD1.le.0) then
txd1 =1
endif
USERF=EXPON(1/TXD1,9)
RETURN
-----*
c
c Deuxième fonction
2 XX(39)=XX(39)-1
SAM=lam1*2
TXD2=sam*XX(39)
if (txd2.le.0) then
txd2=1

```

```

endif
TBF2=1/TXD2
USERF=EXPON(TBF2,8)
RETURN
-----*
C
C   troisième fonction
3   do 20 l=1,26
    IF (Avions(l,1).le.TNOW) THEN
        II=1
        Avions(l,1)=999999
    ENDIF
20  CONTINUE
    Call MiniAvions
    USERF = Avions(II,1) - TNOW
    RETURN
-----*
C
C   Quatrième Fonction
4   USERF=TRIAG(IHSI,MHSI,SHSI,4)
    RETURN
-----*
C
C   Cinquième fonction
5   USERF=TRIAG(IRVG,MRVG,SRVG,1)
    RETURN
-----*
C
C   Sixième fonction
6   USERF=TRIAG(IREFOD,MREFOD,SREFOD,4)
    return
-----*
C
C   Septième fonction
7   USERF=TRIAG(IREGRB,MREGRB,SREGRB,6)
    return
-----*
C
C   Huitième fonction
8   USERF=TRIAG(IREDIV,MREDIV,SREDIV,5)
    return
10  format(5X, A9, $)
    end
-----*
C
SUBROUTINE Event(Ie)
Common /Avions/ Avions(26,3)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
- MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
- SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)

If(TNOW .GE. 4950) Call InitAvions

Avions(II,1) = Tnow + 1200
If(Avions(II,2) .eq. 1) Then
    Avions(II,2) = 2
Else
    Avions(II,2) = 1
End If
End

```

```
SUBROUTINE InitAvions
Common /Avions/ Avions(26,3)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
- MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
- SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)

Open(3,File='Avions.dat', Status='Old')

Read(3,*) (Avions(i,1), i=1,26)
Close(3)
Do 10 i=1,26
    j=i+1
    XX(j) = Avions(i,1)
    Avions(i,2) = 2
    Avions(i,3) = i
10 Continue
II=14
End

C-----*
SUBROUTINE MiniAvions
Common /Avions/ Avions(26,3)
COMMON /SCOM1/ ATRIB(100), DD(100), DDL(100), DTNOW, II,
- MFA,MSTOP, NCLNR, NCRDR, NPRNT, NNRUN, NNSET, NTAPE,
- SS(100),SSL(100), TNEXT, TNOW, XX(100)

Imin = 1
DatMin = Avions(1,1)
Do 10 i=2, 26
    If(DatMin .gt. Avions(i,1)) Then
        Datmin = Avions(i,1)
        Imin = i
    End If
10 Continue
Atrib(7) = Avions(Imin,2)
II = Avions(Imin,3)
End
```

Taux de def. CF6A3 (1E -5 def/jour)	Nombre moyen de pannes CF6A3	Disponibilité des AIRBUS
80	9.66	93.88
90	12	92.52
100	12	91.66
105	14.75	90.16
110	17	88.48
115	17.50	87.77
120	19	87.71
125	19	87.40
130	19.75	86.90
132	21.70	85.53
134	22	85.92
136	22.33	84.47
138	22.50	83.95
139 *	21.25	86.10
140	23.50	83.85
142	23.40	84.15
144	22.50	85.67
146	24	83.76
148	23.33	84.38
150	24	83.70
155	24.33	83.80
160	24.75	83.40
165	25	83.66
170	25.25	83.31
175	25.5	82.57
180	26	82.61
190	27	81.30
250	34.6	77.42

Tableau 1

Taux de def. CF6C2 (1E -5 def/jour)	Nombre moyen de pannes CF6C2	Disponibilité des AIRBUS
76	10	94.57
81	14	93.86
86	15	94.00
91	14	95.00
96	13	93.33
101	15	93.66
106	16	93.00
108	16	92.33
110	18	91.67
111 *	16.33	92.91
113	19	91.33
116	18	92.00
121	20	91.67
126	18	91.00
131	21	90.67
136	19.25	91.67
141	23	89.67
146	24	89.67
151	25	88.33
156	27	87.66
161	25	88.00
166	27	87.33
171	28	87.33
176	28	87.33
181	31	86.67
186	32	84.33
191	33	83.67
196	34	83.33
201	34	83.03

Tableau 2

Durée de réparation moteur	Nombre moyen pannes		Disponibilité Avion	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
30	15.33	17.00	91.46	94.46
32	17.33	16.33	93.86	94.20
34	18.00	18.00	89.58	93.18
36	17.00	20.00	89.17	92.58
38	19.33	19.67	87.25	92.54
40	17.00	19.00	88.98	92.26
41	19.33	19.33	88.22	92.11
42	19.33	16.67	87.82	92.81
43	16.67	20.67	88.73	91.87
44	20.33	18.37	86.18	91.95
45 *	19.33	16.33	86.07	92.91
46	20.33	17.33	86.01	92.27
47	18.67	13.67	85.93	92.70
48	17.33	20.00	85.30	90.20
49	17.33	17.33	84.36	91.59
50	20.67	19.67	84.05	91.40
51	19.33	18.00	83.35	91.06
52	16.67	17.00	83.50	91.16
54	19.67	17.00	84.13	91.60
56	18.00	17.67	85.06	91.43
58	20.00	20.00	83.97	89.75
60	20.00	17.67	84.80	90.27
70	17.33	19.00	83.48	88.48
80	18.33	19.33	80.38	87.23
90	17.33	17.00	77.28	85.69
100	14.66	15.67	77.95	84.81
200	16.00	12.33	67.82	67.82

Tableau 3.

Tx d'echec au banc d'essai	Nombre moyen de panne		Disponibilité avion	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
0.02	19.40	14.80	88.00	94.00
0.04	19.40	13.20	87.50	93.46
0.06	18.80	14.20	87.50	93.33
0.08	18.60	15.20	87.20	93.33
0.10	18.20	15.20	85.00	92.67
0.15	18.20	18.75	86.00	91.00
0.20	21.75	17.00	83.00	90.67
0.25	20.00	18.50	83.50	88.00
0.30	18.66	18.00	82.50	89.33
0.35	17.00	16.25	82.50	88.00
0.40	23.00	17.25	71.00	86.67
0.50	22.00	14.66	69.50	85.67
0.60	14.80	19.66	67.90	83.00
0.70	19.33	14.25	54.90	77.67
0.90	19.33	09.00	40.25	49.0

Tableau 4.

Variat. de durée de réparat.	Nombre moyen de pannes		Disponibilité Avion	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
-10	18.25	16.25	89.94	93.76
-08	18.67	16.00	89.16	93.60
-06	16.67	16.75	89.50	93.23
-04	18.66	16.50	88.37	93.25
-02	19.20	16.00	88.43	92.91
00	19.33	16.33	86.07	92.91
02	18.50	15.67	87.72	92.97
04	17.40	16.00	86.76	92.95
06	19.00	14.00	85.12	92.83
08	19.00	17.80	84.60	90.62
10	18.67	18.67	81.32	88.70

Tableau 5

Borne inf de la loi Triag ecinf*moy	Nombre moyen de pannes		Disponibilité Avion	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
0.95	18.25	15.25	86.50	92.50
0.90 *	19.33	16.33	86.07	92.91
0.88	18.33	17.60	88.23	93.03
0.86	19.20	16.20	89.32	93.06
0.84	18.67	16.00	88.67	93.08
0.82	16.00	16.00	89.70	93.15
0.80	18.80	18.60	88.50	93.22
0.70	16.60	17.60	89.98	93.32
0.60	16.80	14.80	90.42	93.38
0.50	16.80	18.40	90.31	94.02
0.40	17.00	14.80	90.78	94.55

Tableau 6.a

Borne_sup de la loi Triangul.	Nombre moyen de pannes		Disponibilité Avion	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
1.05	18.60	16.80	90.35	93.29
1.10	19.00	17.60	89.18	93.10
1.15	19.20	16.60	89.21	93.25
1.20	17.80	17.00	88.94	93.17
1.25	20.75	17.25	87.75	93.09
1.30	19.33	16.33	86.70	92.91
1.35	19.75	15.60	86.80	93.08
1.40	19.00	15.20	86.78	92.58
1.50	18.20	14.00	86.69	92.08
1.75	17.40	12.5	85.23	91.96
2.00	17.80	19.25	84.74	89.34

Tableau 6.b

Nombre de moteurs de rechange	Nbre de déposes		Disponibilité	
	CF6A3	CF6C2	AIRBUS	BOEING
0	17.83	18.50	88.00	92.00
1	30.50	20.00	95.00	97.43
2	35.33	32.83	98.35	99.30
3	37.00	43.83	99.60	99.50
4	38.00	45.20	99.70	99.66
5	41.14	50.54	99.70	99.76
6	41.14	50.54	99.70	99.76
7	41.14	50.54	99.70	99.76
8	41.14	50.54	99.70	99.76
9	41.14	50.54	99.70	99.76
10	41.14	50.54	99.70	99.76

Tableau 7

Nombre de modules CF6A3 de rechange	Disponibilité des AIRBUS			
	FAN	HPC	CC	HPT
0	83.15	83.15	83.15	83.15
1	88.05	88.65	85.40	88.95
2	93.13	93.77	93.20	94.58
3	93.13	93.77	93.20	94.58
4	93.13	93.77	93.20	94.58
5	93.13	93.77	93.20	94.58
6	93.13	93.77	93.20	94.58

Tableau 8.a

Nombre de modules CF6C2 de rechange	Disponibilité des BOEING			
	FAN	HPC	CC	HPT
0	92.37	92.37	92.37	92.37
1	93.13	93.77	93.20	94.58
2	93.13	93.77	93.20	94.58
3	93.13	93.77	93.20	94.58
4	93.13	93.77	93.20	94.58
5	93.13	93.77	93.20	94.58
6	93.13	93.77	93.20	94.58

Tableau 8. b

Analyse de sensibilité sur le modèle JT8D :

Taux de def. JT8D (1E-4 def/jour)	Disponibilité des B-727	Disponibilité des B-737	Disponibilité de la flotte BOEING
10	94.79	87.89	90.70
12	95.25	85.16	89.27
14	94.79	82.16	87.30
16	94.64	78.64	85.16
17	94.59	77.84	84.65
17.5	94.75	77.38	84.46
18	94.80	79.20	83.78
18.5	94.69	75.48	83.29
19	94.29	74.46	82.52
20	94.46	72.17	81.11
22	94.23	68.90	81.15
24	93.80	65.40	76.96
30	92.83	52.86	69.15

Tableau 9

Ecart/durees moyennes des interventions	Disponibilité des B-727	Disponibilité des B-737	Disponibilité de la flotte BOEING
-10	94.78	77.63	84.62
-08	94.61	77.62	84.53
-06	94.55	77.95	84.70
-04	94.53	76.43	83.80
-02	94.64	76.45	83.86
0	94.69	75.08	83.78
02	94.57	74.94	82.94
04	94.28	74.65	82.65
06	94.46	75.56	83.26
08	93.98	73.60	81.89
10	94.60	72.77	81.66

Tableau 10

---

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

Ouvrages de base :

- [1] NAHMIAS, S., "Managing Reperable Item Inventory System: A review", In Multi-Level production/ Inventory control System: Theory and Practrice, Edited by L.B. Schwarz, Tims Studies In Management Sciences, North-Holland, Amsterdam, Vol.16, 1981, pp. 253-278.
- [2] Référence [1], pp. 255.
- [3] Référence [1], pp.255.
- [4] SHERBROOKE, C.C., "METRIC: A Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control," Operations Resarch, vol.16, No.1 (1968), pp. 122-141.
- [5] W.S.DEMMY & V.J. PRESUTTI, "Multi-Echelon Inventory Theory In the AIR-FORCE Logistic Command," In Multi-Level Production/Inventory Control Systems: Theory and Practice, Edited by L.B. Schwarz, TIMS Studies In Management Sciences, North-Holland, Amesterdam, Vol. 16, 1981, pp. 279-297.
- [6] MUCKSTADT, J.A., "A Model for a Multi-Echelon, Multi-Indenture Inventory Systems," Management Sciences, Vol. 20, No. 4 (1973), pp. 472-482.

- 
- [7] A.J. CLARCK, "Experiences with Multi-Indentured, Multi-Echelon Inventory Model," In Multi-Level Production/Inventory Control Systems: Theory and Practice, Edited by L.B. Schwarz, TIMS Studies in Management Sciences, north-Holland, Amsterdam, Vol. 16, 1981, pp. 299-330.
- [8] D. GROSS & C.M. HARRIS, "Fundamentals of Queueing Theory," Wiley, New-York, 1974.
- [9] D. GROSS & J.F. INCE, "Spares Provisioning for Repairable Item, Cyclic Queues in Light Traffic," AIIE Trans., Vol. 10, No. 3 (1978), pp. 307-314.
- [10] S. TOUMI & K. SEGHOUBANI, "Simulation par SLAM II de la Clinique de BOU-ISMAIL," P.F.E sous la direction de BOUZAHIR et KERBACHE, 1990.
- [11] W.H. HAUSMAN & G.D. SCUDDER, "Priority Scheduling Rules for Repairable Inventory Systems," Management Sciences, Vol. 28, No. 11 (1982), pp. 1215-1232.
- [12] A.B. PRITSKER, "Introduction to Simulation and SLAM II," Third Edition, 1986, Wiley & Sons.
- [13] J.P. VEDRINE, "Techniques Quantitatives de Gestion," Collection VUIBERT Gestion, 1985.
- [14] A.M. LAW & W.D. KELTON, "Simulation Modeling and Analysis," Mac-Graw-Hill, 1982.
- [15] "Handbook of Production planning and Control," IATA, International Air Transport Association.

---

*Autres ouvrages consultés :*

\* P.Lyonnet, 'La Maintenance, Mathématiques et Méthodes,'  
Deuxième Edition, TEC & DOC - LAVOISIER, 1988.

\* E.A.SILVER & R.PETERSON, 'Decisions Systems for Inventory  
Management and Production Planning,' Second Edition, Wiley &  
Sons, 1985.

\* N.ABOUN, 'Cours de Processus Stochastique et Files  
d'Attente,'.

