2010-ENAM-0062

École doctorale n°432 : Sciences des Métiers de l' Ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie Industriel "

présentée et soutenue publiquement par

Radhouane DJERIDI

le 17 décembre 2010

Contribution à la maîtrise de la disponibilité de systèmes complexes : Proposition d'une méthode de réordonnancement proactif de la maintenance

Directeur de thèse : **Aline CAUVIN**
Co-encadrement de la thèse : **Denis DUFRENE**

Jury

M. Noureddine ZERHOUNI, Professeur, Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques et Microtechniques	Président
M. Michel ALDANONDO, Professeur, Ecole des Mines d'Albi – Centre Génie Industriel	Rapporteur
M. Christophe BERENGUER, Professeur des Universités, Université de Technologie de Troyes	Rapporteur
Mme. Aline CAUVIN, Maître de Conférences HDR, Université d'Aix-Marseille III	Examinateur
M. Jean-Michel OLIVE, Maître de Conférences, Université d'Aix-Marseille III	Examinateur
M. Marvin RAUSAND, Professeur, Norwegian University of Science and Technology	Examinateur
M. Frédéric MATHERON, Ingénieur, Eurocopter, Département Maintenabilité	Invité
M. Denis DUFRENE, Professeur ENSAM, Ecole Nationale des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence	Invité

Arts et Métiers ParisTech - Centre d'Aix-en-Provence
Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes

T H È S E

Je dédie cette thèse à mon père et ma mère,

A mes frères,

A mon épouse et à mon petit Tijani.

Remerciements

Avant tout, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont permis le bon déroulement de ces travaux de thèse. Qu'elles soient toutes assurées de ma gratitude.

Je tiens à remercier Christophe Beranguer, professeur à l'université de Troyes et Michel Aldanondo, professeur à l'école des Mines d'Albi pour avoir accepté d'être rapporteurs de mes travaux et pour les nombreux commentaires qu'ils ont apporté.
Merci également à Jean-Michel Olive d'avoir accepté de participer au jury en tant qu'examinateur et Nourredine Zerhouni d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à remercier Aline Cauvin et Denis Dufrène pour la qualité de leur encadrement et leur disponibilité. Aline, je te remercie pour avoir accepté la direction de cette thèse, pour la confiance que tu m'as toujours témoignée et les conseils avisés que tu m'as prodigués. Denis, merci pour m'avoir guidé, encouragé et conseillé tout au long de cette thèse. J'ai beaucoup appris et progressé pendant ces 3 années et c'est en partie grâce à vous.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à Frédéric Matheron, responsable du département Maintenabilité de la société Eurocopter avec qui j'ai pris plaisir à travailler durant les trois années de thèse. Je citerai également les membres de ce département pour leur compétence, leur gentillesse et pour la bonne ambiance qu'ils ont su créer dans le bureau d'études. Ces personnes se reconnaitront, j'en suis sûr. De même, je tiens à remercier le département Support et Services et particulièrement, Bernard Plissonneau, George Devilliers, Jacques Demassieux ainsi que Marc Beynet pour leurs conseils et leurs remarques qui ont permis d'évaluer les contributions présentées dans cette thèse.

Je tiens également à exprimer ma sympathie pour Alain Ferrarini, Erwan Tranvouez, Sébastien Fournier,.., des personnes qui m'ont été d'une grande aide grâce à leurs remarques constructives et également pour l'ambiance agréable qu'ils ont créée au cours de mes moments de présence au Laboratoire LSIS.

Je ne saurais terminer cette page sans remercier ma famille pour m'avoir constamment soutenu et pour avoir cru en moi pour mener ce travail à sa fin. Qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude.
Un merci particulier à mes parents pour tout l'amour et les valeurs qu'ils m'ont transmis.

Résumé

Une des préoccupations majeures du monde industriel est d'avoir une exploitation performante permettant de garantir au mieux la qualité des missions réalisées, le respect des délais demandés et la minimisation des coûts d'exploitation. Toutefois, aujourd'hui la concurrence accrue et la complexité des systèmes conduit les industriels à développer des approches qui permettent la maîtrise de la disponibilité et en particulier à prendre en compte ce paramètre pour l'élaboration de la politique de maintenance.

L'objectif de ce manuscrit est de proposer des éléments méthodologiques permettant de caractériser le concept de disponibilité pour en assurer la maîtrise.

Nous proposons une méthode de modélisation d'une exploitation en vue d'évaluer les performances en termes de disponibilité. Les résultats de cette évaluation permettent entre autres d'identifier les leviers d'amélioration pouvant agir sur les performances de l'exploitation. Ensuite, nous nous sommes focalisés, dans cette thèse, sur un de ces leviers, à savoir le réordonnancement de la maintenance programmée permettant de répondre au besoin du partenaire industriel. Dans cette optique, nous avons proposé une méthode permettant d'améliorer le réordonnancement d'un programme de maintenance en vue d'optimiser la disponibilité d'un système voire d'un ensemble de systèmes. Dans le cadre de cette méthode, nous avons proposé des heuristiques permettant de réordonnancer les opérations de maintenance en fonction des opportunités d'un exploitant de système.

Nous chercherons dans ce manuscrit à apporter des éléments méthodologiques expérimentées chez la société Eurocopter, reposant sur des principes opérationnels et basés sur des approches par scénario.

Mots-clés : Disponibilité ; Modélisation ; Exploitation ; Maintenance ; Réordonnancement ; Optimisation.

One of industrial strength is to lead a performing exploitation to ensure the quality of missions, time mission respect, operating costs minimization. However, the competitiveness and the complexity of system lead industrials to develop an approach in order to control the availability taking into account this parameter in the processes of maintenance design.

The main objective of this manuscript is to propose methodological elements in order to characterize availability to controlling it.

First, we propose an operating modeling method in order to assess performances in terms of availability. The results of the assessment can identify levers that impact the exploitation performance. Second, we focus on one of the levers: the maintenance rescheduling that meets the industrial need. In this way, we propose a method that can improve the maintenance rescheduling in order to optimize the availability of the system or of the fleet of systems. In the framework of this method, we propose heuristics that can reschedule maintenance activities in relation to industrial opportunities.

We will try throughout in this manuscript to propose method implemented in the Eurocopter Company, based on operational practices and scenarios proposition.

Keywords: Availability; Modeling; Exploitation; Maintenance; Rescheduling; Optimization.

Sommaire général

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I. DISPONIBILITE DES SYSTEMES COMPLEXES : UN ENJEU INDUSTRIEL 18
II. PROBLEMATIQUE GENERALE 19
III. CADRE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE..... 21
III.1. Cadre de la recherche 21
III.2. Objectifs de la recherche 21
IV. ORGANISATION DU MEMOIRE 22
IV.1. Plan de lecture 22
IV.2. Repères typographiques 23

CHAPITRE II : L'ANALYSE DE LA DISPONIBILITE DANS LE CADRE D'UNE EXPLOITATION DE SYSTEMES

Résumé

I. INTRODUCTION : L'EXPLOITATION D'UNE FLOTTE DE SYSTEMES 29
II. NOTIONS PRELIMINAIRES DE LA DISPONIBILITE 29
II.1. Les enjeux de la sûreté de fonctionnement..... 30
II.1.1. Fiabilité 30
II.1.2. Maintenabilité 30
II.1.3. Sécurité 30
II.1.4. Disponibilité 31
II.2. Les enjeux de la maintenance des systèmes complexes 31
II.2.1. Définitions générales 31
II.2.2. Processus de maintenance 31
II.2.3. Politique de maintenance..... 32
II.2.3.1. Maintenance préventive..... 33
II.2.3.2. Maintenance corrective..... 33
II.2.3.3. Indicateurs de maintenance 34
II.3. Lien entre la disponibilité et l'exploitation d'un système 35
II.3.1. Définitions générales 35
II.3.2. Inducteurs de disponibilité..... 36
II.3.3. Enjeu de la disponibilité pour l'exploitation de systèmes 38
III. BESOIN INDUSTRIEL : MAITRISER LA DISPONIBILITE..... 39
III.1. Contexte opérationnel d'une exploitation 39
III.1.1. Maîtriser les contraintes opérationnelles relevant du secteur d'activité 39
III.1.2. Maîtriser l'organisation de la logistique de maintenance d'un système complexe. 40
III.2. Axes de travail de la maîtrise de la disponibilité 42
III.2.1. Diagnostic des performances opérationnelles d'une exploitation..... 42
III.2.2. Réordonnancement du programme de maintenance 42
III.2.3. Le dimensionnement du soutien logistique..... 43
IV. BILAN : EMERGENCE DE LA PROBLEMATIQUE DE LA MAITRISE DE LA DISPONIBILITE 43

CHAPITRE III : LA DISPONIBILITE, DEFINITIONS ET MODELES

Résumé

I. INTRODUCTION : DE LA DEFINITION A L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 51
II. DISPONIBILITE D'UN SYSTEME : TERMINOLOGIE ET CONCEPTS 52
II.1. Concepts de disponibilité 52
II.1.1. Disponibilité Intrinsèque 52
II.1.2. Disponibilité théorique 53
II.1.3. Disponibilité réelle ou opérationnelle 53
II.1.4. Disponibilité de service 53
II.2. Mesures de disponibilité 54
II.3. Disponibilités pratiques 54
II.3.1. Disponibilité instantanée en formation 55
II.3.2. L'employabilité 55
II.3.3. Taux de réussite de mission 55
III. REVUE DE LITTERATURE: METHODES D'EVALUATION EXISTANTES DE LA DISPONIBILITE 56
III.1. Approches combinatoires 57
III.1.1. Arbres de défaillances 57
III.1.2. Diagrammes de fiabilité 58
III.1.3. Réseaux Bayésiens 58
III.2. Approches stochastiques 58
III.2.1. Chaînes de Markov 59
III.2.2. Réseaux de Petri 59
III.2.3. Monte-Carlo 59
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 61

CHAPITRE IV : ETAT DE L'ART DES PRATIQUES DE REORDONNANCEMENT

Résumé

I. INTRODUCTION : GESTION DE L'ORDONNANCEMENT 65
II. ORDONNANCEMENT D'UNE ACTIVITE : DEFINITIONS 65
II.1. Quelques rappels d'ordonnancement 66
II.1.1. Définition 66
II.1.2. La notion de tâche 66
II.1.3. La notion de ressource 67
II.1.4. Contraintes de temps et de ressources 67
II.1.5. La notion d'objectif et de critère 68
II.1.6. Méthodes classiques de résolution 68
II.1.6.1. Méthodes exactes 68
II.1.6.2. Méthodes approchées 69
II.2. Les sources d'incertitudes et robustesse 71
II.2.1. Les sources d'incertitudes 71
II.2.2. Notion de robustesse en ordonnancement 71
II.2.3. Flexibilité et robustesse 71

III. REVUE DE LITTERATURE : APPROCHES D'ORDONNANCEMENT ROBUSTES EXISTANTES 72
III.1. Approches réactives 74
III.1.1. Généralités 74
III.1.2. Caractéristiques 75
III.1.3. Discussion 76
III.2. Approches prédictives 76
III.2.1. Généralités 76
III.2.2. Caractéristiques 76
III.2.3. Discussion 77
III.3. Approches proactives 78
III.3.1. Généralités 78
III.3.2. Caractéristiques 78
III.3.3. Discussion 80
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 81

CHAPITRE V: UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION

Résumé

I. INTRODUCTION : VERS L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE D'UN ENSEMBLE DE SYSTEMES 90
II. CADRE METHODOLOGIQUE D'UN MODELE D'EXPLOITATION 91
III. PROPOSITION D'UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION 92
III.1. Modélisation de la Demande 93
III.1.1. Contexte de modélisation 94
III.1.2. Processus de modélisation 95
III.1.2.1. Demande stochastique 97
III.2.1.2. Demande déterministe 99
III.2.1.3. Synthèse 100
III.2. Modélisation de l'affectation 100
III.2.1. Rappel et définition : caractéristiques d'une file d'attente 101
III.2.2. Méthode de modélisation de l'affectation 102
III.2.3. Synthèse 104
III.3. Modélisation de la maintenance 105
III.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 107
III.3.1.1. Description du processus de maintenance programmée 107
III.3.1.2. Evaluation des temps de maintenance programmée 108
III.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 115
III.3.2.1. Description du processus de maintenance non programmée 115
III.3.2.2. Evaluation des temps de maintenance non programmée 116
III.4. Evaluation de la disponibilité 119
IV. BILAN DE LA MODELISATION 125

CHAPITRE VI : PROPOSITION D'UNE METHODE DE RE ORDONNANCEMENT PROACTIF D'UN PROGRAMME DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME COMPLEXE

Résumé

I. INTRODUCTION : CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 129
II. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE REORDONNANCEMENT PROACTIF DE MAINTENANCE 131
II.1. Descriptif des étapes de la méthode 132
II.2. Sélection des heuristiques d'ordonnancement 134
III. PROPOSITION DES HEURISTIQUES DE REORDONNANCEMENT DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 136
III.1. Présentation des heuristiques de réordonnancement 137
III.1.1. Notations 137
III.1.2. Les heuristiques de réordonnancement 139
III.2. Heuristique de réordonnancement par décalage 140
III.2.1. Présentation générale de l'heuristique 140
III.2.2. Description détaillée de l'heuristique 141
III.2.2.1. Sélection des tâches potentielles 141
III.2.2.2. Décalage des tâches de maintenance sélectionnées 143
III.2.2.3. Evaluation des performances 145
III.2.3. Synthèse 145
III.3. Heuristique de réordonnancement par agrégation 146
III.3.1. Présentation générale de l'heuristique 146
III.3.2. Description détaillée de l'heuristique 146
III.3.2.1. Identification des temps non requis 147
III.3.2.2. Agrégation des tâches de maintenance 147
III.3.2.3. Evaluation des performances 155
III.3.3. Synthèse 155
III.4. Heuristique de réordonnancement par désagrégation 156
III.4.1. Présentation générale de l'heuristique 156
III.4.2. Présentation détaillée de l'heuristique 156
III.4.2.1. Sélection des visites candidates 157
III.4.2.2. Identification des temps non requis 157
III.4.2.3. Désagrégation des visites de maintenance 157
III.4.2.4. Evaluation des performances 161
III.4.3. Synthèse 161
IV. BILAN DE LA MODELISATION 162

CHAPITRE VII : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LA MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE D'UNE FLOTTE D'HELICOPTERES

Résumé

I. CONTEXTE 166
I.1. Confidentialité des résultats 166
I.2. Exploitation étudiée 166
I.2.1. Description des caractéristiques organisationnelles 167

I.2.2. Description de la demande 167
II. MODELISATION DE L'EXPLOITATION ET EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 168
II.1. Introduction 168
II.2. Modélisation déterministe de l'exploitation 169
II.2.1. Modélisation de la demande 169
II.2.2. Modélisation de l'affectation 170
II.2.3. Modélisation de la maintenance 170
II.2.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 170
II.2.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 176
II.2.4. Evaluation de la disponibilité 180
II.3. Modélisation stochastique de l'exploitation 181
II.3.1. Modélisation de la maintenance 181
II.3.1.1. Modélisation de la maintenance programmée 181
II.3.1.2. Modélisation de la maintenance non programmée 185
II.3.2. Evaluation de la disponibilité 187
II.4. Conclusions 187
III. ANALYSE DES LEVIERS D'AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE 188
III.1. Introduction 188
III.2. Analyse des gains en disponibilité 189
III.2.1. Analyse de sensibilité 189
III.2.2. Bilan et Recommandations 191
III.3. Conclusions 191
IV. AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE PAR L'OPTIMISATION DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 192
IV.1. Introduction 192
IV.2. Analyse du Programme de maintenance 192
IV.2.1. Sélection des heuristiques potentielles 192
IV.2.2. Proposition du programme de maintenance 193
IV.2.3. Mise en place du programme de maintenance 198
V. BILAN DE L'ETUDE : VERS UN MODELE DE MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE DE L'EXPLOITATION 198

CHAPITRE VIII : EVALUATION DES PROPOSITIONS

Résumé

I. DEMARCHE DE VALIDATION 202
I.1. Double évaluation 202
I.2. Méthode de validation 203
II. EVALUATION DES PROPOSITIONS DANS LE CADRE DU DOMAINE AERONAUTIQUE 204
II.1. Evaluation de la méthode de maîtrise de la disponibilité 204
II.2. Description des applications industrielles réalisées dans le cadre des analyses de disponibilité 206
II.3. Evaluation de l'impact de nos propositions au niveau des acteurs projets 207
III. EVALUATION DE L'APPLICABILITE DE LA DEMARCHE SUR D'AUTRES SYSTEMES INDUSTRIELS 209
III.1. Contraintes opérationnelles et hypothèses d'applicabilité 209

III.2. Eléments de réflexion sur l'application de la méthode sur d'autres secteurs étudiés .. 210
IV. BILAN DE VALIDATION 211

CHAPITRE IX : BILAN DES TRAVAUX DE RECHERCHES ET PERSPECTIVES

I. BILAN GENERAL 214
II. RESULTATS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELS 214
II.1. Etude de l'existant 215
II.2. Proposition méthodologique de maîtrise de la disponibilité 215
II.3. Expérimentation et évaluation 216
III. PERSPECTIVES DE RECHERCHE 217
III.1. Perspectives à court terme 217
III.2. Perspectives à moyen/long terme 218

ANNEXES

I. GLOSSAIRE 221
II. PUBLICATIONS PERSONNELLES 226
III. REFERENCES 228

Liste des Figures

Figure 1. Plan de la thèse 23
Figure 2. Décomposition de la maintenance [Zwingmann 96] 32
Figure 3. Arbre de disponibilité [AFNOR 86] 36
Figure 4. Inducteurs de disponibilité 37
Figure 5. L'organisation de la maintenance entre le constructeur, l'Exploitant et le Prestataire de maintenance 41
Figure 6. Formulation de la problématique de notre recherche 44
Figure 7. Les trois principaux types de disponibilité 54
Figure 8. Revue des méthodes de modélisation existantes 57
Figure 9. Les différentes étapes de l'approche Monte-Carlo 60
Figure 10. Les quatre étapes clés pour la modélisation de l'exploitation 62
Figure 11. Représentation arborescente des différentes méthodes de résolution d'ordonnancement 70
Figure 12. Représentation automaticienne d'un ordonnancement réactif 73
Figure 13. Représentation d'un ordonnancement réactif pur 74
Figure 14. Représentation d'un ordonnancement prédictif 76
Figure 15. Représentation d'un ordonnancement proactif 80
Figure 16. Modèle d'ordonnancement proactif proposé dans cette étude 82
Figure 17. Démarche de modélisation de l'exploitation 91
Figure 18. Les quatre étapes clés de la méthode de modélisation de l'exploitation 92
Figure 19. Arborescence des paramètres de modélisation de la demande 95
Figure 20. Principe de modélisation de la demande 96
Figure 21. Exemple d'une réalisation de planning stochastique 97
Figure 22. Processus de modélisation d'une demande stochastique 98
Figure 23. Exemple de planning déterministe 99
Figure 24. Processus de modélisation d'une demande déterministe 100
Figure 25. Description d'une file d'attente 101
Figure 26. Processus de modélisation de l'affectation en lien avec le modèle de demande et de maintenance 103
Figure 27. Principe de planification de l'affectation (moyen terme et court terme) 104
Figure 28. Processus d'affectation des systèmes aux missions 105
Figure 29. Lien entre le processus de maintenance programmée et le processus de maintenance non programmée 106
Figure 30. Processus de maintenance programmée 107
Figure 31. Description d'une loi triangulaire de paramètres T (min, mode, max) 112
Figure 32. Processus de maintenance non programmée 116
Figure 33. Analyse de l'exploitation 119
Figure 34. Evaluation de la disponibilité (Niveau système) 121
Figure 35. Evaluation de la disponibilité d'une flotte de systèmes 123
Figure 36. Processus d'évaluation de la disponibilité 126
Figure 37. Problème lié à l'antagonisme du planning de missions et du planning de maintenance 130
Figure 38. Approche de réordonnancement proactif 132
Figure 39. Interaction entre la phase de sélection des heuristiques et de proposition du programme de maintenance 135
Figure 40. Arbre de sélection des heuristiques associé à la solution de réordonnancement évaluée en termes de disponibilité prévisionnelle 136
Figure 41. Représentation arborescente des heuristiques de réordonnancement 140
Figure 42. Démarche de réordonnancement par décalage 141

Figure 43. Description du principe de sélection des tâches de maintenance à réordonnancer 142
Figure 44. Schéma de principe du processus de décalage des tâches 143
Figure 45. Analyse de la plage de décalage 144
Figure 46. Démarche de réordonnancement par agrégation 147
Figure 47. Principe de réordonnancement par agrégation suivant le temps d'immobilisation engendré par les activités de maintenance 148
Figure 48. Description des stratégies d'agrégation possibles 149
Figure 49. Présentation des lots de tâches de maintenance 150
Figure 50. Processus de réordonnancement par agrégation suivant le zonage du système 151
Figure 51. Description des zones du système S 152
Figure 52. Principe d'agrégation des tâches de maintenance suivant les zones identifiées du système 154
Figure 53. Démarche de réordonnancement par désagrégation 156
Figure 54. Processus de réordonnancement par désagrégation suivant le temps d'immobilisation du système 158
Figure 55. Description des stratégies de désagrégation possibles 159
Figure 56. Processus de réordonnancement par désagrégation suivant le zonage du système 160
Figure 57. Principe de désagrégation de visites par zonage 161
Figure 58. Cartographie de l'exploitation 168
Figure 59. Diagramme de Gantt permettant l'exploitation de la flotte (Planning de demande, Planning de maintenance) 173
Figure 60. Diagramme de Gantt présentant l'exploitation de la flotte (Planning de demande, Planning de maintenance programmée et non programmée) 178
Figure 61. Distribution des trois indicateurs définis dans le chapitre V pour la flotte 180
Figure 62. Evolution de la capacité et charge de main d'œuvre au cours du temps de référence 183
Figure 63. Décomposition des paramètres influant sur la disponibilité 189
Figure 64. Evolution de la disponibilité / Affectation des deux systèmes 190
Figure 65. Arbre de solution de réordonnancement hors ligne 193
Figure 66. Evolution du taux de réussite / nb de fragmentation moyen par visite 194
Figure 67. Représentation des plannings de maintenance des systèmes S1 (HC1), S2 (HC2), S3(HC3), S4(HC4) après fragmentation des visites S, T, GV 195
Figure 68. Evolution de la disponibilité opérationnelle et du taux de réussite de mission /nombres de simulation 196
Figure 69. Représentation des plannings de maintenance des systèmes S1 (HC1), S2(HC2), S3(HC3), S4(HC4) après fragmentation et analyse des plages de décalage (A-B) 197
Figure 70. Procédé de maîtrise de la disponibilité de l'exploitation 199
Figure 71. Place de la proposition de solution dans notre démarche d'étude 199
Figure 72. Validation et intégration de nos propositions au sein de notre démarche de recherche 203
Figure 73. Processus de traitement pour la maîtrise de la disponibilité 205
Figure 74. Processus de traitement des données nécessaires à la maîtrise de la disponibilité 208

Liste des Tableaux

Tableau 1. Synthèse des types de détection d'anomalie et des ressources mises en œuvre. 34
Tableau 2. Codification des types de disponibilité d'un aéronef 55
Tableau 3. Définition des paramètres de l'équation 1 93
Tableau 4. Définition des paramètres de l'équation 5 108
Tableau 5. Définition des paramètres de l'équation 6 109
Tableau 6. Définition des paramètres de l'équation 8 109
Tableau 7. Définition des paramètres de l'équation 9 110
Tableau 8. Définition des paramètres de l'équation 13 111
Tableau 9. Définition des paramètres de l'équation 19 116
Tableau 10. Définition des paramètres de l'équation 20 117
Tableau 11. Définition des paramètres de l'équation 21 118
Tableau 12. Définition des paramètres de l'équation 22 118
Tableau 13. Définition des paramètres de l'équation 25 122
Tableau 14. Définition des paramètres de l'équation 26 122
Tableau 15. Définition des paramètres de l'équation 27 123
Tableau 16. Représentation et définition des temps d'exploitation 137
Tableau 17. Caractéristique de la demande 169
Tableau 18. Description du modèle de demande 169
Tableau 19. Temps de fonctionnement après affectations des aéronefs 170
Tableau 20. Etat initial de chaque aéronef 170
Tableau 21. Description des échéances et des durées de visites de maintenance par aéronef 171
Tableau 22. Description des durées nominales et du besoin en Main d'œuvre maximal par échéance de maintenance 172
Tableau 23. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil (Planification initiale) 175
Tableau 24. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil (Planification consolidée) 176
Tableau 25. Etat de la fiabilité des aéronefs et du nombre de pannes potentielles 177
Tableau 26. Description des dates de défaillances prévisionnelles de l'appareil HC1 pour les quatre périodes d'activité 177
Tableau 27. Description des échéances et des durées de visites de maintenance par aéronef 181
Tableau 28. Description des délais de mise à disposition des ressources selon 3 paramètres d'une loi triangulaire (min, mode, max) 184
Tableau 29. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil 185
Tableau 30. Description des délais de mise à disposition des ressources selon 3 paramètres d'une loi triangulaire (min, mode, max) 186
Tableau 31. Synthèse de l'évaluation des indicateurs de disponibilité 187
Tableau 32. Synthèse de l'évaluation des indicateurs de disponibilité 188
Tableau 33. Gains potentiels en disponibilité en fonction des leviers d'optimisation 191
Tableau 34. Synthèse des scénarios d'optimisation par décalage des tâches de maintenance 196
Tableau 35. Synthèse de la méthode de validation de nos propositions 204

« La science restera toujours la satisfaction du plus haut désir de notre nature, la curiosité ; elle fournira à l'homme le seul moyen qu'il ait pour améliorer son sort ».

Ernest RENAN[1]

[1] Extrait de *L'Avenir de la science*

INTRODUCTION

GENERALE

CHAPITRE I :

Introduction générale

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

I. DISPONIBILITE DES SYSTEMES COMPLEXES : UN ENJEU INDUSTRIEL 18
II. PROBLEMATIQUE GENERALE 19
III. CADRE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE 21
III.1. Cadre de la recherche 21
III.2. Objectifs de la recherche 21
IV. ORGANISATION DU MEMOIRE 22
IV.1. Plan de lecture 22
IV.2. Repères typographiques 23

Chapitre I : Introduction générale

« Même l'organisation la plus parfaite a besoin d'évoluer tous les dix ans ».

Bernard CALVET[2]

I. DISPONIBILITE DES SYSTEMES COMPLEXES : UN ENJEU INDUSTRIEL

Dans un contexte de concurrence internationale accrue, la complexité croissante des systèmes ainsi que la généralisation de la tolérance aux conditions sévères d'usage impliquent non seulement une maîtrise de la phase d'exploitation mais également des processus de production.
En effet, l'exploitation d'un système sera étroitement liée à la réalisation d'un bien ou d'un service. L'exploitation d'un système peut se présenter dans ce sens comme un vecteur de productivité qu'il est nécessaire de maintenir en vue d'assurer la continuité des services de l'exploitant.
Ce niveau de service peut-être caractérisé par un certain nombre d'indicateurs de performance. On emploie souvent les concepts de disponibilité, de fiabilité, de taux d'engagement, de rendement. Ces concepts bien que complémentaires ont des significations et des finalités différentes. Nous nous intéresserons, dans cette thèse, plus particulièrement au concept de disponibilité et à la façon de l'évaluer. Dans ce cadre, on parlera de plus en plus de la notion de **maîtrise de la disponibilité**.

En effet, la disponibilité d'un système est une caractéristique complexe à définir, à expliciter et à appréhender tant pour l'exploitant que pour les industriels.

Par le passé, les industriels exploitaient la notion de disponibilité au stade de la conception pour quantifier et classer des variantes de solutions techniques. Les modèles de disponibilité alors développés étaient centrés sur les caractéristiques techniques des systèmes telles que la fiabilité et la maintenabilité.
Aujourd'hui, l'évolution de l'usage de la notion de disponibilité tend de plus en plus vers un engagement contractuel, corollaire d'un environnement de plus en plus contraint. En effet, l'ambition actuelle des exploitants de systèmes complexes (Aéronefs, Trains, Navires, Centrales électriques,..) est de réduire au maximum leurs coûts de soutien et de fonctionnement en envisageant une

[2] Homme d'Affaires né en 1935, Président de l'Union Française des Industries Pétrolières.

implication contractualisée plus importante des industriels qui conçoivent et fabriquent ces systèmes.
Dans ce nouveau contexte, la prise en compte de la disponibilité en tant qu'engagement contractuel nécessite de disposer de modèles intégrant l'ensemble des facteurs d'influence et en fournissant une vision partagée par l'ensemble des acteurs : industriels et exploitants.

Pour atteindre cet objectif, les industriels doivent avoir à leur disposition des méthodes et des outils permettant de modéliser l'exploitation des systèmes pour pouvoir en évaluer la disponibilité et la maîtriser. Les modèles résultant permettront d'agir sur les leviers d'optimisation de la disponibilité et de guider les industriels dans leurs décisions.

II. PROBLEMATIQUE GENERALE

Notre problématique se place dans le cadre de la **maîtrise de la disponibilité** d'un système complexe dans le cadre de son exploitation. Nous définirons l'exploitation d'un système complexe comme l'ensemble des moyens mis en œuvre pour l'utilisation et la maintenance d'un système (Aéronefs, Trains,..) [Djeridi et al., 2010]. Dans cette définition, la notion d'utilisation d'un système est caractérisée par l'organisation de ses missions. Cette définition met aussi en évidence le concept de maintenance qui met en œuvre l'ensemble des activités permettant le rétablissement d'un système à la suite d'un arrêt programmé ou non programmé.

La maîtrise de la disponibilité s'appuie sur différentes notions complexes telles que :

- l'identification des contraintes opérationnelles de l'exploitation,
- la prévision des missions,
- l'identification et le choix des stratégies de maintenance,
- l'approvisionnement en pièces de rechange et en outillages,
- la mobilisation de compétences.

Dans ce cadre, nous proposons de mettre en lumière deux sous problèmes ; à savoir **l'identification des contraintes opérationnelles** dans un premier temps, et dans un second temps, **les méthodes de modélisation de l'exploitation**.

L'identification des contraintes opérationnelles se révèle l'un des problèmes majeurs de la maîtrise de la disponibilité. Cette maîtrise passe généralement par la prise en compte de la connaissance du contexte opérationnel dans lequel vont évoluer les systèmes. A ce titre, les contraintes opérationnelles sont variables d'un secteur d'activité à un autre, impactant directement la gestion de la

disponibilité d'un ensemble de systèmes. Il est donc nécessaire de modéliser les contraintes opérationnelles d'un secteur d'activité : sa demande et ses contraintes logistiques.
De plus, des contraintes opérationnelles sont directement liées aux caractéristiques de maintenance (Maintenance programmée, Maintenance non programmée) d'un système. Ces caractéristiques de maintenance peuvent se trouver inadaptées vis-à-vis de l'organisation de maintenance existante. Dans ce cadre, la maîtrise de la disponibilité consistera à proposer une ou plusieurs « stratégies de réordonnancement » du programme de maintenance permettant d'aménager les opérations de maintenance programmée et de rendre la planification de la maintenance suffisamment robuste pour pouvoir anticiper les évènements perturbateurs.
Ainsi, la connaissance du contexte opérationnel permet d'identifier l'impact d'une indisponibilité sur l'organisation ou sur le service délivré. L'identification, l'analyse de ces contraintes opérationnelles passe par la définition d'indicateurs de disponibilité qui devront être évalués et mis en œuvre pour l'optimisation de l'exploitation d'un ensemble de systèmes.

La maîtrise de la disponibilité impose aux industriels :

- de se doter de **méthodes de modélisation de l'exploitation** performantes permettant de dresser un état des lieux de l'organisation,
- de proposer des prévisions de performances,
- d'optimiser cette exploitation en fonction des exigences opérationnelles de l'exploitant.

Ces caractéristiques de modélisation seront à considérer, dans notre cas, à deux niveaux : la méthodologie à proposer pour modéliser une exploitation d'une part et le recours à des approches de simulation nécessaires à la construction de scénarios d'exploitation pertinents.
Qu'elles soient réalisées chez les constructeurs ou les exploitants de systèmes, les analyses de disponibilité faites dans l'objectif d'apporter des solutions à l'amélioration globale de l'exploitation permettent de mettre en évidence les difficultés pour évaluer la disponibilité. L'évaluation de la disponibilité est un processus qui dépend d'un important volume de données hétérogènes.
De ce fait, cet aspect méthodologique pour évaluer la disponibilité sera une des contributions de cette thèse, notamment pour prendre en compte la modélisation des missions, de l'affectation des systèmes aux missions, de la gestion logistique des consommables, des outillages et de la main d'œuvre et enfin de l'organisation de la maintenance programmée.

L'autre principale contribution concernera la proposition de scénarios d'exploitation permettant d'aider les décideurs dans leurs prises de décisions.

Cette proposition de scénarios d'exploitation s'appuiera sur la recherche de solutions permettant d'optimiser l'exploitation de système.
Le recours aux approches de simulation présente un intérêt dans ce domaine d'étude pour prendre en compte le caractère incertain des données auquel est confrontée la gestion d'une exploitation de systèmes complexes, à savoir la gestion des missions et de la maintenance. Nous présenterons dans ce mémoire des éléments méthodologiques permettant d'utiliser de manière « pratique » les moyens de simulation pour analyser plus finement la gestion de l'exploitation.

Dans ce paragraphe, nous avons présenté la problématique dans laquelle s'insèrent nos travaux de recherche. Par là-même, nous présentons les deux sous problématiques que nous allons traiter dans ce mémoire à savoir :

- l'identification des contraintes opérationnelles,
- les moyens méthodologiques permettant la modélisation de l'exploitation.

Nous développerons ces problématiques dans les chapitres suivants pour en distinguer les aspects scientifiques et industriels.

III. CADRE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

III.1. Cadre de la recherche

Ces travaux ont débuté en juin 2007. Ils ont été menés au sein de la société Eurocopter appartenant au groupe EADS.
Né en juillet 2000, ce groupe est le résultat de la fusion du groupe français Aérospatial-Matra, de l'allemand DASA (Daimler Chrysler Aerospace) et de l'espagnol CASA (Construcciones Aeronauticas). Ce groupe se trouve en position de leader du marché de l'aérospatiale civile (80 % de son activité) depuis 2003 et de l'industrie militaire européenne (20% de son activité).
L'activité du groupe est divisée en cinq segments : Airbus dans l'aviation civile, les avions de transport militaire, les hélicoptères avec Eurocopter, les systèmes de défense et de sécurité, et l'espace. Nous nous intéresserons dans notre étude au cas particulier du secteur de l'hélicoptère.
Ces travaux ont également été réalisés en collaboration avec le Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (**LSIS UMR n°6168**) et le Laboratoire Organisation Gestion Industrielle Logistique (**LOGIL Arts et Métiers PARISTECH**).

III.2. Objectifs de la recherche

L'objectif global de ce travail de recherche est de proposer une démarche participant à la maîtrise de la disponibilité opérationnelle d'un aéronef et à

l'intégration de ce paramètre dans le choix des stratégies de maintenance autant en conception qu'en exploitation. Ce mémoire décline cet objectif en huit sous-objectifs (Figure 1) :

[**O1**]- Préciser le cadre de la recherche,

[**O2**]- Traduire les besoins académiques et industriels sous forme d'une problématique de recherche,

[**O3**]- Etudier la littérature sur les méthodes et outils permettant d'améliorer la maîtrise de la disponibilité et les configurations de maintenance,

[**O4**]- Etablir un audit des pratiques d'analyse de la disponibilité et d'optimisation du programme de maintenance par la disponibilité en vue de cartographier les dysfonctionnements associés à son déploiement,

[**O5**]- Proposer un processus d'analyse de la disponibilité permettant d'évaluer les performances opérationnelles d'une exploitation d'aéronefs et de détecter les insuffisances associées à ces performances,

[**O6**]- Proposer un processus d'analyse et de réordonnancement du programme de maintenance d'une exploitation d'aéronefs,

[**O7**]- Expérimenter les nouveaux processus dans les phases de conception de la politique de maintenance de systèmes,

[**O8**]- Evaluer les apports et les limites de nos propositions.

IV. ORGANISATION DU MEMOIRE

IV.1. Plan de lecture

Ce mémoire de thèse a pour objectif de proposer une méthodologie « pratique » destinée autant aux chercheurs qu'aux industriels cherchant à évaluer et à optimiser leur disponibilité. Cette méthodologie concerne l'optimisation d'un programme de maintenance au regard de sa disponibilité pour des systèmes complexes. Elle repose principalement sur une méthode de modélisation de la disponibilité et sur une méthode d'amélioration de la planification de la maintenance.
Ce mémoire de thèse se compose de 3 parties contenant plusieurs chapitres. Le plan retenu est présenté dans la figure ci-dessous (Figure 1) :
La **première partie** constituée du chapitre II définit le contexte et la problématique de recherche.

La **deuxième partie** constituée des chapitres III et IV consiste à analyser l'existant. L'analyse de la littérature est réalisée dans les chapitres III (sur les définitions et méthodes de modélisation de la disponibilité) et IV (sur les méthodes de réordonnancement d'un programme de maintenance). Au travers de ces deux chapitres nous présenterons synthétiquement les pratiques mises en place à Eurocopter.
La **troisième partie** consiste à décrire, mettre en œuvre et évaluer l'ensemble de nos propositions.

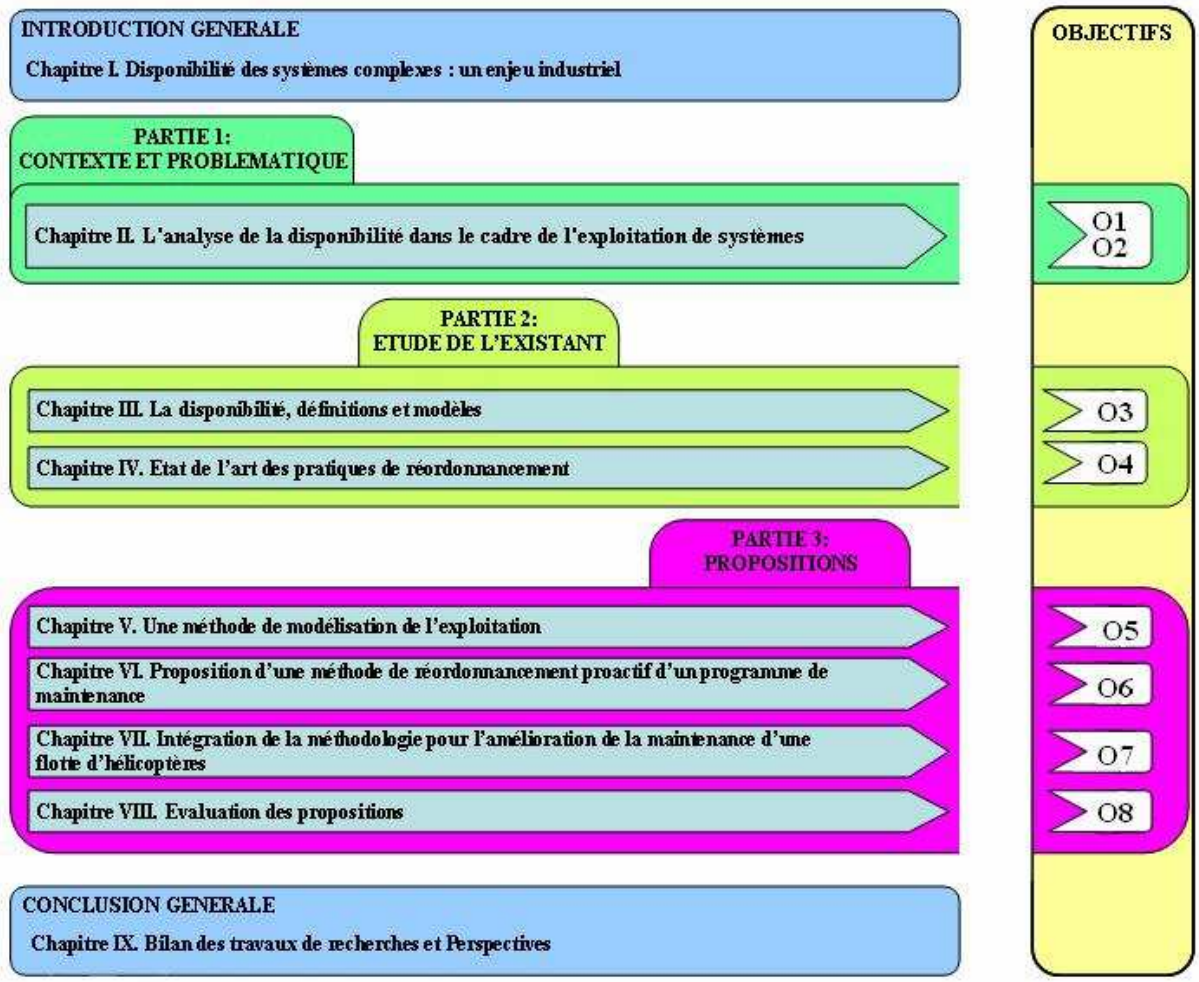


Figure 1. Plan de la thèse

IV.2. Repères typographiques

Les citations seront mises en évidence en italique.
Les points importants seront écrits en gras.

Les termes suivis d’un astérisque seront référencés et explicités dans le glossaire en annexe.

Les résumés de début de chapitre et les synthèses de fin de chapitre sont précédés et suivis d’une ligne horizontale.

Les plans de chapitre seront encadrés.

Les synthèses de paragraphes seront encadrées par un trait fin à gauche du texte.

Première Partie

-

CONTEXTE ET

PROBLEMATIQUE

CHAPITRE II :

L’Analyse de la disponibilité dans le cadre de l’exploitation de systèmes

Résumé

Ce chapitre a pour objectif de poser la problématique relative à la maîtrise de la disponibilité.
Nous présentons dans un premier temps les notions de disponibilité ainsi que les enjeux inhérents à la disponibilité de système. Dans un deuxième temps, nous décrirons le besoin industriel relatif à la maîtrise de la disponibilité en décrivant le contexte complexe d’une exploitation de systèmes et les différents axes de travail choisis pour guider notre travail de recherche. Dans un dernier temps, nous terminerons par la présentation de nos problématiques.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE II : L'ANALYSE DE LA DISPONIBILITE DANS LE CADRE DE L'EXPLOITATION DE SYSTEMES

I. INTRODUCTION : L'EXPLOITATION D'UNE FLOTTE DE SYSTEMES 29
II. NOTIONS PRELIMINAIRES DE LA DISPONIBILITE 29
II.1. Les enjeux de la sûreté de fonctionnement 30
II.1.1. Fiabilité 30
II.1.2. Maintenabilité 30
II.1.3. Sécurité 30
II.1.4. Disponibilité 31
II.2. Les enjeux de la maintenance des systèmes complexes 31
II.2.1. Définitions générales 31
II.2.2. Processus de maintenance 31
II.2.3. Politique de maintenance 32
II.2.3.1. Maintenance préventive 33
II.2.3.2. Maintenance corrective 33
II.2.3.3. Indicateurs de maintenance 34
II.3. Lien entre la disponibilité et l'exploitation d'un système 35
II.3.1. Définitions générales 35
II.3.2. Inducteurs de disponibilité 36
II.3.3. Enjeu de la disponibilité pour l'exploitation de systèmes 38
III. BESOIN INDUSTRIEL : MAITRISER LA DISPONIBILITE 39
III.1. Contexte opérationnel d'une exploitation 39
III.1.1. Maîtriser les contraintes opérationnelles relevant du secteur d'activité 39
III.1.2. Maîtriser l'organisation de la logistique de maintenance d'un système complexe 40
III.2. Axes de travail de la maîtrise de la disponibilité 42
III.2.1. Diagnostic des performances opérationnelles d'une exploitation 42
III.2.2. Réordonnancement du programme de maintenance 42
III.2.3. Le dimensionnement du soutien logistique 43
IV. BILAN : EMERGENCE DE LA PROBLEMATIQUE DE LA MAITRISE DE LA DISPONIBILITE 43

Chapitre II : L'Analyse de la disponibilité dans le cadre de l'exploitation de systèmes

« Une pensée n'est parfaite que lorsqu'elle est disponible, c'est-à-dire lorsqu'on peut la détacher et la placer à volonté. » - Extrait des Pensées.

Joseph JOUBERT[3]

I. INTRODUCTION : L'EXPLOITATION D'UNE FLOTTE DE SYSTEMES

De nos jours, un des objectifs majeurs d'une entreprise est de devenir et de demeurer compétitive. En effet, une entreprise doit produire toujours mieux et à moindre coût. L'avènement de l'automatisation et de l'informatisation ont permis de faire progresser considérablement l'efficacité de la production. Parallèlement, un système de production doit de moins en moins subir des temps de non production en rapport avec les objectifs de disponibilité. En d'autres termes, exceptés les arrêts inévitables dus à la production elle-même, les systèmes de production doivent le moins possible connaître l'occurrence de défaillances tout en fonctionnant à un régime offrant le rendement maximal.
Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions de disponibilité en mettant en évidence l'impact de la disponibilité sur l'organisation de l'exploitant. Dans un premier temps, nous présenterons les notions fondamentales de la disponibilité permettant de poser les principales définitions fondatrices. Dans un deuxième temps, nous allons exprimer le besoin industriel à l'origine de ces travaux de thèse qui sont centrés sur la maîtrise de la disponibilité. Dans un dernier temps, nous présenterons une synthèse de ce chapitre qui permettra de faire émerger la problématique industrielle.

II. NOTIONS PRELIMINAIRES DE LA DISPONIBILITE

Expliciter la notion de disponibilité doit être considéré dans un périmètre construit autour des concepts de Sûreté de Fonctionnement et de Maintenance.

[3] Moraliste et essayiste français du 19ème siècle.

Dans ce cadre, nous présenterons dans les paragraphes suivants les enjeux associés à ces notions pour terminer sur les enjeux attendus de la disponibilité.

II.1. Les enjeux de la sûreté de fonctionnement

La **sûreté de fonctionnement** représente "l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permettent de disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement" [Auge 98]. Ainsi la sûreté de fonctionnement englobe dans son périmètre les quatre caractéristiques d'un produit que sont la fiabilité, la sécurité, la maintenabilité et la disponibilité.

II.1.1. Fiabilité

La **fiabilité** représente "l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant une durée donnée" [AFN98]. Dans l'industrie aéronautique, la conception basée sur la fiabilité ou DFR* (Design For Reliability) consiste à produire des systèmes nécessitant le moins possible de **maintenance**, ce qui conduit à la conception de produits robustes. Cet aspect est développé dans [Poncelin 09].

II.1.2. Maintenabilité

La **maintenabilité** est "l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise lorsque la **maintenance** est réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits" [AFN98].
Dans l'industrie, les activités inhérentes à la maintenabilité sont généralement constituées de deux parties distinctes. L'une consiste à prouver les performances attendues par le client en termes de maintenabilité et l'autre consiste à définir les éléments logistiques adéquats pour constituer l'Analyse de Soutien Logistique ASL* (LSA* : Logistic Support Analysis).

II.1.3. Sécurité

La **sécurité** est "l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction sans causer de lésion ou d'atteinte à la santé" [AFN98]. Cette composante est mise en évidence, dans l'industrie par des analyses de sécurité faites dès le stade de conception mais concerne également l'analyse des remontées des incidents majeurs au constructeur permettant d'améliorer la **maintenance** de nouveaux produits.

II.1.4. Disponibilité

La **disponibilité** est, quant à elle, "l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de sa **maintenance**, à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions de temps déterminées" [AFN98]. Dans l'industrie, cette notion est transversale aux bureaux d'études et au support client permettant l'amélioration des performances opérationnelles du produit ainsi que l'amélioration des performances du client en lui proposant des services de soutien adapté. Cette notion va être explicitée dans les paragraphes suivants.

II.2. Les enjeux de la maintenance des systèmes complexes

La maintenance a fait l'objet de nombreux travaux ces dernières années. Cette notion complexe se trouve au centre de concepts comme la sûreté de fonctionnement et le soutien logistique. Ce paragraphe présente des éléments de définitions de la maintenance et les interactions existant entre ces concepts.

II.2.1. Définitions générales

L'AFNOR définit la maintenance comme étant : « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». [AFN01]
Une telle définition, peut être complétée par la définition de la gestion (management) de la maintenance. « Elle concerne toutes les activités des instances de direction qui d'une part, déterminent les objectifs, la stratégie et les responsabilités concernant la maintenance, et d'autre part les mettent en application par des moyens tels que la planification, la maîtrise et le contrôle de la maintenance, l'amélioration des méthodes dans l'entreprise (y compris dans les aspects économiques) » [Glade 05].

II.2.2. Processus de maintenance

L'analyse du processus de maintenance présenté par la figure 2, peut être décomposée en 3 parties [Zwingmann 96]. La première partie est composée des politiques de maintenance mises en place pour assurer le soutien du produit. La seconde partie est composée des évènements déclencheurs de la maintenance, incluant le test et le diagnostic mais aussi les opérations de maintenance déclenchées par l'atteinte d'une échéance de maintenance. La troisième partie

du processus de maintenance est composée des différentes tâches permettant de remettre en état de bon fonctionnement le système considéré.

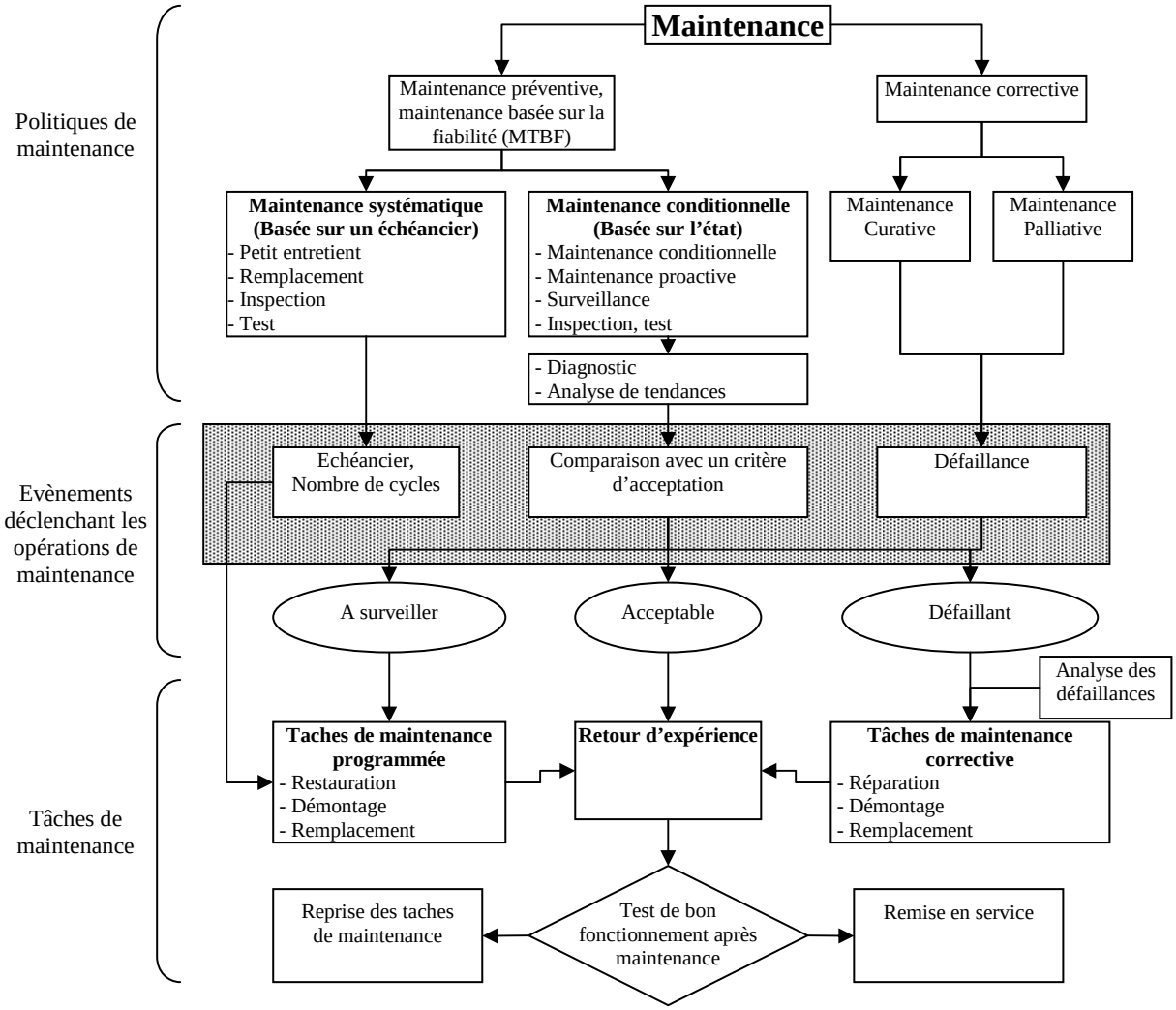


Figure 2. Décomposition de la maintenance [Zwingmann 96]

Dans le paragraphe suivant, nous présenterons les politiques de maintenance présentées dans la figure ci-dessus ainsi que l'impact de ces politiques de maintenance sur la disponibilité.

II.2.3. Politique de maintenance

La politique de maintenance donne lieu à un ensemble de documents dont l'objectif est de définir les moyens à mettre en œuvre lors d'une opération de maintenance que nous appellerons : programme de maintenance.
Dans le domaine des systèmes complexes, la maintenance est l'un des centres de coûts les plus importants. Elle peut conditionner la performance d'une organisation.

A ce titre, nous ne pouvons évoquer des problématiques d'amélioration d'une exploitation par la disponibilité sans évoquer les éléments essentiels des politiques de maintenance à savoir : la maintenance préventive, la maintenance corrective ainsi que les indicateurs de maintenance.

II.2.3.1. Maintenance préventive

La décision d'intervenir précède l'apparition du dysfonctionnement. Ce mode de maintenance permet de diminuer le nombre de défaillances, il doit induire un gain économique substantiel issu de la différence entre les coûts générés par l'intervention et la disponibilité qu'elle procure. Parmi l'ensemble des types de maintenance préventive, on en distinguera principalement deux [Dascau 01] :

- La **maintenance systématique** est caractérisée par la connaissance des dates de visite, l'intervalle d'inspection étant déterminé arbitrairement ou en fonction des lois de comportement du système.

- La **maintenance conditionnelle** se base sur des signes précurseurs annonçant l'imminence d'un dysfonctionnement ou sur l'atteinte par l'équipement d'un certain seuil de dégradation. Le système est alors soumis à des contrôles et inspections. Dans la réalité, une opération de maintenance systématique peut déclencher des opérations de maintenance conditionnelle.

On parle également de la **maintenance de conduite**, axée sur la surveillance au quotidien du système par son utilisateur, qui est par conséquent un mode combiné de maintenance conditionnelle et systématique.

II.2.3.2. Maintenance corrective

La maintenance corrective est une forme d'entretien qui consiste, une fois la défaillance survenue, à en éliminer les effets et les causes. On distingue généralement [AFN 02] :

- la **maintenance palliative** correspondant à la remise en état provisoire du matériel ayant subi un dysfonctionnement : c'est un dépannage. Cette maintenance est le plus souvent associée à des systèmes ne présentant pas d'impératif de sécurité.

- la **maintenance curative** correspondant à la remise en état définitive du système permettant l'accomplissement d'une fonction requise, après détection d'une panne [Villemeur 97].

Tous les équipements d'un système peuvent être soumis à des opérations de maintenance corrective. Les opérations de maintenance corrective sont déclenchées après la détection d'une anomalie[4] sur un équipement. Cette détection de défaillance peut être réalisée par différentes ressources (Tableau 1)

Type de détection	« Ressources » utilisées
Automatique	o Capteurs surveillant des seuils de fonctionnement. o Test intégré et diagnostic automatique du système.
Semi-automatique	o Tests intégrés déclenchés par les opérateurs de maintenance (Initiated Built In Test : IBIT*) o Tests fonctionnels avant mission : opérations réalisées afin de déterminer le bon fonctionnement des équipements avant le début d'une mission.
Non-automatique	o Rapport d'anomalie ou de défaillance établi par l'équipage du système (détection visuelle, sonore, fonctionnement anormal,…). o Equipes de maintenance lors de visites.

Tableau 1. Synthèse des types de détection d'anomalie et des ressources mises en œuvre.

II.2.3.3. Indicateurs de maintenance

Il est nécessaire d'évaluer l'impact des politiques de maintenance sélectionnées. C'est au travers d'indicateurs de performance qu'est analysée la maintenance. Un "indicateur" est une information choisie, associée à un phénomène et destinée à en observer périodiquement les évolutions au regard d'objectifs préalablement définis [Berrah 02]. Si le nombre d'indicateurs doit être limité, ils doivent néanmoins permettre d'évaluer l'impact de la maintenance sur le système. Pour cela, la norme française XP X 60-020 [AFN95] présente entre autres des indicateurs de coût de maintenance, de disponibilité (et par extension de coût d'indisponibilité) et de niveau de sécurité. Ces indicateurs sont bien souvent ramenés à des ratios tels que le rapport des coûts de maintenance sur la valeur du bien à maintenir, ou encore le rapport entre les coûts et l'usage :
- coût par heure de vol
- coût par Km par siège et par passager
- etc.

[4] Le terme « anomalie » désignera tout état de fonctionnement qui s'éloigne de ce qui est considéré comme un fonctionnement normal pouvant engendrer une défaillance voire une panne d'un système.

Par conséquent, il apparaît que tous les indicateurs (à l'exception des indicateurs de niveau de sécurité) se regroupent autour de problèmes de rentabilité. Les facteurs de performance en maintenance sont représentatifs d'une part, de ce que coûte la maintenance et d'autre part, de la disponibilité associée, à savoir ce que rapporte le système.

II.3. Lien entre la disponibilité et l'exploitation d'un système

Dans ce paragraphe, nous allons présenter le lien existant entre le concept de disponibilité et l'exploitation d'un ensemble de systèmes. Nous présenterons dans un premier paragraphe **les définitions permettant de clarifier ce lien (disponibilité – exploitation).** Dans le deuxième paragraphe, nous présenterons les **inducteurs* de disponibilité** que nous verrons à travers l'étude. Dans un dernier temps, nous nous positionnerons par rapport à ces **inducteurs pour améliorer la disponibilité**.

II.3.1. Définitions générales

L'analyse d'une exploitation peut être réalisée sous une vue temporelle. Dans cet objectif, nous utiliserons l'arbre de disponibilité tiré de la norme AFNOR [Afnor 86] (Figure 3). Cet arbre de disponibilité permet de représenter le temps d'exploitation qui est la somme du **temps requis*** et du **temps non requis***.

- Le **temps requis** est généralement le temps qui intéresse les industriels puisqu'il représente le temps dans lequel l'exploitant réalise son activité. Dans cette plage temporelle (**temps requis**), l'exploitant doit mettre en œuvre l'ensemble de ses infrastructures et ressources pour remplir les missions qui lui seront assignées.
  C'est dans cet intervalle que le système connaîtra des **temps de disponibilité** et **d'indisponibilité**.

  Le **temps de disponibilité*** regroupe le **temps de fonctionnement*** et le **temps d'attente***. Par ailleurs, le temps d'indisponibilité représente les temps d'arrêt à l'origine des activités de **maintenance** et des **causes externes** (météo, grèves,..) qui ne rentreront pas en compte dans le traitement de la disponibilité.

- Le **temps non requis** regroupe l'ensemble des temps pendant lesquels un système n'est pas mobilisé pour la réalisation d'une mission. Il est constitué du **temps potentiel de disponibilité***, du **temps d'indisponibilité pour des causes externes** et des **temps d'indisponibilité de maintenance.**

Dans cette branche du temps d'exploitation, les **temps d'indisponibilités de maintenance** comptabilisent les opérations de maintenances réalisées en temps masqué*.

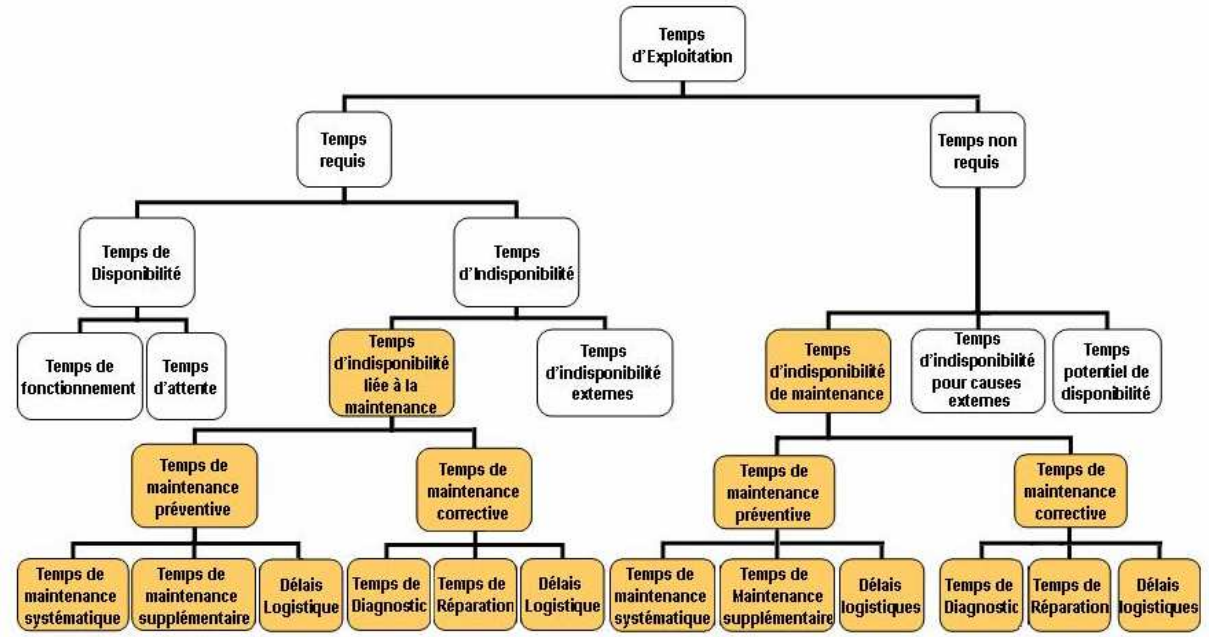


Figure 3. Arbre de disponibilité [AFNOR 86]

Une évaluation de la disponibilité est donc le résultat d'un **scénario d'exploitation*** caractérisé dans ce cas par le temps d'exploitation, le temps requis, le temps de fonctionnement et le temps d'indisponibilité lié à la maintenance.

II.3.2. Inducteurs de disponibilité

L'arbre de disponibilité permet de représenter une décomposition des temps d'exploitation mais se montre insuffisant pour présenter les inducteurs de disponibilité. Nous avons représenté les différents inducteurs de disponibilité dans la figure ci-dessous (Figure 4). Cet arbre permet de représenter les inducteurs qui permettent d'agir sur la disponibilité. Nous avons représenté deux groupes d'inducteurs : liés au système lui-même pendant la phase de conception et d'exploitation de systèmes. Nous allons reprendre chacun de ces groupes d'inducteurs pour positionner nos travaux.

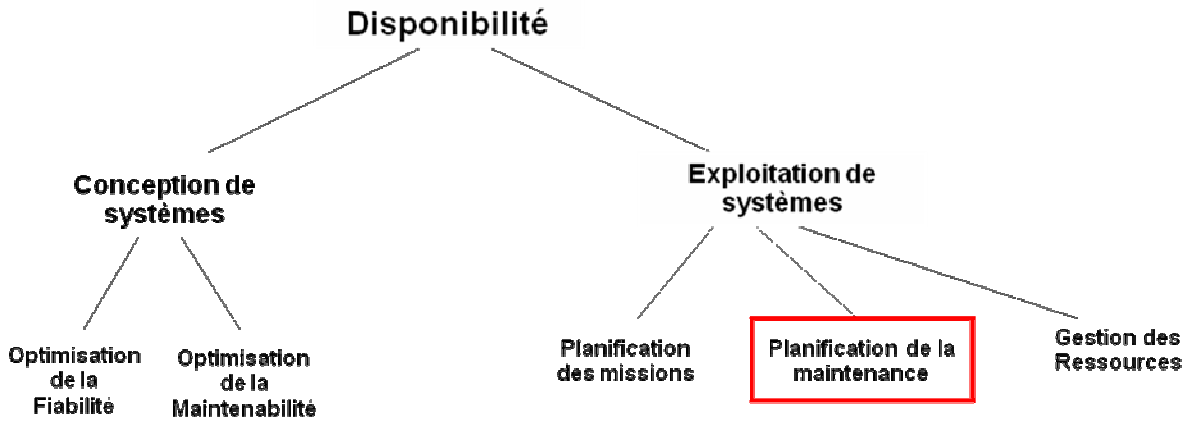


Figure 4. Inducteurs de disponibilité

- **Inducteurs liés à la conception de systèmes**

Les deux premiers inducteurs auront principalement un impact sur la conception du système. La fiabilité étant un paramètre d'entrée de notre étude, elle ne fera pas l'objet d'étude d'optimisation. Ces études de fiabilité en conception sont détaillées dans [Poncelin 09]. Concernant l'amélioration de la maintenabilité des équipements, cette activité pourra être un des points d'amélioration suite à notre étude. Si les analyses de disponibilité montrent une déficience en disponibilité dûe à une tâche de maintenance en lien à un équipement, il sera alors nécessaire de se focaliser sur l'amélioration de la maintenabilité de l'équipement en question. L'ensemble de cette analyse pourra entrer dans le cadre de l'amélioration de la disponibilité par la maintenabilité.

  - **Optimisation de la fiabilité** : Ce levier consiste à rendre le système plus fiable et à réduire les activités de maintenance. En effet, l'amélioration de la fiabilité de chaque équipement augmentera significativement le coût d'acquisition d'un système mais permet de réduire le coût de maintenance par exemple, en repoussant les échéances de maintenance sur son cycle de vie.

  - **Optimisation de la maintenabilité**: Ce levier consiste à améliorer la maintenabilité des équipements des appareils, c'est-à-dire, les activités d'analyse d'accessibilité, de démontage et de remontage. Cet inducteur implique des activités d'optimisation de la structure et de mise en œuvre des outillages pour la maintenance d'un système.

- **Inducteurs liés à l'exploitation de systèmes**

Les autres inducteurs impacteront l'organisation de l'exploitant dans la **planification des missions**, **la planification de la maintenance** et la **gestion des ressources**.

  - **Planification des missions** : Cet inducteur permet de mettre en œuvre des méthodes d'amélioration du temps d'attente d'un système. Cette activité est de grande importance pour des exploitants de systèmes de processus discontinus (avions, navires,..). Elle se résume en général à cette interrogation : Quel appareil dois-je utiliser pour cette mission, compte tenu de sa maintenance future ?

  - **Planification de la maintenance** : Cet inducteur consiste à organiser les échéances de maintenance de manière à adapter les opérations de maintenance à la demande en mission. Cette activité utilise principalement les méthodes de réordonnancement pour réorganiser les échéances en respectant les contraintes de tolérance.

  - **Gestion des ressources**: Cette activité consiste à mettre à disposition les ressources nécessaires pour réaliser les opérations de maintenance.

En phase d'exploitation du système, l'organisation des échéances de maintenance conditionne généralement les deux autres inducteurs à savoir la gestion des ressources et de la chaîne d'approvisionnement et la gestion de l'attente des systèmes.

II.3.3. Enjeu de la disponibilité pour l'exploitation de systèmes

Dans ce cadre, nous positionnerons nos travaux de thèse dans le but d'évaluer la disponibilité d'une exploitation de système et d'améliorer l'organisation des échéances de maintenance dans le cas où la disponibilité n'atteint pas les exigences du client.
L'organisation des échéances de maintenance en fonction de la demande en mission du client permet de proposer une planification de la maintenance personnalisée. Cependant la proposition d'une planification personnalisée de la maintenance au client n'exclut pas de prendre en compte la gestion des ressources et de l'attente des systèmes. De ce fait, nous proposerons une modélisation de ces inducteurs pour améliorer l'exploitation.

III. BESOIN INDUSTRIEL : MAITRISER LA DISPONIBILITE

Maîtriser la disponibilité d'un système complexe nécessite une connaissance suffisamment approfondie du **contexte opérationnel** dans lequel les systèmes vont évoluer (Contraintes, Besoins en ressources,..). Des perturbations même « mineures » telles qu'une défaillance d'un des systèmes ou l'indisponibilité d'une main d'œuvre nécessaire au rétablissement d'un système peuvent être à l'origine de dysfonctionnements importants et causer l'arrêt total de toute une exploitation. La maîtrise de la disponibilité, dans ce cas, consistera à rétablir le système ou mettre à disposition la ressource nécessaire pour réduire l'indisponibilité de l'exploitation.

Dans ce paragraphe nous présenterons les différentes contraintes liées au **contexte opérationnel** d'une exploitation dans un premier temps. Dans un deuxième temps, nous présenterons les différents **axes de travail** sur lesquels nous allons nous pencher pour caractériser une exploitation pour optimiser sa performance en termes de disponibilité.

III.1. Contexte opérationnel d'une exploitation

La notion de contexte est primordiale dans le domaine de la gestion d'une flotte de systèmes. Dans ce cadre, nous définirons un contexte opérationnel comme étant un ensemble de contraintes sous lesquelles un dispositif est utilisé. Ces contraintes peuvent concerner la demande en mission, la demande en ressource (main d'œuvre, matériels), les délais d'approvisionnement des pièces de rechange, le climat, etc. Parmi toutes ces contraintes nous allons préciser dans les paragraphes suivants, les deux principales contraintes à savoir, **le secteur d'activité de l'exploitant** ou le type de mission qu'un système aura à réaliser et la **chaîne logistique** qui constituera le soutien de la flotte.

III.1.1. Maîtriser les contraintes opérationnelles relevant du secteur d'activité

Les contraintes liées aux secteurs d'activité représentent une part majeure des contraintes d'exploitation d'une flotte. En effet, une étude d'évaluation de la disponibilité opérationnelle ne peut s'affranchir des caractéristiques de demande d'une exploitation. Ces caractéristiques de demande permettent de proposer plusieurs scénarios de mission qu'un système sera amené à exécuter.

Par ailleurs, en pratique, chaque secteur d'activité va imposer ses propres contraintes opérationnelles. Par exemple, le marché du transport par hélicoptère se divise en 6 grands segments : le secours médical, le transport offshore, le transport VIP, le transport et l'appui militaire, le garde frontière et l'écolage.

Chacun de ces segments d'activités va mettre en œuvre des contraintes de mission, d'approvisionnement et de maintenance différentes.

> *Par exemple, les institutions militaires auront des profils de missions irréguliers au cours du temps, avec une politique d'approvisionnement surdimensionnée permettant d'assurer une indépendance logistique. La maintenance sera généralement effectuée par blocs. Contrairement au domaine militaire, les opérateurs d'extraction offshore, auront des caractéristiques de demande relativement régulières, avec des stratégies de réordonnancement de la maintenance au plus juste et redistribuée.*

Ainsi, la **connaissance*** du contexte opérationnel permet d'identifier l'impact d'une indisponibilité sur l'organisation ou sur le service délivré et ainsi de définir des indicateurs de disponibilité qui devront être évalués et mis en œuvre pour l'optimisation du coût d'exploitation d'une flotte de systèmes.

III.1.2. Maîtriser l'organisation de la logistique de maintenance d'un système complexe

Aujourd'hui la maintenance est planifiée en partant du principe que les systèmes sont disponibles à tout moment pour exécuter des missions sur un horizon planifié. Cependant, ils peuvent être en panne ou bien en réparation. C'est dans ce cadre que la disponibilité est devenue un enjeu commercial pour les constructeurs puisqu'il s'agit de limiter au maximum l'immobilisation de ces systèmes. Par ailleurs, la maintenance de systèmes s'appuie sur une organisation multi acteurs généralement développée autour du constructeur (A) du système (B), de l'exploitant (C) du système et de l'opérateur de maintenance (D) (Figure 5).
Cette organisation met en évidence 3 relations clients fournisseurs : la relation Constructeur- Exploitant, la relation Exploitant-Opérateur de maintenance, la relation Opérateur de maintenance- Constructeur.
La première relation concerne la livraison du système ainsi que l'ensemble des moyens nécessaires à son exploitation (documentation, outillage, pièces de rechange,…). Parmi ces moyens, nous mettons en évidence le **Programme Recommandé d'Entretien**[5] (P.R.E.) du système qui présente l'ensemble des opérations de maintenance à l'usage de **l'exploitant**.
La deuxième relation met en évidence le lien entre **l'exploitant** du système et **l'opérateur de maintenance**. En effet, l'organisation de maintenance de

[5] Ce document précise les opérations et limitations impératives pour assurer le maintien du fonctionnement d'un système, ainsi qu'un ensemble d'opérations et échéances, recommandées par le constructeur, destinées à en assurer sa disponibilité opérationnelle quelles que soient les diversités d'emploi de l'appareil.

l'exploitant peut être insuffisante pour réaliser de lourdes opérations de maintenance. Dans ce cas, l'exploitant fera appel à un **opérateur de maintenance** qui pourrait avoir un engagement de disponibilité du système envers l'exploitant.
Enfin, la dernière relation concerne des **concertations d'ordres techniques** sur la maintenance du système ou sur sa conception entre le constructeur du système et l'opérateur de maintenance.

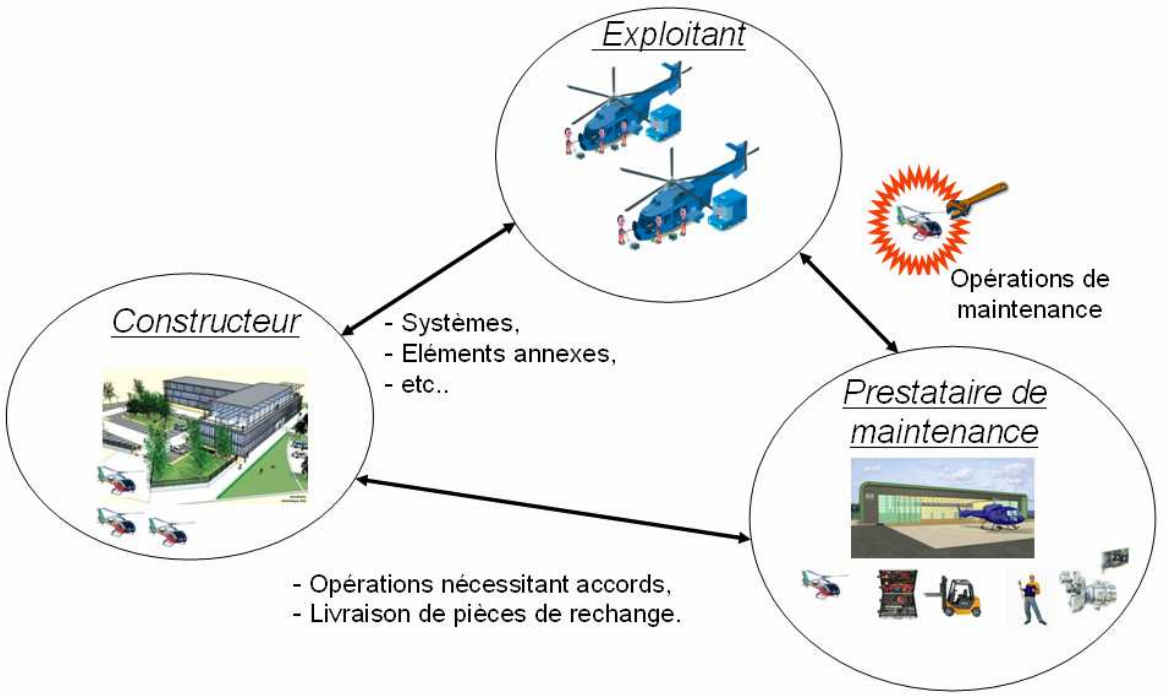


Figure 5. L'organisation de la maintenance entre le constructeur, l'Exploitant et le Prestataire de maintenance

La gestion de la disponibilité est complexe dans l'exploitation d'un système industriel. En effet, la gestion de la disponibilité met en jeu d'une part, l'aspect complexité du système, mis en évidence par l'importante quantité de sous-systèmes, de contraintes, de ressources nécessaires. D'autre part, la collaboration de plusieurs organisations différentes met également en évidence une autre forme de complexité puisqu'il s'agit dans ces relations de gérer l'ensemble des flux de matières (consommables, rechanges, outillages, expertise, documentation,..) et des flux d'informations (certification des décisions prises, surveillance de l'état des stocks, retour d'expérience,…) nécessaires au soutien du système industriel.

Nous avons souligné au long de ce paragraphe les principales **contraintes opérationnelles** pouvant influer sur l'exploitation à savoir : les contraintes liées **au secteur d'activité de l'exploitant** et à **l'organisation de la chaîne logistique**. De ce fait, il est nécessaire de **définir et de prioriser des axes de travail** permettant d'optimiser la disponibilité.

III.2. Axes de travail de la maîtrise de la disponibilité

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la maîtrise de la disponibilité est un objectif majeur des industriels et que ce concept est lié à des contraintes opérationnelles fortes et de plusieurs types (Demande en missions, Maintenance, Acteurs industriels, Objectifs de disponibilité,..). Nous allons présenter dans ce paragraphe les axes de travail touchant à la maîtrise de la disponibilité, qui seront structurés en 3 parties : le **diagnostic des performances opérationnelles**, **l'analyse de la disponibilité pour le développement et l'amélioration de la politique de maintenance** et **l'analyse de la disponibilité pour la proposition des offres de support**.

III.2.1. Diagnostic des performances opérationnelles d'une exploitation

Le diagnostic des performances opérationnelles consiste à dresser un état des lieux d'une exploitation. Ce diagnostic est au centre d'une activité qui est encore insuffisamment développée au sein de l'industrie, notamment dans l'industrie aéronautique. Cette activité vise à identifier les sources d'indisponibilité qu'elles soient d'ordre organisationnel ou systémique. Cet axe de recherche a pour objectif de donner une visibilité à l'exploitant sur son activité. Le travail consiste donc à proposer plusieurs scénarios d'exploitation sur un horizon plus ou moins long terme. Ces scénarios d'exploitation seront proposés en utilisant des méthodes de prévision de la demande et de la maintenance que l'exploitant pourrait avoir à réaliser. De ce fait, il sera possible de prévoir la disponibilité opérationnelle de chaque scénario et de mettre en œuvre des méthodes de choix de scénario permettant d'aider l'industriel dans sa prise de décision et par là même de focaliser les contributeurs d'indisponibilités.

III.2.2. Réordonnancement du programme de maintenance

La politique de maintenance générale doit définir le cadre des activités de maintenance afin que les différents acteurs ainsi que les services connexes puissent disposer de bases et références techniques pour organiser la définition et l'élaboration et la mise en œuvre de la maintenance.
Dans l'industrie des hélicoptères, la politique de maintenance peut être commune à plusieurs types d'aéronefs. Cette pratique impose à chaque exploitant de personnaliser sa maintenance entraînant des problèmes d'organisation, généralement causés par une analyse approximative de la disponibilité exigée par l'exploitation. L'intégration du paramètre disponibilité permet de prendre en compte les contraintes associées à chaque secteur d'activité pour spécifier la maintenance en fonction du contexte opérationnel de l'exploitant.

III.2.3. Le dimensionnement du soutien logistique

L'exploitation de système complexe nécessite la mise à disposition des ressources (main d'œuvre, pièces de rechange, outillages) pour assurer la maintenance de ces systèmes et ainsi assurer sa production.
Dans le domaine de l'aéronautique, on parle de plus en plus de contrat de maintenance globale ou de soutien logistique global en disponibilité. Ces contrats de soutien logistique présentent un enjeu commercial pour les constructeurs de systèmes complexes mais peuvent comporter des risques importants dans le cas d'une prise en compte partielle des facteurs d'indisponibilités d'une exploitation de systèmes.

Dans cet optique, cet axe de recherche consiste à exploiter des techniques de modélisation et de simulation permettant d'évaluer voire de valider les scénarios de soutien logistique que proposeront les industriels. Le scénario de soutien logistique décrira l'ensemble des activités assurées par les industriels avec un taux d'engagement défini.

IV. BILAN : EMERGENCE DE LA PROBLEMATIQUE DE LA MAITRISE DE LA DISPONIBILITE

La maîtrise de la disponibilité est une problématique vaste qui réunit les concepts d'évaluation des performances d'une organisation, d'amélioration de la maintenance, de gestion de l'utilisation des systèmes en rapport aux missions et de gestion de la chaîne logistique. La maîtrise complète de la disponibilité d'une exploitation permet de donner une plus grande visibilité sur l'activité d'une flotte de système permettant d'anticiper des évènements imprévus et de favoriser une plus grande réactivité de l'organisation.

Pour maîtriser la disponibilité des équipements aéronautiques, les constructeurs et exploitants de systèmes s'intéressent aujourd'hui aux moyens méthodologiques permettant de définir et d'évaluer la disponibilité. Nous proposons dans cette thèse une méthodologie construite autour de trois étapes distinctes :

- La caractérisation d'une exploitation par le biais d'un diagnostic opérationnel.
- L'évaluation de la performance opérationnelle de l'exploitation en identifiant les indicateurs de disponibilité adéquats.
- L'optimisation de la maintenance par rapport au coût d'exploitation d'une flotte de systèmes.

Synthèse :

La démarche de formulation de notre problématique est décrite sur la Figure 6:

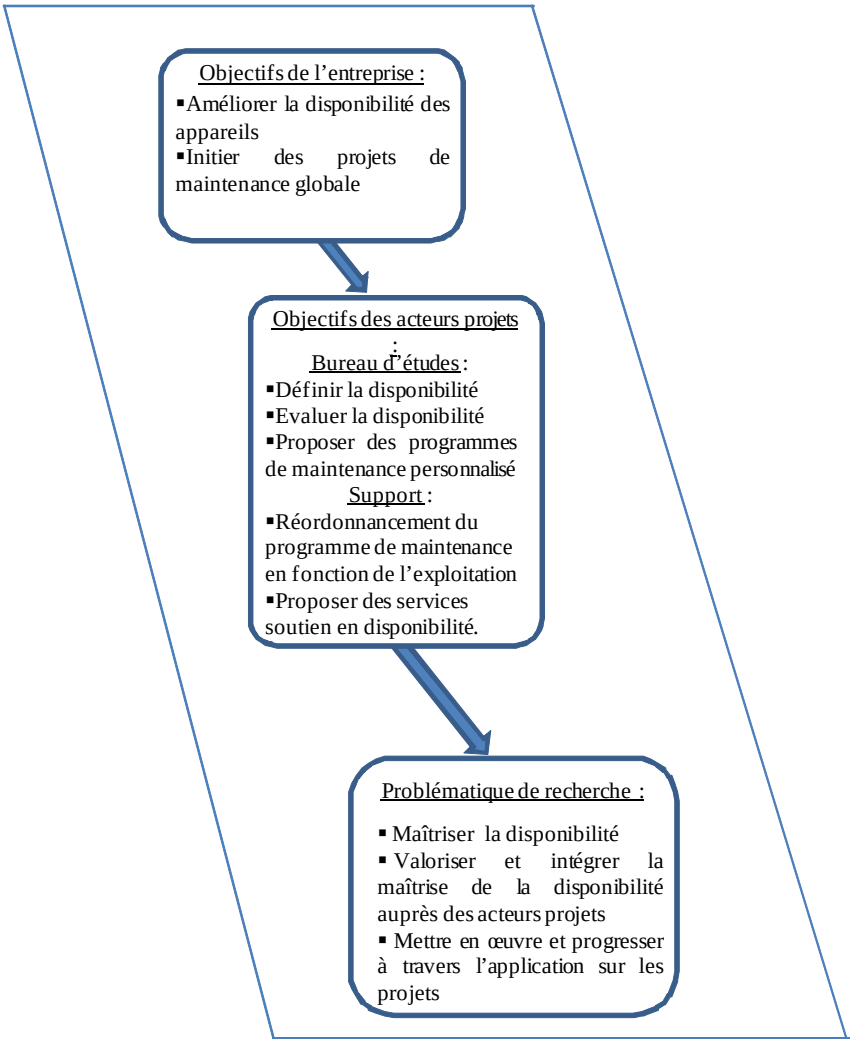


Figure 6. Formulation de la problématique de notre recherche

La problématique de recherche à laquelle nous nous intéresserons dans ce mémoire peut-être exprimée à travers l'interrogation suivante :
Quelle approche peut-on proposer pour maîtriser la disponibilité en modélisant l'organisation, en évaluant la disponibilité et en l'optimisant par le réordonnancement du programme de maintenance ?
Notre approche vise à améliorer les pratiques voire à proposer une méthodologie de maîtrise de la disponibilité en nous concentrant sur l'amélioration de l'organisation de la maintenance en fonction de son contexte opérationnel.

Deuxième Partie

-

ANALYSE

DE

L’EXISTANT

Avant-propos

Nous avons donc choisi de réaliser un état de l'art permettant de caractériser le concept de disponibilité et de passer en revue les moyens de l'améliorer. Cet état de l'art sera structuré en deux parties à savoir, la caractérisation de la disponibilité décrit dans le (**Chapitre III**) et l'état des pratiques de réordonnancement du programme de maintenance décrit en (**Chapitre IV**).

PLAN DE PARTIE

CHAPITRE III : LA DISPONIBILITE, DEFINITIONS ET MODELES

I. INTRODUCTION : DE LA DEFINITION A L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 51
II. DISPONIBILITE D'UN SYSTEME : TERMINOLOGIE ET CONCEPTS 52
II.1. Concepts de disponibilité 52
II.1.1. Disponibilité Intrinsèque 52
II.1.2. Disponibilité théorique 53
II.1.3. Disponibilité réelle ou opérationnelle 53
II.1.4. Disponibilité de service 53
II.2. Mesures de disponibilité 54
II.3. Disponibilités pratiques 54
II.3.1. Disponibilité instantanée en formation 55
II.3.2. L'employabilité 55
II.3.3. Taux de réussite de mission 55
III. REVUE DE LITTERATURE: METHODES D'EVALUATION EXISTANTES DE LA DISPONIBILITE 56
III.1. Approches combinatoires 57
III.1.1. Arbres de défaillances 57
III.1.2. Diagrammes de fiabilité 58
III.1.3. Réseaux Bayésiens 58
III.2. Approches stochastiques 58
III.2.1. Chaînes de Markov 59
III.2.2. Réseaux de Petri 59
III.2.3. Monte-Carlo 59
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 61

CHAPITRE IV : ETAT DE L'ART DES PRATIQUES DE REORDONNANCEMENT

I. INTRODUCTION : GESTION DE L'ORDONNANCEMENT 65
II. ORDONNANCEMENT D'UNE ACTIVITE : DEFINITIONS 65
II.1. Quelques rappels d'ordonnancement 66
II.1.1. Définition 66
II.1.2. La notion de tâche 66
II.1.3. La notion de ressource 67
II.1.4. Contraintes de temps et de ressources 67
II.1.5. La notion d'objectif et de critère 68
II.1.6. Méthodes classiques de résolution 68
II.1.6.1. Méthodes exactes 68
II.1.6.2. Méthodes approchées 69
II.2. Les sources d'incertitudes et robustesse 71
II.2.1. Les sources d'incertitudes 71
II.2.2. Notion de robustesse en ordonnancement 71
II.2.3. Flexibilité et robustesse 71

III. REVUE DE LITTERATURE : APPROCHES D'ORDONNANCEMENT ROBUSTES EXISTANTES 72
III.1. Approches réactives 74
III.1.1. Généralités 74
III.1.2. Caractéristiques 75
III.1.3. Discussion 76
III.2. Approches prédictives 76
III.2.1. Généralités 76
III.2.2. Caractéristiques 76
III.2.3. Discussion 77
III.3. Approches proactives 78
III.3.1. Généralités 78
III.3.2. Caractéristiques 78
III.3.3. Discussion 80
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 81

CHAPITRE III :
La disponibilité, définitions et modèles

Résumé

Nous présentons dans ce chapitre un état de l'art des méthodes d'évaluation de la disponibilité. Nous présentons dans un premier temps une synthèse des définitions de la disponibilité existantes. Dans un deuxième temps, nous présentons les différentes méthodes permettant d'évaluer la disponibilité sous deux points de vue : les approches combinatoires et les approches stochastiques.
Dans un dernier temps, nous présentons les premiers éléments de la méthode que nous allons proposer dans le chapitre V.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE III : LA DISPONIBILITE, DEFINITIONS ET MODELES

I. INTRODUCTION : DE LA DEFINITION A L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 51
II. DISPONIBILITE D'UN SYSTEME : TERMINOLOGIE ET CONCEPTS 52
II.1. Concepts de disponibilité 52
II.1.1. Disponibilité Intrinsèque 52
II.1.2. Disponibilité théorique 53
II.1.3. Disponibilité réelle ou opérationnelle 53
II.1.4. Disponibilité de service 53
II.2. Mesures de disponibilité 54
II.3. Disponibilités pratiques 54
II.3.1. Disponibilité instantanée en formation 55
II.3.2. L'employabilité 55
II.3.3. Taux de réussite de mission – Taux de Dispatch* 55
III. REVUE DE LITERATURE: METHODES D'EVALUATION EXISTANTES DE LA DISPONIBILITE 56
III.1. Approches combinatoires 57
III.1.1. Arbres de défaillances 57
III.1.2. Diagrammes de fiabilité 58
III.1.3. Réseaux Bayésiens 58
III.2. Approches stochastiques 58
III.2.1. Chaînes de Markov 59
III.2.2. Réseaux de Petri 59
III.2.3. Monte-Carlo 59
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 61

Chapitre III : La disponibilité, définitions et modèles

« Un concept est une invention à laquelle rien ne correspond exactement, mais à laquelle nombre de choses ressemblent. » - Extrait de Posthumes.

Friedrich NIETZSCHE[6].

I. INTRODUCTION : DE LA DEFINITION A L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE

La disponibilité doit être prise en compte dans l'exploitation d'un système industriel. En effet, un système industriel est caractérisé par une importante quantité de sous-systèmes, de contraintes, de ressources utilisées. De plus, la collaboration de plusieurs organisations différentes repose sur différents types de flux, à savoir : les flux de matières (consommables, rechanges, outillages, documentation,..) et des flux d'informations (expertise, certification des décisions prises, surveillances de l'état des stocks, retour d'expérience,…) nécessaires au soutien du système industriel.

Face à ce constat, nous pouvons formuler 3 préoccupations distinctes :

- **Nécessité d'un langage commun.** Les parties prenantes doivent avoir les mêmes définitions de la disponibilité et définir le périmètre physique de cette notion.
- **Modélisation efficace de l'exploitation**[7] permettant d'évaluer la disponibilité du système.
- **Action sur l'exploitation pour améliorer la disponibilité**. Ce qui consiste à identifier les leviers permettant d'optimiser cet indicateur.

Notre étude vise à proposer une méthode de modélisation prenant en compte ces principales préoccupations. Dans ce cadre, ce chapitre présente un état de l'art des méthodes de modélisation existantes.

[6] Philologue, philosophe et poète allemand né le 15 octobre 1844 à Röcken, en Saxe.

[7] Nous définirons l'exploitation d'un système comme l'ensemble des activités qui permettent son utilisation (planification des missions, assignation des missions) mais aussi sa maintenance avec le soutien logistique nécessaire mis en place par les acteurs de la chaîne logistique décrite à la figure 1. (Opérateurs de maintenance, Equipementiers, Constructeurs).

Ce chapitre sera structuré en trois parties distinctes. Dans un premier temps, nous passerons en revue la **terminologie ainsi que les concepts fondamentaux de la disponibilité**. Dans un deuxième temps, nous présenterons les principales **méthodes de modélisation existantes de la disponibilité**. Dans un dernier temps, nous présenterons un bilan et un positionnement par rapport aux méthodes que nous avons présentées.

II. DISPONIBILITE D'UN SYSTEME : TERMINOLOGIE ET CONCEPTS

D'un point de vue général, la disponibilité peut se définir comme la probabilité selon laquelle le système ou l'équipement utilisé dans des conditions prévues est en état d'accomplir une fonction requise à un instant donné. Dans la pratique, comme dans l'esprit des utilisateurs, la disponibilité est aussi un indicateur de performance des organisations qui constituent le ***soutien logistique**** d'un système ou d'un ensemble de systèmes.
La disponibilité peut dépendre de plusieurs paramètres. Elle peut être influencée par les caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du système ou de l'équipement et, selon le type de disponibilité, par celles du soutien logistique.

En effet, le **concept de disponibilité** peut-être décliné en plusieurs types. Dans ce paragraphe, nous décrirons les différents types de disponibilité les plus utilisés dans la littérature. Nous présenterons les formes de disponibilité utilisées pour **mesurer la disponibilité** réalisée. Enfin, nous terminerons par les concepts de **disponibilité « pratiques »** utilisés sur le terrain.

II.1. Concepts de disponibilité

La disponibilité d'un système est sa capacité pratique à accomplir un service déterminé à un instant donné. Elle dépend de la fréquence des ***aléas****, donc de la fiabilité, mais également de la durée des périodes de ***perturbation**** qui ponctuent son fonctionnement. La mesure de l'indisponibilité prend donc en compte les temps durant lesquels le système ne peut assurer sa mission (dépannages, réparations, contraintes de fonctionnement, aléas inhérents à la fonction ou provenant d'évènements extérieurs) (Figure 7).

II.1.1. Disponibilité Intrinsèque

La ***disponibilité intrinsèque**** est, de par sa conception et sa réalisation, l'aptitude théorique d'un bien à accomplir un service.

Cette notion est particulièrement intéressante dans la mesure où elle ne fait intervenir que les aspects de l'***indisponibilité**** qui trouvent leurs origines dans la conception d'un système. Cet indicateur permet ainsi de mesurer et comparer les performances d'un ou plusieurs systèmes en termes de disponibilité (figée par la conception, la fiabilité), mettant en évidence les principaux facteurs d'indisponibilité imputables au constructeur.

II.1.2. Disponibilité théorique

La ***disponibilité théorique**** prend en compte les conditions environnementales et de fonctionnement théoriques. Cette disponibilité que l'on appellera, dans le cadre de ce travail de recherche, la disponibilité ***réalisable****, prendra en compte l'ensemble des indisponibilités liées à la maintenance (***Programmée****, ***non Programmée****) et cela dans un ***environnement**** idéal d'utilisation (ressources logistiques infinies).

II.1.3. Disponibilité réelle ou opérationnelle

La ***disponibilité réelle**** ou ***opérationnelle**** est la seule qui peut être évaluée ou mesurée à partir des données d'activité. Elle constitue l'aptitude d'un système – sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa ***maintenabilité**** et de la logistique de maintenance – à remplir ou être en état de remplir une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné [AFNOR 86].

La notion de disponibilité est vue sur plusieurs niveaux : technique et contractuel. Les définitions de la disponibilité que nous venons de voir, reflète le niveau technique. Le niveau contractuel est défini par la notion de disponibilité de service.

II.1.4. Disponibilité de service

La disponibilité de service est l'aptitude d'un service – sous les aspects combinés des performances qu'il nécessite et de la disponibilité du système mis en œuvre pour le fournir – à être assuré à l'intérieur de tolérances et dans des conditions spécifiées à la demande de l'utilisateur [AFNOR 86].
La disponibilité opérationnelle se distingue de la disponibilité de service par la notion d'engagement. La disponibilité opérationnelle d'un système ou d'un ensemble de système se restreint à la performance de ce système alors que la disponibilité de service englobe l'organisation dans sa globalité contenant le(s) système(s) ainsi que l'organisation qui soutient ce(s) système(s).

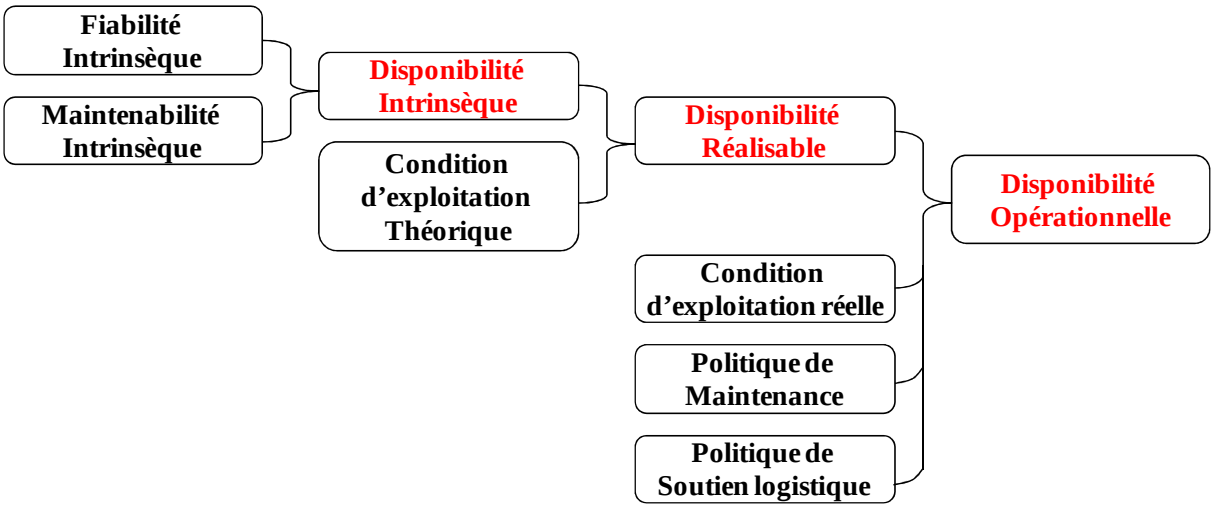


Figure 7. Les trois principaux types de disponibilité

II.2. Mesures de disponibilité

Les disponibilités que nous avons présentées ci-dessus peuvent être mesurées de trois manières : instantanée, moyenne et asymptotique.

La ***disponibilité instantanée**** est la probabilité pour qu'un système puisse accomplir la fonction requise de ce système, dans des conditions données et à un instant donné.

Par extension, la ***disponibilité moyenne**** est la moyenne de la disponibilité instantanée sur un intervalle de temps donné. Ces dernières formes de disponibilité seront celles que nous exploiterons dans notre étude.

Enfin, la ***disponibilité asymptotique**** est la limité, si elle existe, de la disponibilité lorsqu'on fait tendre l'instant considéré vers l'infini.

II.3. Disponibilités pratiques

Les concepts de disponibilité présentés précédemment sont issus de référentiels extraits de normes et de revues scientifiques. Le concept de disponibilité peut également avoir une définition propre au domaine d'utilisation. Par exemple, trois types de disponibilité sont généralement employés dans la gestion d'aéronefs militaires : la disponibilité instantanée en formation, l'employabilité et le taux de réussite de mission [Septier, 06].

II.3.1. Disponibilité instantanée en formation

Pour un type d'aéronef donné, la disponibilité peut être définie comme le ratio du nombre d'aéronefs disponibles pour un vol à réaliser immédiatement par le nombre d'aéronefs affectés. Cette disponibilité calculée est un précieux indicateur de pilotage opérationnel (planification court et moyen terme, contrat d'engagement).

Cette disponibilité permet de définir quatre classes d'aéronefs, et de leur attribuer quatre couleurs (Tableau 2).

Codification couleurs	Définition
Vert	l'aéronef est prêt pour mission
Jaune	l'aéronef sera vert dans les trois heures pour mission
Ambre	l'aéronef est indisponible pour une durée supérieure à 3 heures
Rouge	l'aéronef est indisponible pour manque de pièce, ou pour un problème technique pour lequel il n'existe pas encore de solution. On dit qu'il est "indispo total".

Tableau 2. Codification des types de disponibilité d'un aéronef

Cette codification permet à l'ensemble du personnel technique et opérationnel d'une flotte d'aéronefs militaires de conduire ses missions.

II.3.2. L’employabilité

Cet indicateur prend en compte la disponibilité opérationnelle, telle qu'elle a été définie dans le paragraphe (II.1.3) de ce chapitre, à laquelle on associe la disponibilité de l'ensemble des moyens extérieurs nécessaires à la réussite de la mission (ravitailleur, système AWACS, etc.).

II.3.3. Taux de réussite de mission

Cet indicateur opérationnel correspond à la disponibilité des systèmes pendant la réalisation de sa mission, donc pendant le vol. Il est égal au rapport du nombre de missions réalisées avec succès, par le nombre de vols programmés. Ce taux de réussite de mission dans le monde militaire correspond, pour le monde civil, au taux de dispatch [Knotts 99].

Ce paragraphe a pour but de faire une synthèse des définitions de la disponibilité rencontrées dans la littérature. Désormais, lorsqu’il s’agira de

désigner une disponibilité, il sera nécessaire de choisir le type de disponibilité (intrinsèque, réalisable*, opérationnelle*, service*) et la forme de disponibilité (instantanée*, moyenne*, asymptotique*).*

III. REVUE DE LITTERATURE: METHODES D'EVALUATION EXISTANTES DE LA DISPONIBILITE

Dans ce paragraphe, nous présentons une synthèse de la recherche bibliographique réalisée sur la modélisation de la disponibilité. Cet état de l'art est organisé en quatre étapes distinctes:

- la définition et l'identification des critères d'évaluation,
- le recensement et la description des différentes approches de modélisation,
- l'évaluation des méthodes par rapport aux critères de sélection,
- le positionnement sur le choix de la méthode.

Pour aborder cet état de l'art, nous avons proposé des critères permettant de restreindre le champ de recherche et de sélectionner une méthode de modélisation. Les critères sont définis par rapport aux données, à la complétude de la méthode, au temps de traitement, au caractère méthodologique et au format des données issues du retour d'expérience:

Incertitude des données: La méthode de modélisation que nous cherchons doit prendre en compte les données incertaines qui sont présentes dans le domaine de la maintenance et de la logistique.

Exploitation des données « terrain »: La méthode attendue doit pouvoir utiliser les données issues du terrain pour obtenir un modèle aussi proche que possible de la réalité.

Flexibilité de la méthode: La méthode doit pouvoir être déployée pour un grand nombre d'exploitations nécessitant une évaluation de la disponibilité. Nous cherchons de ce fait, une méthode complète qui puisse être suffisamment générique pour traiter un large spectre de problèmes.

Temps de traitement: La méthode attendue doit pouvoir réaliser des études de disponibilité en un temps de calcul réduit, ce qui est généralement exigé des industriels.

Caractère méthodologique: La démarche que nous allons proposer, doit avoir un cadre méthodologique permettant à des experts de métiers différents de suivre une seule et unique méthode. Nous cherchons à éviter un formalisme « boîte à outil» tel que l'on peut trouver dans l'approche UML.

Ces critères ont été évalués selon une analyse multicritère appliquée aux différentes approches existantes (Figure 8): combinatoires et stochastiques.

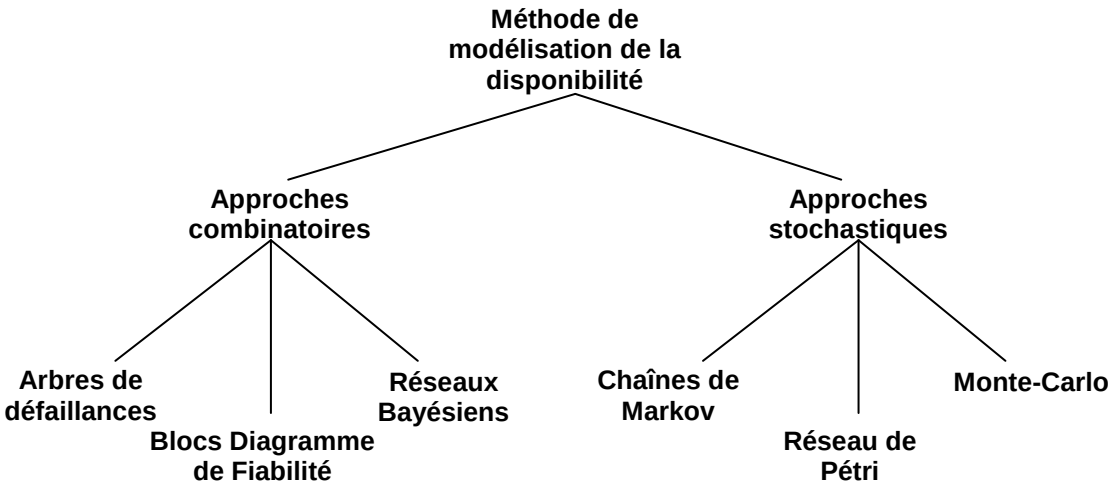


Figure 8. Revue des méthodes de modélisation existantes

L'approche combinatoire s'intéresse aux méthodes permettant de compter les éléments dans des ensembles finis (combinatoire énumérative) et à la recherche des optima dans les configurations ainsi qu'à leur existence (combinatoire extrémale). En revanche, l'approche stochastique s'intéresse aux méthodes qui s'appuient sur des concepts statistiques tels que le hasard et les distributions de fréquences. Elle est généralement assimilée à l'étude des phénomènes aléatoires dépendant du temps. Ces deux approches présentées à la (Figure 8) vont être détaillées ci-après.

III.1. Approches combinatoires

Les modèles combinatoires sont généralement utilisés pour étudier des problèmes de fiabilité et de sécurité. Leur but est de décrire, sous forme graphique, les conditions logiques de bon fonctionnement ou de défaillance d'un système. Dans cette catégorie, les arbres de défaillances, les Diagrammes de Fiabilité et les réseaux Bayésiens sont les plus exploités.

III.1.1. Arbres de défaillances

Cette méthode d'analyse de la fiabilité d'une entité consiste à déterminer les causes de pannes des sous entités c'est-à-dire, les événements qui peuvent conduire à un mode de panne de l'entité, et dont le résultat est présenté sous

forme arborescente. Cette étude consiste à décomposer l'événement redouté (racine) en sous évènements, permettant ainsi de remonter à la source de la défaillance. Cette méthode est exploitée pour étudier la disponibilité des systèmes complexes dans le cas où la fiabilité du système est le paramètre prépondérant [Andrews et al., 08].

III.1.2. Diagrammes de fiabilité

Dans cette représentation, les blocs représentent des éléments (matériels ou événements) dont la défaillance entraîne la panne du système. Le diagramme de fiabilité est donc un graphe sans circuit, admettant une entrée et une sortie, dont les sommets, appelés blocs, représentent les éléments du système et dont les arcs traduisent les relations entre les différents éléments [Ait-Kadi et al., 01]. La décomposition en sous-systèmes associés aux configurations les plus courantes des éléments (série, parallèle) permet de reconstituer le modèle de fiabilité du système global étudié.

III.1.3. Réseaux Bayésiens

Les Réseaux Bayésiens font partie de la famille des modèles graphiques. Ils regroupent au sein d'un même formalisme la théorie des graphes et celle des probabilités afin de fournir des outils efficaces autant qu'intuitifs pour représenter une distribution de probabilités jointe sur un ensemble de variables aléatoires [Yates et al., 07]. Ce formalisme très puissant permet une représentation intuitive de la connaissance sur un domaine d'application donné et facilite la mise en place de modèles performants et clairs. La représentation de la connaissance se base sur la description, par des graphes, des relations de causalité existant entre des variables décrivant le domaine d'étude.
Ces méthodes caractérisent les liens de dépendance, du point de vue disponibilité entre les éléments d'un système. Cependant, ces méthodes montrent des limites concernant la prise en compte de la maintenance.

III.2. Approches stochastiques

L'évaluation de la disponibilité d'un système d'un point de vue dynamique est réalisée par le recours aux approches stochastiques. Parmi les méthodes existantes, nous présenterons ci-dessous : les *chaînes de Markov, les réseaux de PETRI. Nous présenterons également l'approche de résolution Monte-Carlo qui peut apporter des éléments d'analyse pour l'évaluation de la disponibilité.*

III.2.1. Chaînes de Markov

L'approche Markovienne est dans la classe des « approches analytiques par états », la plus utilisée pour le traitement probabiliste des systèmes dynamiques. Les chaînes de Markov reposent sur deux concepts de base : les *états* et les *transitions*. L'état d'un système est caractérisé par les différents états de ses constituants. Ainsi chaque état du système se caractérise par l'état de ses composants qui sont soit opérationnels soit en défaut. Lorsque l'espace des états dans lequel peut se trouver le système est un ensemble discret au cours du temps, l'état du système évolue en fonction du passage de l'état opérationnel à l'état en défaut des composants et de l'état défaut à l'état opérationnel suite à une réparation. Ces changements sont appelés les transitions. Cette technique mathématique repose sur l'hypothèse que les taux de transition d'un système (taux de défaillance et de réparation) sont constants et que le processus est sans mémoire (Markovien) [Moura et al., 08].

III.2.2. Réseaux de Petri

Un réseau de PETRI (RdP) est un outil graphique qui permet d'étudier des systèmes composés de sous-systèmes fonctionnant en parallèle, communiquant et partageant des ressources. Ce modèle représente les différents états possibles du système. Il est un graphe composé de deux types de nœuds [Bebel et Bertsche, 08]: *les places* qui permettent de décrire les états du système modélisé et *les transitions* qui représentent les changements d'état. Les places et les transitions sont reliées par des arcs orientés. Une place peut contenir un nombre entier de jetons ou marques. L'ensemble des marques présenté à un instant donné à l'intérieur des places constitue le marquage du réseau.

III.2.3. Monte-Carlo

L'approche de résolution Monte Carlo est une méthode qui permet d'analyser le comportement de systèmes complexes. Elle sert à résoudre approximativement des problèmes que l'on ne peut résoudre avec les méthodes analytiques. En effet, cette méthode se montre pertinente pour des problèmes présentant un jeu important de données. Avec la simulation de Monte Carlo, l'exactitude du rendement de simulation augmente avec le nombre de simulations.

Si la simulation est suffisamment répétée, le décideur peut appuyer sa prise de décision et évaluer un niveau de risque sur les différentes alternatives choisies [Marquez et al., 95]. Ci-dessous nous présentons les différentes étapes permettant de résoudre un problème par la méthode Monte-Carlo (Figure 9).

La première étape consiste à définir le mesurande, en d'autres termes le processus de mesure. La deuxième étape permet d'associer à chaque grandeur d'entrée une distribution (uniforme, triangulaire, normale,…). Dans l'étape suivante, il s'agit de générer M réalisations ou situations de chaque grandeur d'entrée par tirages. Ensuite, l'étape 4 consiste à construire la distribution empirique par les M valeurs d'entrées obtenues. La dernière étape concerne la synthèse de l'information obtenue sur le mesurande (espérance mathématique, écart type,..).

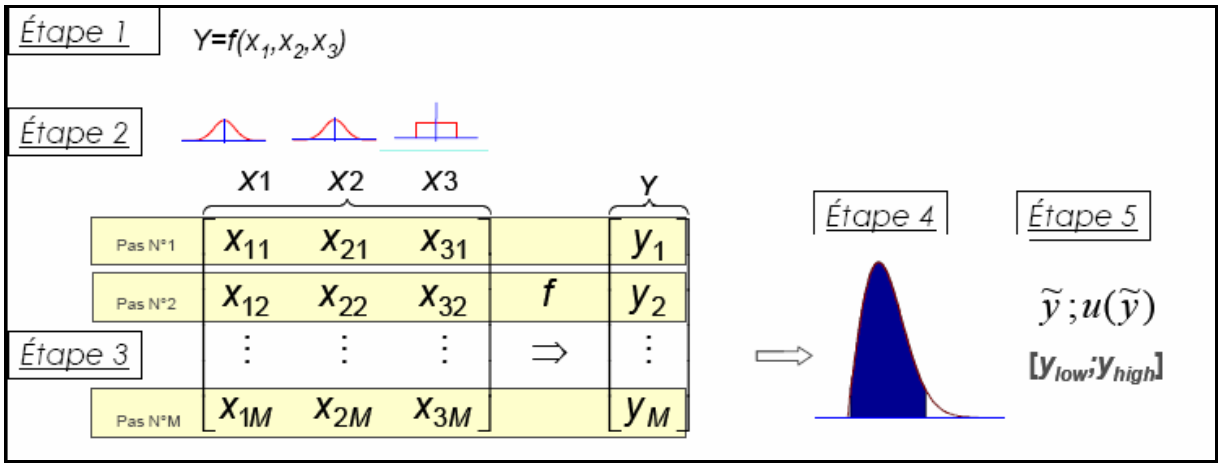


Figure 9. Les différentes étapes de l'approche Monte-Carlo

Dans le cadre de cette synthèse, nous avons évalué chaque méthode de modélisation par rapport aux critères définis au début de ce paragraphe (Incertitude des données, Exploitation des données, Flexibilité de la méthode, Temps de traitement, caractère méthodologique).

Nous avons déduit que les approches combinatoires sont limitées pour réaliser des modèles approchant la réalité. Ce sont des modèles souvent exploités pour la compréhension, rarement pour la prédiction quantitative. Notre choix a porté sur les méthodes stochastiques sachant que dans la modélisation que nous voulons atteindre, il est question de prendre en compte certaines classes d'évènements qui ne sont pas prédites avec certitude.

Dans ce cadre, les incertitudes liées aux données utilisées et la dimension stochastique des phénomènes mis en jeu sont clairement prises en compte par l'approche de résolution Monte-Carlo. Monte-Carlo constitue un outil d'évaluation numérique performant pour l'étude des systèmes complexes, encore inaccessibles aux méthodes analytiques [Zille, 09].

En effet, cette méthode est fondée sur une démarche rigoureuse, qui peut être « opérationnalisable » sur n'importe quel support de programmation.

IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT

Nous avons présenté dans ce chapitre les méthodes permettant d'évaluer la disponibilité. Ces méthodes suivent deux types d'approches : l'approche combinatoire et l'approche stochastique. Nous pouvons remarquer que ces méthodes sont fondées sur un formalisme de modélisation bien défini qu'il est nécessaire d'adapter pour modéliser une exploitation et ainsi d'évaluer la disponibilité.

Dans le but de réaliser notre étude, nous avons besoin d'identifier un cadre méthodologique permettant de guider notre démarche de recherche. Dans cette optique, une étude réalisée dans le cadre de l'analyse de l'existant, a permis d'identifier des processus opérationnels qui pourraient être communs à l'ensemble des exploitations et particulièrement dans le domaine aéronautique. A partir de cette identification, nous proposons un « cadre méthodologique » basé sur 4 processus (Figure 10) : Modélisation de la demande, Modélisation de l'affectation, Modélisation de la maintenance et Evaluation de la disponibilité.

Ce cadre méthodologique utilise le formalisme SADT [Cauvin 05] (Figure 10) qui constituera le modèle conceptuel. Dans le cadre des analyses que nous ferons dans le cadre de ces processus nous utiliserons l'approche de simulation Monte-Carlo permettant de prendre en compte les incertitudes liées aux données utilisées et surtout la dimension stochastique des phénomènes mis en jeu.

Dans la figure ci-dessous, nous représentons les processus opérationnels ainsi que les flux d'informations nécessaires aux traitements des données.

Cette modélisation sera détaillée dans le chapitre V.

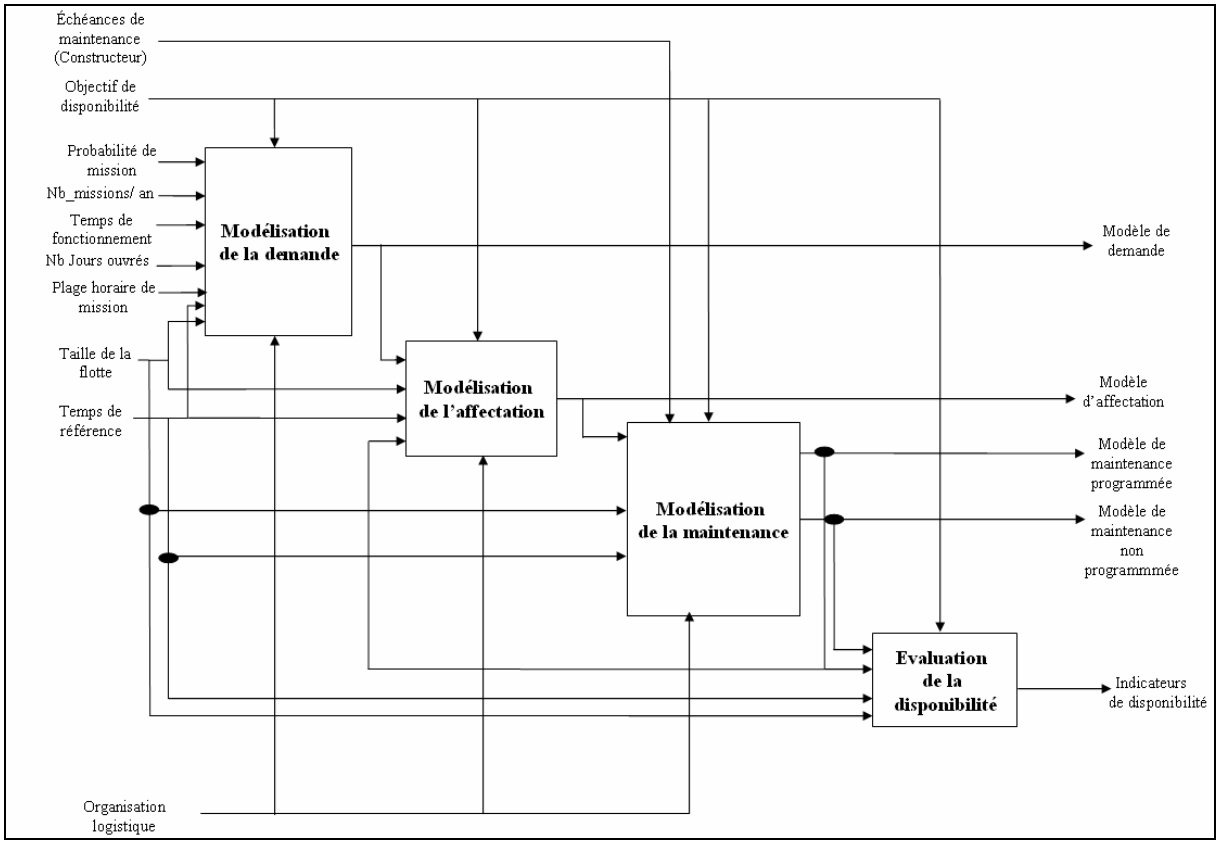


Figure 10. Les quatre étapes clés pour la modélisation de l'exploitation

CHAPITRE IV :

Etat de l’art des pratiques de réordonnancement

Résumé

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l’art des méthodes de réordonnancement des activités de maintenance en vue d’améliorer la disponibilité.

Dans ce cadre, la recherche d’une coordination des activités de maintenance et des missions devient nécessaire. Par ailleurs, les activités de maintenance introduisent des sources d’incertitudes qu’il est nécessaire de prendre en compte en proposant des solutions de réordonnancement robuste.
La coordination des activités de maintenance et de missions conduit à établir un constat sur les approches de réordonnancement robustes existantes : les approches réactives, prédictives et proactives.
Nous terminons ce chapitre par la présentation des principaux éléments constitutifs du modèle de réordonnancement que nous proposerons dans le chapitre VI.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE IV : ETAT DE L'ART DES PRATIQUES DE REORDONNANCEMENT

I. INTRODUCTION : GESTION DE L'ORDONNANCEMENT 65
II. ORDONNANCEMENT D'UNE ACTIVITE : DEFINITIONS 65
II.1. Quelques rappels d'ordonnancement 66
II.1.1. Définition 66
II.1.2. La notion de tâche 66
II.1.3. La notion de ressource 67
II.1.4. Contraintes de temps et de ressources 67
II.1.5. La notion d'objectif et de critère 68
II.1.6. Méthodes classiques de résolution 68
II.1.6.1. Méthodes exactes 68
II.1.6.2. Méthodes approchées 69
II.2. Les sources d'incertitudes et robustesse 71
II.2.1. Les sources d'incertitudes 71
II.2.2. Notion de robustesse en ordonnancement 71
II.2.3. Flexibilité et robustesse 71
III. REVUE DE LITTERATURE : APPROCHES D'ORDONNANCEMENT ROBUSTES EXISTANTES 72
III.1. Approches réactives 74
III.1.1. Généralités 74
III.1.2. Caractéristiques 75
III.1.3. Discussion 76
III.2. Approches prédictives 76
III.2.1. Généralités 76
III.2.2. Caractéristiques 76
III.2.3. Discussion 77
III.3. Approches proactives 78
III.3.1. Généralités 78
III.3.2. Caractéristiques 78
III.3.3. Discussion 80
IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT 81

CHAPITRE IV :

Etat de l'art des pratiques de réordonnancement

« *L'usage et la pratique ont précédé toutes les sciences et tous les arts ; mais les sciences et les arts ont ensuite perfectionné la pratique.* »

César CHESNEAU[8].

I. INTRODUCTION : GESTION DE L'ORDONNANCEMENT

Dans le domaine de la gestion de production, l'ordonnancement est une discipline qui a fait l'objet de nombreux travaux permettant d'aider et de guider les choix des décideurs dans la planification des activités de production.

L'objet de ce chapitre est de réaliser un état des lieux des méthodes de réordonnancement existantes permettant de se positionner par rapport à notre problématique d'une part, et de pouvoir si possible exploiter des mécanismes existants pour apporter une réponse à cette problématique. Dans ce cadre, il est nécessaire de poser les principales définitions permettant de caractériser un ordonnancement dans un premier temps. Dans un deuxième temps, nous présentons les différentes approches de résolution existantes permettant de positionner nos travaux par rapport aux travaux déjà réalisés. Dans un dernier temps, nous achèverons cet état de l'art sur une synthèse et notre positionnement par rapport à la méthodologie que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

II. ORDONNANCEMENT D'UNE ACTIVITE : DEFINITIONS

Dans ce chapitre, nous commencerons par faire un rappel des notions principales qui caractérisent un ordonnancement. Puis nous nous intéresserons aux notions relatives à l'activité d'ordonnancement notamment à la gestion des incertitudes et en particulier à l'ordonnancement robuste que l'on va définir à la suite.

[8] Philosophe français né le 17 juillet 1676 à Marseille.

II.1. Quelques rappels d'ordonnancement

Il est difficile d'aborder un problème d'ordonnancement sans poser la définition même de l'ordonnancement mais également des caractéristiques qui lui sont sous-jacentes, à savoir les notions de tâches, de ressources, de contraintes, etc...

II.1.1. Définition

L'ordonnancement a pour objectif d'aider le pilotage d'un système à prendre des décisions permettant d'atteindre un ou plusieurs objectifs.
L'ordonnancement peut être défini comme l'ensemble des activités qui visent à programmer l'exécution d'un ensemble de tâches en leur allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début [Gotha 02]. Cette définition de Gotha peut être étendue par la définition de [Trung 05], puisqu'il s'agit de contrôler, à court ou moyen terme, l'activité d'un ensemble de ressources disponibles en quantité limitée, en gérant les conflits de partage des ressources que pose la réalisation d'un ensemble d'activités sur un horizon de temps généralement imposé.

Parmi les nombreuses définitions d'un problème d'ordonnancement dans la littérature, nous retiendrons la définition suivante [Esquirol et Lopez., 99] :

*« Le problème **d'ordonnancement** consiste à **organiser** dans le temps la réalisation de **tâches**, compte tenu de **contraintes temporelles** (délais, contraintes d'enchainements,..) et de **contraintes** portant sur **l'utilisation** et la **disponibilité de ressources requises** ».*

De ces définitions, nous pouvons voir que le terme « ordonnancement » peut être utilisé par abus de langage pour désigner soit la solution d'un problème d'ordonnancement, c'est-à-dire, présenter pour chaque tâche du problème les dates de début de leur exécution et les ressources qui leur seront affectées, soit pour désigner le processus ayant conduit à la détermination de la solution, en d'autres termes la méthode d'ordonnancement.

II.1.2. La notion de tâche

La définition précédente met en évidence la notion de ***tâche*** que nous présentons dans la définition ci-dessous [Esquirol et al., 99]:

*Une **tâche** i est une **entité élémentaire** de travail localisée dans le temps par une **date de début t_i** ou **de fin c_i**, dont la réalisation est caractérisée pour une **durée opératoire p_i** ($c_i = t_i + p_i$) et par l'intensité a_i^k avec laquelle elle consomme certains **moyens k** ou **ressources**.*

II.1.3. La notion de ressource

Dans cette définition, les tâches peuvent requérir l'emploi de ressources. Dans notre étude, nous considèrerons la notion de ***ressource*** selon la définition suivante :

*Une **ressource k** est un **moyen technique ou humain** requis pour la **réalisation** d'une tâche et disponible en quantité limitée : sa capacité C_k (supposée constante).*

Une ressource est dite renouvelable, si après avoir été mobilisée pour une ou plusieurs tâches, elle est à nouveau disponible en même quantité pour d'autres tâches (les hommes, les machines,..). Dans le cas contraire, on parlera de ressources consommables (matières premières, budget,..). Dans certains problèmes d'ordonnancement, la notion d'état de ressource est également à prendre en compte dans le cadre de contraintes technologiques liées à son utilisation. Un changement d'état de la ressource peut être produit par l'occurrence d'évènements externes incontrôlables (défaillance, intempéries,…).

II.1.4. Contraintes de temps et de ressources

La notion de contrainte est relative à un ensemble de variables de décision. La contrainte exprime une restriction sur les valeurs que peuvent prendre certaines variables de décision.

Nous nous focaliserons dans le cadre de ces travaux sur les variables qui caractérisent **les contraintes temporelles et les contraintes de ressources.**
Les **contraintes temporelles** permettent d'exprimer **les interdépendances temporelles** entre tâches [Trung 05].
Les **contraintes de ressources** permettent de représenter à la fois les caractéristiques de **consommation des tâches sur les ressources** et les caractéristiques de **disponibilité des ressources** [Marmier 07].

Il est à noter que la disponibilité des ressources peut dépendre d'un délai de mise à disposition de la ressource. Ce délai peut être géré en fonction de l'organisation des tâches qui se définit par des contraintes temporelles.

II.1.5. La notion d'objectif et de critère

Un problème d'ordonnancement peut-être abordé en fonction d'un ou plusieurs objectifs ou critères de performances (Durée des tâches, Somme des retards, Equilibrage de charge,..). Lorsque ces objectifs sont quantifiables et exprimables en fonction des variables d'ordonnancement, ils sont intégrés dans le problème d'ordonnancement soit par ajout de nouvelles contraintes, soit par ajout d'un ou plusieurs critères d'optimisation.
Dans le premier cas, le processus d'ordonnancement doit fournir une solution admissible, c'est-à-dire satisfaisant l'ensemble des contraintes formulées. Dans le second cas, la solution produite doit, en plus d'être admissible, optimiser la valeur du ou des critères considérés.

Concernant les approches d'optimisation, les critères d'évaluation numériques peuvent être de trois sortes **: temporels, ressources ou liés au coût.**

- Les **critères d'évaluation numériques liés au temps :** minimisation du temps total d'exécution ou des retards vis-à-vis de dates d'échéances fixées ;
- **Ceux liés aux ressources :** minimisation de la quantité de ressources nécessaires à la réalisation des tâches ou de la charge de chaque ressource.
- **Ceux liés aux coûts** : minimisation des coûts (de lancement, de production et de transport, etc..) qu'un ordonnancement induit.

II.1.6. Méthodes classiques de résolution

Au vu des nombreux travaux existants, nous nous focaliserons uniquement sur les grandes orientations de ces travaux sans les détailler. Les méthodes de résolution classiques se répartissent en deux grandes catégories : **les méthodes exactes** et **les méthodes approchées**.

II.1.6.1. Méthodes exactes

Les termes « méthodes exactes » recouvrent un ensemble de méthodes d'ordonnancement issues de la Recherche Opérationnelle. Ces méthodes sont désignées exactes du fait que leur convergence vers une solution optimale à un problème donné est prouvée théoriquement. Ces méthodes sont basées sur des calculs mathématiques qui peuvent être coûteux en temps et en ressources.

Parmi les méthodes exactes, nous présentons **les méthodes de résolution énumératives** représentées principalement par les méthodes suivantes **:** les procédures par séparation et évaluation et les méthodes de programmation mathématiques telles que la programmation linéaire et la programmation dynamique.

- Les **procédures de séparation et évaluation**, qui s'appuient sur la méthode de « Branch and Bound » qui consiste à explorer par énumération l'ensemble des solutions [Lawler et al., 66].
- La **programmation linéaire** consiste à modéliser un problème d'optimisation dans lequel les critères et contraintes sont des fonctions linéaires des variables. Les deux types d'algorithme les plus connus sont la méthode du Simplex et la méthode des points intérieurs [Trilling 06].
- Inventée par Bellman, la **programmation dynamique** permet de déduire la solution optimale d'un problème à partir d'une solution optimale d'un sous problème [Bellmann et al., 1974].

II.1.6.2. Méthodes approchées

Contrairement aux méthodes exactes, les méthodes de résolution dites approchées ont pour fonction de déterminer une solution satisfaisante plutôt qu'optimale. La solution ainsi déterminée doit satisfaire un certain nombre de caractéristiques avec un coût calculatoire satisfaisant par rapport au cas d'application. Parmi ces approches, il existe les **méthodes constructives et amélioratives**

Dans le cadre des **méthodes constructives**, plusieurs classifications ont été présentées dans la littérature, nous présentons ci-dessous la classification la plus rencontrée [Kaabi 2005]. Cette classification sera construite autour des règles de priorité, les algorithmes gloutons, les méthodes de recherche locale et les méthodes de recherche arborescente tronquée.

- Les **règles de priorité** sont généralement utilisées pour des classes réduites de problèmes d'ordonnancement [Trung 05]. Ces méthodes s'appuient entre autres sur les règles suivantes :
  - **SPT (Shortest Processing Time)**. Cette règle permet de trier les tâches suivant leur durée opératoire croissante.
  - **WSPT (Weighted Shortest Processing Time)**. Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur priorité croissante.
  - **EDD (Earliest Due Date)**. Cette règle consiste à trier les tâches par leur date de fin croissante.

- Les **algorithmes gloutons** permettent de construire progressivement une solution en utilisant des règles de priorités simples (SPT, WSPT,..) [Levasseur et al., 2007].
- Les **méthodes de recherche locale** sont des méthodes qui visent à explorer un voisinage de solutions pour améliorer la solution au problème, et cela en partant d'une solution initiale. Lors du déroulement de ces méthodes, il est possible que des solutions moins pertinentes soient admises afin d'en obtenir de meilleures par la suite [Paris et al., 07].
- Les **méthodes de recherche arborescente tronquée** sont proches des Procédures de Séparation et d'Evaluation à la différence que l'arbre de recherche est volontairement réduit, même si cela peut faire passer à côté de solutions optimales, dans un souci de rapidité [Levasseur et al., 08].

Dans les méthodes amélioratives, nous pouvons rencontrer les **méta heuristiques** qui sont des méthodes de résolution applicables à un large ensemble de problèmes d'optimisation combinatoire. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode tabou, les colonies de fourmis et les algorithmes génétiques. [Dib et al., 2008], [Benbouzid-Sitayeb et al., 2006]

L'ensemble de ces méthodes de résolution classiques est représenté dans la figure ci-dessous (Figure 11).

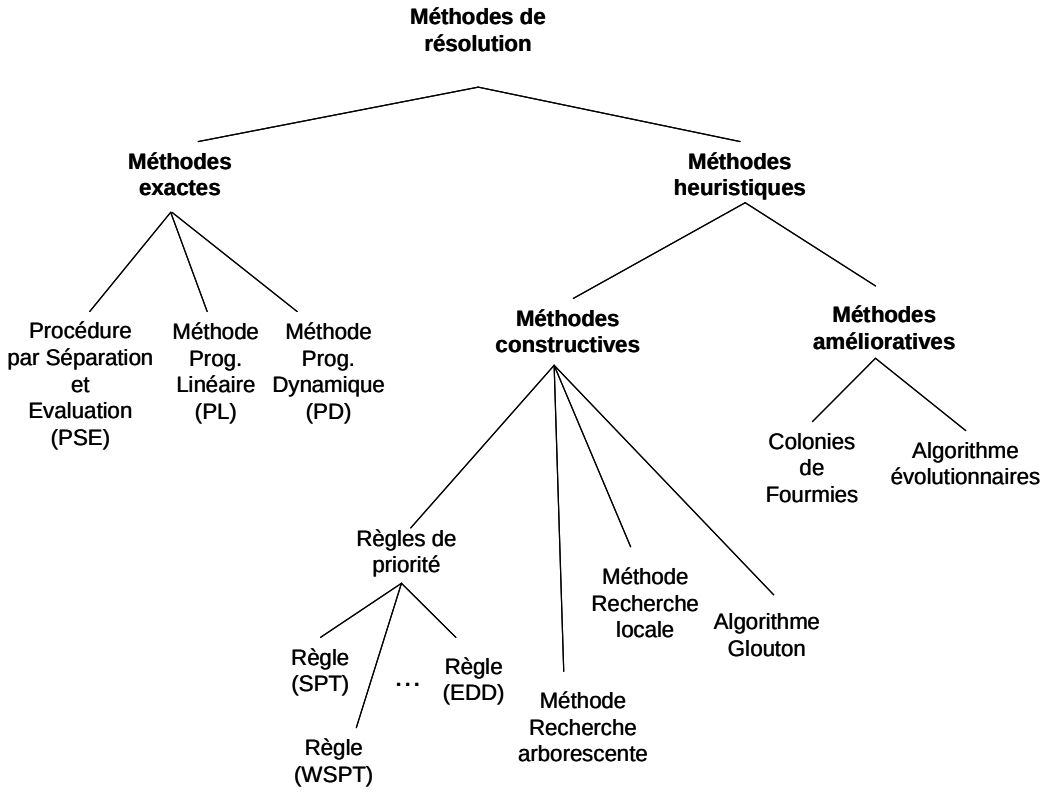


Figure 11. Représentation arborescente des différentes méthodes de résolution d'ordonnancement

Après avoir parcouru les différentes propriétés d'un ordonnancement et une énumération des différentes approches de résolution classique, nous présenterons plus loin les approches d'ordonnancement. Pour ce faire, nous allons d'abord définir la notion d'incertitude en ordonnancement.

II.2. Les sources d'incertitudes et robustesse

Les sources d'incertitudes et la robustesse sont des caractéristiques qui doivent être prises en compte pour garantir le bon déroulement de l'ordonnancement. Ces notions vont être explicitées dans les paragraphes suivants.

II.2.1. Les sources d'incertitudes

Un ordonnancement dépend de paramètres intrinsèques au système assurant son exécution (capacité des ressources, durées opératoires,…) et de paramètres extrinsèques participant à sa mise en œuvre (délais, volumes de production,..).
Or, lorsqu'un ordonnancement est proposé, ces paramètres sont souvent supposés connus et constants alors qu'en réalité, ils sont approximatifs, susceptibles de varier dans le temps de façon plus ou moins prévisible. La prise en compte des incertitudes passe nécessairement par l'élaboration d'un certain nombre de scénarios permettant de mesurer la robustesse de l'ordonnancement proposé.

II.2.2. Notion de robustesse en ordonnancement

La notion de robustesse présente des divergences de définition liées aux spécificités des champs applicatifs [Trung 05], [Esswein 03], [Herroelen & Leus 04b], [Sevaux & Sörensen 04], [Billaut et al. 05]. Nous pouvons résumer la définition de la **robustesse** aux groupes de mots suivants : **capacité à faire face à des aléas**, **à résister à l'à peu près**, **à gérer le risque**,…
A travers ces définitions nous pouvons également voir émerger la notion de flexibilité. Nous allons définir cette notion et montrer les liens unissant celles-ci dans le paragraphe suivant.

II.2.3. Flexibilité et robustesse

Dans le domaine de l'ordonnancement, Gotha a proposé une définition de la flexibilité exprimée comme l'existence de modifications possibles dans un ordonnancement, calculé hors ligne, entraînant une perte de performance acceptable [Gotha 02]. La flexibilité peut être associée à un voisinage de

solutions examiné lors de l'exécution, ou à une famille d'ordonnancements, sans privilégier un ordonnancement en particulier. Il s'agit donc d'une flexibilité statique qui prend plusieurs formes [Billaut et al. 05]. Nous distinguons :

- **La flexibilité temporelle**, concernant les dates de début des tâches, et autorisant sous certaines limites une dérive de ces dernières dans le temps;
- **La flexibilité séquentielle** qui autorise une modification de l'ordre des tâches sur les ressources;
- **La flexibilité sur les affectations** qui, dans le cas où une tâche peut être réalisée par une ressource à choisir dans un ensemble, et / ou dans le cas où une tâche est associée à plusieurs modes d'exécution, laisse libre certains choix d'affectation.

Les formes de flexibilité que nous venons de décrire sont de type statique. La flexibilité dynamique d'un ordonnancement réside dans la capacité de l'ordonnancement réactif à adapter l'ordonnancement déterminé en ligne, en présence de perturbations, de façon à satisfaire au mieux les exigences propres à ce niveau de décision.
On peut voir que ces différentes formes de flexibilité peuvent être reliées à la notion même de robustesse puisque ces formes de flexibilité soulèvent communément la capacité d'adaptation à des modifications de l'environnement, à des perturbations.
Les mesures diffèrent selon les spécificités du domaine applicatif considéré et selon que l'on s'intéresse à l'insensibilité aux incertitudes de la fonction objectif ou à l'insensibilité d'une solution d'ordonnancement particulière [Herroelen & Leus 02].

III. REVUE DE LITTERATURE : APPROCHES D'ORDONNANCEMENT ROBUSTES EXISTANTES

Nous proposons dans ce paragraphe de parcourir ces approches d'ordonnancement robustes qui vont permettre de positionner notre apport dans le chapitre suivant. A partir de ce qui a été présenté, dans le paragraphe II.2, définissant la notion d'incertitude, la notion d'ordonnancement sous incertitudes est directement liée à la notion d'ordonnancement réactif. Dans ce sens, nous allons nous inspirer de la représentation d'un ordonnancement réactif présenté dans [Trung 2005] (Figure 12).

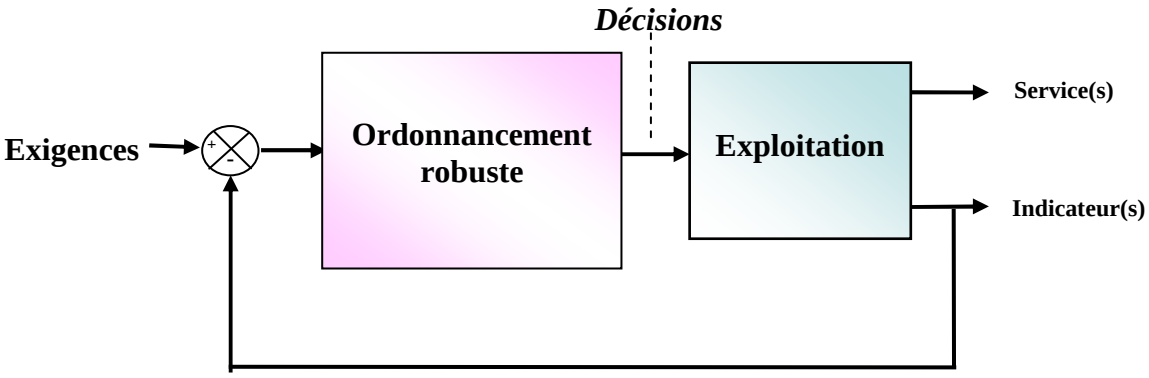


Figure 12. Représentation automaticienne d'un ordonnancement réactif

Ce système d'ordonnancement (**Ordonnancement robuste**) agit sur un système d'activités (**Exploitation**). L'exploitation s'appuie sur des ressources, en d'autres termes d'acteurs et de moyens participant directement ou indirectement à la réalisation de l'ordonnancement.
Le processus d'ordonnancement produit un ensemble de décisions, en réaction à des évènements attendus ou contingents, issus du système commandé. Ce système d'ordonnancement est synthétisé par un ou plusieurs modèles déterminant l'ensemble des orientations c'est-à-dire des décisions possibles en concertation avec les décideurs.

L'ordonnancement réactif peut être assimilé à la réalisation de **quatre fonctions** : **le Suivi, la Prévision, l'Adaptation et l'Aide à la décision** [Trung 05].
La fonction de **Suivi** permet d'actualiser au fur et à mesure de la réception des évènements, les modèles utilisés par la fonction **d'Aide à la décision**, pour l'élaboration de la solution d'ordonnancement.
Les fonctions **Prévision** et **Adaptation** sont des fonctions qui ne sont pas obligatoires, mais qui sont nécessaires quand on cherche à anticiper les évènements, pour prévoir un ensemble de décisions d'ordonnancement et l'adapter si cela s'avère nécessaire.

Plusieurs méthodes d'ordonnancement robuste ont été proposées dans la littérature. Plusieurs classifications ont également été décrites. La classification proposée dans [Davenport & Beck 00] et reprise dans [Billaut et al. 05], constitue une référence souvent utilisée dans le domaine de l'ordonnancement robuste. Cette classification est constituée de trois types d'approches : **Les approches réactives**, **les approches prédictives** et **les approches proactives**.

Les approches réactives prennent en compte l'incertitude lors de la phase d'ordonnancement dynamique uniquement. On ne cherche donc pas à anticiper les incertitudes, mais plutôt à réagir en temps réel, de façon opportune, lorsque

les aléas surviennent. Un ordonnancement de référence, de nature déterministe et déterminé hors ligne, est aussi parfois utilisé.

Les approches prédictives tentent de prendre en compte l'incertain lors de la phase d'ordonnancement hors-ligne uniquement. Il s'agit d'anticiper les incertitudes, en jouant sur la flexibilité, de sorte à produire un ordonnancement, ou une famille d'ordonnancements, relativement insensible aux incertitudes. Un modèle d'incertitudes est supposé dans ce cas disponible. Cependant, dans le cas où le degré d'incertitude est très élevé, ou si aucun modèle d'incertitudes n'est disponible a priori ou encore l'environnement de l'ordonnancement est très dynamique, il faudra plutôt avoir recours à une approche réactive.

Les approches proactives tentent de combiner avantageusement les deux approches précédentes. Il s'agit de faciliter l'élaboration des stratégies de réaction, de sorte que les décisions d'ordonnancement soient de meilleure qualité et produites en un temps plus court. L'autre avantage des approches proactives est qu'elles prennent en compte les incertitudes sur tout le cycle de vie de l'ordonnancement. Il est ainsi possible pour un décideur de gérer le compromis robustesse / performance durant la totalité de ce cycle, ce qui est indispensable dans le domaine de la conduite de projets.

III.1. Approches réactives

III.1.1. Généralités

Les **approches réactives** sont souvent exploitées dans des **environnements fortement perturbés**, où les **incertitudes sont fréquentes et de forte amplitude**. Dans un tel environnement, un ordonnancement de référence peut rapidement s'avérer de mauvaise qualité ou même infaisable. Dans ce cas, on suppose qu'il n'existe pas de tel ordonnancement, et que toutes les décisions sont prises en temps réel, en utilisant des stratégies qui privilégient la rapidité des décisions sur leur qualité (Figure 13).

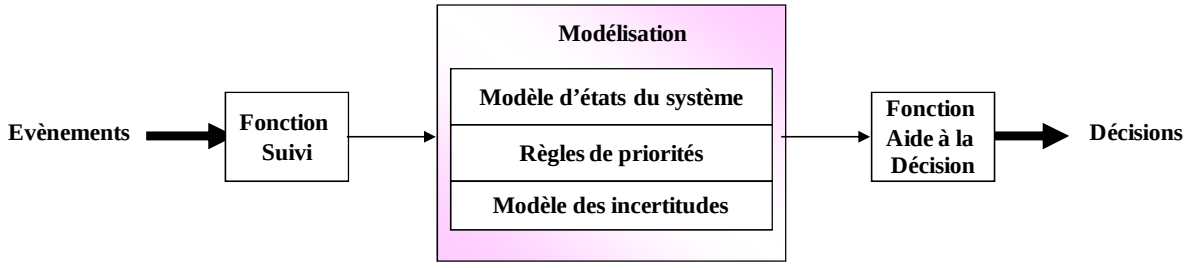


Figure 13. Représentation d'un ordonnancement réactif pur

Le modèle à évènements discrets représenté par le modèle d'état du système indique que plusieurs décisions concurrentes sont possibles à un instant donné. Il est nécessaire de faire des choix pertinents permettant de garantir la performance attendue de l'ordonnancement. Ces choix sont élaborés à partir de règles de priorité. Cette approche présente plusieurs avantages dont le principal réside dans la prise de décision rapide et facile à comprendre pour les utilisateurs.

III.1.2. Caractéristiques

Dans ce paragraphe nous proposons de présenter les principales caractéristiques des règles de priorité et par extension les différentes méthodes de choix dynamique de règles.

Les règles de priorité peuvent admettre plusieurs classifications. Nous présenterons les deux qui nous semblent les plus pertinentes. On distingue dans un premier temps les règles statiques et dynamiques. Les règles statiques sont indépendantes du temps. Elles sont fonction des données associées aux tâches et aux ressources. En revanche, les règles dynamiques, sont dépendantes du temps et donc des décisions d'ordonnancement.

Dans un deuxième temps, les règles de priorité peuvent être classées suivant le caractère local ou global d'une règle. Une règle locale examine seulement une sous-partie des informations disponibles à la différence d'une règle globale qui exploite toutes les informations disponibles. Dans la pratique, les objectifs considérés sont souvent multiples et les règles sont combinées afin de pouvoir prendre en compte plusieurs indicateurs en même temps.

Une extension naturelle des **méthodes d'ordonnancement par règles** consiste à permettre au système de choisir ou de modifier dynamiquement la règle à utiliser. Cette extension permet d'améliorer considérablement la performance du système. **La sélection de règle** peut être réalisée soit à l'aide de simulations soit à l'aide d'un modèle de connaissances. Dans cet état de l'art, nous nous limiterons à la sélection par simulation qui est susceptible d'être exploitée dans notre étude.

L'idée consiste au moment de la prise de décision, à simuler l'emploi de plusieurs règles, en se projetant éventuellement sur le futur puis de sélectionner celle fournissant la meilleure performance.

[Chong et al.03] propose une méthode de choix dynamique qui suit la démarche ci-dessous. Les performances des différentes règles sont d'abord comparées à l'aide de simulations hors–ligne, exécutées en tenant compte des éventuelles perturbations potentielles. Les résultats de ces simulations sont ensuite utilisés comme des indicateurs pour sélectionner en ligne les règles les plus prometteuses.

III.1.3. Discussion

Nous constatons que les méthodes réactives présentent l'avantage de construire en temps réel, et de façon très souple, une solution satisfaisante. Ces méthodes peuvent prendre en compte des types d'incertitudes très variés : variation d'une durée, d'une date de début, Cependant, de telles approches fournissent en général des ordonnancements peu performants.

III.2. Approches prédictives

III.2.1. Généralités

Les méthodes **prédictives** sont souvent **exploitées** pour faire **face à des aléas**. Dans ces approches, **un ordonnancement déterministe** de **référence est construit hors-ligne**. Cet ordonnancement va être réinjecté en ligne pour pouvoir orienter les décisions.

Ce type d'approches permet de s'affranchir des inconvénients des approches réactives puisque l'ordonnancement hors ligne est capable d'améliorer la performance globale de l'ordonnancement réactif en imposant des décisions. De plus, un ordonnancement de référence disponible en permanence est un atout pour les décideurs leur permettant de disposer d'une vision prévisionnelle de l'organisation (Figure 14).

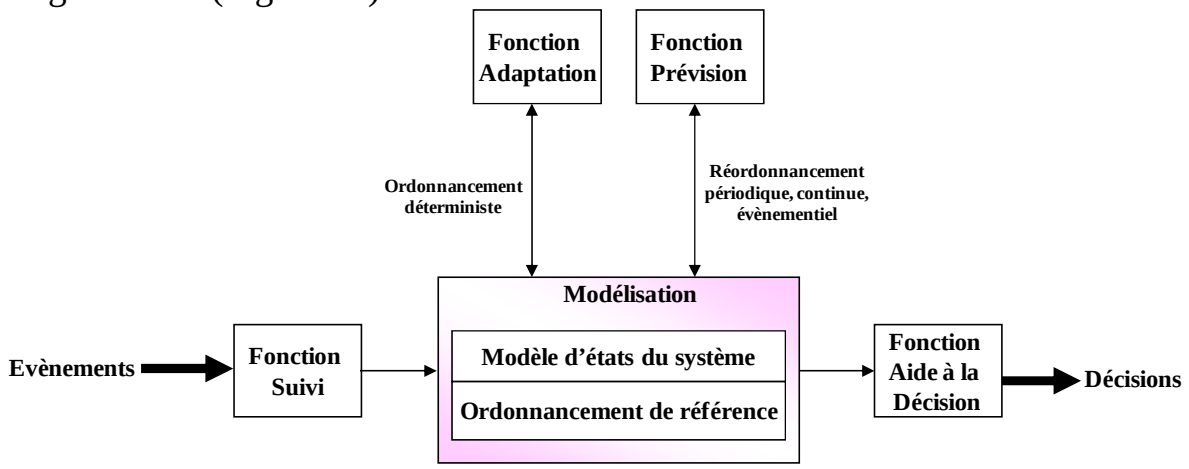


Figure 14. Représentation d'un ordonnancement prédictif

III.2.2. Caractéristiques

Ces approches d'ordonnancement réactif se distinguent des approches précédentes dans la manière de gérer l'ordonnancement de référence. Dans [Sabuncuoglu & Bayiz 00], des auteurs abordent ces approches prédictives en les distinguant par rapport aux autres par les modifications apportées à

l’ordonnancement de référence. En effet, un problème d’ordonnancement peut impliquer un réordonnancement total, un réordonnancement partiel ou un réordonnancement local d’une tâche.
Un réordonnancement total indique que l’ensemble des tâches non réalisées est ordonnancé à nouveau en tenant compte de l’état du système.
Un réordonnancement partiel ne s’intéresse qu’à un sous-ensemble des tâches non réalisées. Enfin, un réordonnancement local ou réparation d’ordonnancement, ne modifie que l’ordonnancement ou l’affectation d’une seule tâche.

Dans la littérature, nous pouvons voir certains auteurs établir une classification des approches prédictives en s’appuyant sur deux questions :
Quand réordonnancer ? Comment réordonnancer ?
Dans la réponse à la première question, on peut distinguer trois types de réordonnancement : le réordonnancement continu qui consiste à mettre à jour l’ordonnancement dès l’arrivée d’une nouvelle perturbation, le réordonnancement périodique qui vise à actualiser l’ordonnancement à la fin d’une période de temps prédéterminée et le réordonnancement évènementiel qui présente un compromis entre les deux types de réordonnancement puisqu’il vise à recalculer l’ordonnancement dès qu’une déviation de la performance est détectée.
Dans la réponse à la deuxième question, on peut distinguer quatre réponses. La méthode par décalage à droite consiste à retarder l’exécution de tâches posant problème. Le réordonnancement total consiste à minimiser le retard moyen des travaux. Le réordonnancement multi objectif s’intéresse à la recherche de compromis entre la performance du nouvel ordonnancement et la stabilité de l’atelier. Enfin, le réordonnancement par retour vers l’ordonnancement initial consiste à ne modifier que sur une période de temps les décisions de l’ordonnancement de référence.

III.2.3. Discussion

Les méthodes prédictives, lorsqu’elles peuvent être mises en œuvre, sont généralement plus performantes que les méthodes réactives pures. Pour tenter d’améliorer ces performances, il est nécessaire d’anticiper les perturbations soit lors de la phase d’ordonnancement hors-ligne, soit lors de la réaction en ligne, en tirant parti d’informations disponibles sur les incertitudes.

III.3. Approches proactives

III.3.1. Généralités

L'objectif premier de ces approches est **d'anticiper les perturbations avant qu'elles ne se produisent**. Ces approches peuvent être classées en trois catégories : **Proactivité par construction d'un ordonnancement robuste**, **Proactivité par construction d'un ordonnancement flexible** et **Proactivité lors de la phase d'adaptation en ligne d'un ordonnancement de référence**.

III.3.2. Caractéristiques

Les approches proactives par construction d'un ordonnancement robuste s'intéressent à des approches élaborant une solution robuste. Ces approches utilisent un modèle d'incertitude qui caractérise différents scénarios permettant au processus d'ordonnancement de construire une bonne solution. Ces approches sont elles mêmes classées différemment selon les travaux abordés. Nous citerons les approches qui nous semblent pertinentes dans notre cas.

Une première catégorie consiste à représenter des scénarios d'incertitudes dans le but d'optimiser la performance d'une solution. Ces incertitudes concernent généralement des durées opératoires [Kouvelis et al. 00].
Une autre catégorie d'approches vise à déterminer un ordonnancement robuste au sens de l'évaluation de la fonction objectif considérée. Contrairement à la catégorie précédente, il n'est pas nécessaire de disposer d'un ensemble de scénarios, ni de disposer d'une solution optimale pour chaque scénario.
Une dernière catégorie d'approches s'intéresse à la détermination d'une solution robuste par le biais de l'analyse de sensibilité [Hall & Posner 04]. L'analyse de sensibilité s'intéresse à la question « que se passerait –il si ? » qui se pose lorsque les paramètres d'un problème sont susceptibles de changer. On s'intéresse généralement à caractériser pour une solution un périmètre d'insensibilité. C'est ce périmètre que l'on cherche à maximiser pour obtenir une solution robuste.

Les approches proactives par construction d'un ordonnancement flexible s'intéressent non pas à élaborer une solution robuste mais à déterminer un ensemble flexible de solutions. La flexibilité est vue comme un moyen permettant de faire face aux perturbations.
En effet, disposer d'un ensemble de solutions flexibles permet d'avoir un choix sur les ordonnancements à appliquer afin d'absorber au mieux les aléas. Dans ces types d'approches, nous distinguons deux catégories d'approches selon la

flexibilité recherchée : les méthodes à flexibilité temporelle et les méthodes à flexibilité séquentielle.
La majorité des travaux appliquant les méthodes fournissant de la flexibilité temporelle proposent d'augmenter la flexibilité de l'ordonnancement initial en utilisant des marges temporelles. Les incertitudes sont dans la majeure partie des cas relatives aux pannes de machines. Des travaux plus poussés visent à mieux répartir au fil de l'ordonnancement la quantité de marge réservée en tenant compte des probabilités de marge. Ainsi, si une tâche est séquencée tard, alors la probabilité qu'une perturbation survienne avant son exécution est plus grande, donc la tâche a besoin de plus de marge. Les résultats expérimentaux montrent que ces techniques sont plus performantes que celles consistant à insérer des protections temporelles ajoutées aux durées opératoires.
Les méthodes fournissant de la flexibilité séquentielle permettent de pallier certains inconvénients des méthodes décrites précédemment à savoir, le retard d'une tâche pour cause d'indisponibilité des ressources dont elle a besoin, la répercussion du retard sur les tâches qui la succèdent.
Pour pallier cet inconvénient, la méthode fournissant de la flexibilité séquentielle est vue comme un moyen de faire face aux perturbations en élaborant un ensemble de solutions flexibles, de performance acceptable en ligne pour réagir au mieux aux fluctuations de l'environnement.

Enfin, **les approches proactives-réactives par le biais de la phase de l'adaptation en ligne d'un ordonnancement de référence** consistent à placer la « proaction » lors de la phase d'adaptation en ligne.
En pratique, une solution d'ordonnancement déterministe est réalisée hors ligne prenant en compte les durées moyennes des tâches et minimisant le temps d'achèvement global sur un horizon donné. Cette solution sert de référence. Mais au cours de l'exécution de l'ordonnancement, de nouveaux ordonnancements sont développés proactivement « au cas où » pour faire face à des perturbations dont la probabilité d'occurrence augmente significativement. Si une perturbation, pour laquelle un ordonnancement avait été préparé se présente, on passe de la configuration courante à la nouvelle configuration (Figure 15).

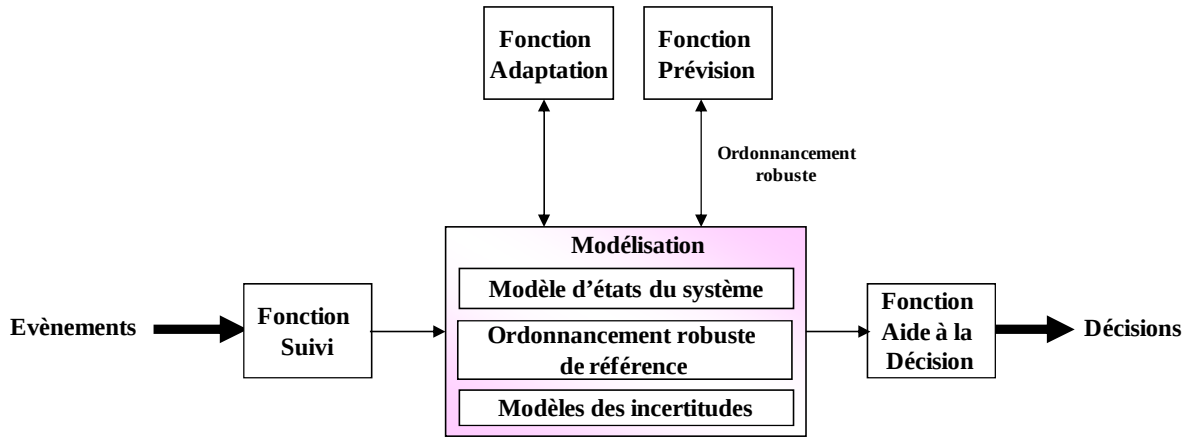


Figure 15. Représentation d'un ordonnancement proactif

III.3.3. Discussion

Dans cet état de l'art, il a été souligné qu'un ordonnancement réactif doit posséder la capacité d'adaptation au caractère incertain de son environnement et gérer les évènements contingents issus de cet environnement.
Nous avons pu voir qu'au travers des approches présentées, certaines avaient recours à des ordonnancements de référence et avaient comme objectif d'anticiper les perturbations. Cette distinction entre approches a conduit à les classer en trois catégories.

Les **approches réactives** présentent l'avantage d'élaborer en temps réel, une solution faisable en prenant en compte les incertitudes de nature très variée, bien que la performance des ordonnancements sous jacents puissent être faible et qu'il ne soit pas possible d'anticiper les évènements.

Les **approches prédictives** exploitent un ordonnancement de référence, raffiné au cours de son exécution de façon continue, périodique ou par évènement, en procédant à des ordonnancements totaux, partiels ou des réparations d'ordonnancement. L'existence d'un ordonnancement de référence permet aux décideurs de disposer d'une vision prévisionnelle de l'organisation en termes de besoin en ressource. Cependant, l'ordonnancement de référence est déterministe, il donne ainsi une vision optimiste de l'organisation qui ne tient pas suffisamment en compte des perturbations futures.

Enfin, **les approches proactives** permettent de disposer d'une vision plus réaliste en anticipant les fluctuations de l'environnement tout en construisant un ordonnancement qui intègre explicitement les incertitudes. Ces approches sont distinguées en trois catégories : celles qui, sur la base d'une modélisation des incertitudes, cherchent à produire une solution non flexible et robuste (la

solution produite étant de qualité acceptable pour un ensemble de plusieurs scénarios de réalisation possibles), celles qui insèrent de la flexibilité temporelle et/ou séquentielle au sein d'une solution d'ordonnancement (la flexibilité étant vue comme un moyen de résister à l'incertain) et celles qui anticipent en ligne les perturbations, en fonction de leur probabilité d'occurrence, en développant de façon dynamique plusieurs ordonnancements de secours.

IV. BILAN D'ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT

Les études développées dans cette partie se positionnent dans la planification conjointe des activités de production et de maintenance. En effet, il s'agit de proposer une approche de réordonnancement des activités de maintenance permettant d'assurer à l'organisation la productivité exigée.
L'ordonnancement des activités de maintenance a des spécificités qui leur sont propres (incertitudes des activités de maintenance, contraintes, critères…).
Les activités de maintenance sont sujettes à des incertitudes qui peuvent être fréquentes et de forte amplitude. Ces incertitudes peuvent être présentes à différents niveaux de l'organisation. Elles sont généralement inhérentes à des défaillances du système, mais elles peuvent également être considérées comme des indisponibilités de ressource (Main d'œuvre, outillage, pièces de rechange) qui seront plutôt considérées au niveau de l'exploitation.

De plus, les contraintes d'ordonnancement que nous allons prendre en compte dans notre étude ne se limitent pas à celles liées aux ressources et au temps.
En effet, nous introduirons un autre type de contraintes telles que la demande en mission d'une flotte de systèmes. Ce type de contrainte est significatif pour des secteurs de type aéronautique, naval ou autre.

Cette contrainte de demande nécessite d'avoir une vision proactive et donc de réaliser un ordonnancement proactif permettant d'anticiper la demande et ainsi de réordonnancer les activités de maintenance pour permettre aux décideurs de réaliser des choix dans la gestion des ressources.

Pour répondre à nos objectifs, nous présentons dans la figure ci-dessous (Figure 16), les modèles qui composeront l'approche que nous proposons dans le chapitre suivant.

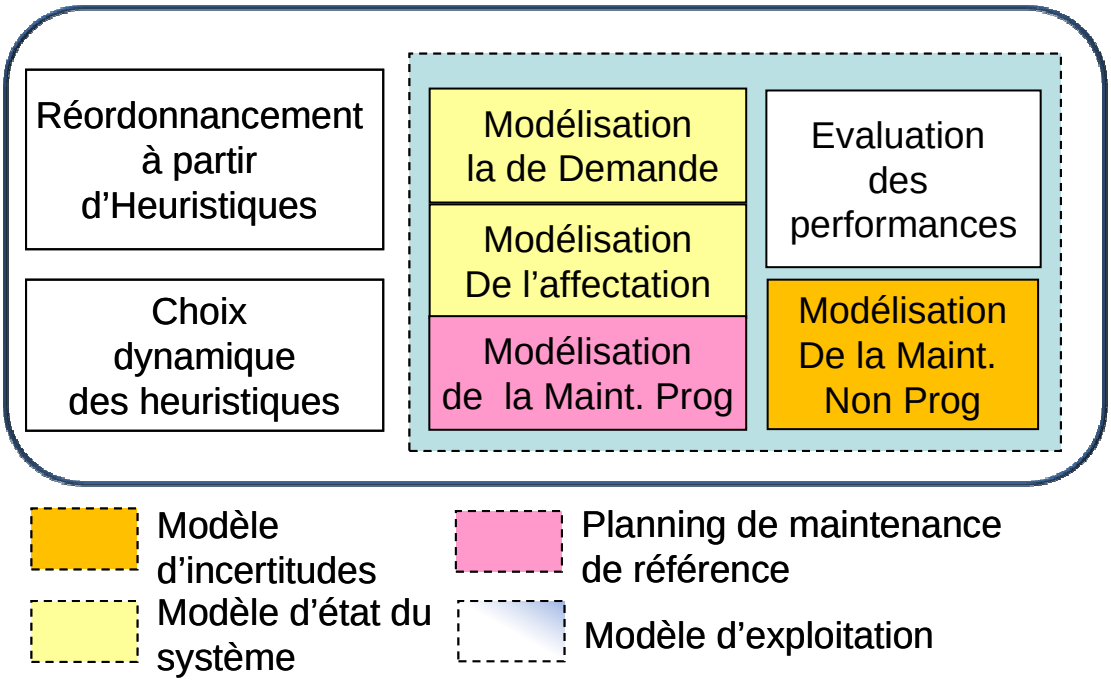


Figure 16. Modèle d'ordonnancement proactif proposé dans cette étude

Dans un premier temps, cette approche sera fondée sur un mécanisme de réordonnancement constitué d'heuristiques. Cet ensemble d'heuristiques nous a démontré ses avantages puisqu'il permet d'obtenir des résultats rapides et qui peuvent être compris par les décideurs.
Associé à cet ensemble d'heuristiques, un modèle permettant d'opérer le choix dynamique des heuristiques sera proposé.

Dans un deuxième temps, notre ordonnancement sera également constitué d'un modèle d'organisation déjà décrit et proposé dans [Djeridi et al. 2010]. Ce modèle d'organisation sera constitué du modèle de demande, d'affectation, d'état du système et du modèle d'évaluation des performances en termes de disponibilité.
Nous représentons dans la figure ci-dessus, une correspondance entre les différents modèles génériques décrits dans l'état de l'art (Modèle d'incertitudes, modèle de réordonnancement de référence, modèle d'état,..) et les modèles décrivant l'organisation proposés dans [Djeridi et al. 2010] (Modèle de demande, Modèle d'affectation, Modèle de maintenance et Modèle d'évaluation des performances).
Cette correspondance permet de déduire que nos approches sont complémentaires aux approches proactives avec l'utilisation d'heuristiques d'ordonnancement.

Troisième Partie

-

PROPOSITIONS

Avant-propos

Cette partie présente les principales contributions apportées dans cette thèse concernant la maîtrise de la disponibilité. Les contributions vont porter, dans un premier temps (**Chapitre V**), sur une méthode de modélisation de l'exploitation permettant l'évaluation de la disponibilité des systèmes. Dans un deuxième temps (**Chapitre VI**), il s'agira de présenter une méthode de réordonnancement du programme de maintenance en s'appuyant sur les heuristiques que nous proposerons. Dans le (**Chapitre VII**), nous présenterons l'application des méthodes proposées des deux précédents chapitres dans le domaine de l'aéronautique. Enfin dans un dernier chapitre (**Chapitre VIII**), nous évaluerons les avantages et les limites des méthodes présentées.

PLAN DE PARTIE

CHAPITRE V : UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION

I. INTRODUCTION : VERS L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE D'UN ENSEMBLE DE SYSTEMES 90
II. CADRE METHODOLOGIQUE D'UN MODELE D'EXPLOITATION 91
III. PROPOSITION D'UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION 92
III.1. Modélisation de la Demande 93
III.1.1. Contexte de modélisation 94
III.1.2. Processus de modélisation 95
III.1.2.1. Demande stochastique 97
III.2.1.2. Demande déterministe 99
III.2.1.3. Synthèse 100
III.2. Modélisation de l'affectation 100
III.2.1. Rappel et définition : caractéristiques d'une file d'attente 101
III.2.2. Méthode de modélisation de l'affectation 102
III.2.3. Synthèse 104
III.3. Modélisation de la maintenance 105
III.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 107
III.3.1.1. Description du processus de maintenance programmée 107
III.3.1.2. Evaluation des temps de maintenance programmée 108
III.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 115
III.3.2.1. Description du processus de maintenance non programmée 115
III.3.2.2. Evaluation des temps de maintenance non programmée 116
III.4. Evaluation de la disponibilité 119
IV. BILAN DE LA MODELISATION 125

CHAPITRE VII : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LA MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE D'UNE FLOTTE D'HELICOPTERES

I. INTRODUCTION : CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 129
II. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE REORDONNANCEMENT PROACTIF DE MAINTENANCE 131
II.1. Descriptif des étapes de la méthode 132
II.2. Sélection des heuristiques d'ordonnancement 134
III. PROPOSITION DES HEURISTIQUES DE REORDONNANCEMENT DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 136
III.1. Présentation des heuristiques de réordonnancement 137
III.1.1. Notations 137
III.1.2. Les heuristiques de réordonnancement 139
III.2. Heuristique de réordonnancement par décalage 140
III.2.1. Présentation générale de l'heuristique 140
III.2.2. Description détaillée de l'heuristique 141
III.2.2.1. Sélection des tâches potentielles 141
III.2.2.2. Décalage des tâches de maintenance sélectionnées 143

III.2.2.3. Evaluation des performances 145
III.2.3. Synthèse 145
III.3. Heuristique de réordonnancement par agrégation 146
III.3.1. Présentation générale de l'heuristique 146
III.3.2. Description détaillée de l'heuristique 146
III.3.2.1. Identification des temps non requis 147
III.3.2.2. Agrégation des tâches de maintenance 147
III.3.2.3. Evaluation des performances 155
III.3.3. Synthèse 155
III.4. Heuristique de réordonnancement par désagrégation 156
III.4.1. Présentation générale de l'heuristique 156
III.4.2. Présentation détaillée de l'heuristique 156
III.4.2.1. Sélection des visites candidates 157
III.4.2.2. Identification des temps non requis 157
III.4.2.3. Désagrégation des visites de maintenance 157
III.4.2.4. Evaluation des performances 161
III.4.3. Synthèse 161
IV. BILAN DE LA MODELISATION 162

CHAPITRE VII : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LA MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE D'UNE FLOTTE D'HELICOPTERES

I. CONTEXTE 166
I.1. Confidentialité des résultats 166
I.2. Exploitation étudiée 166
I.2.1. Description des caractéristiques organisationnelles 167
I.2.2. Description de la demande 167
II. MODELISATION DE L'EXPLOITATION ET EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 168
II.1. Introduction 168
II.2. Modélisation déterministe de l'exploitation 169
II.2.1. Modélisation de la demande 169
II.2.2. Modélisation de l'affectation 170
II.2.3. Modélisation de la maintenance 170
II.2.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 170
II.2.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 176
II.2.4. Evaluation de la disponibilité 180
II.3. Modélisation stochastique de l'exploitation 181
II.3.1. Modélisation de la maintenance 181
II.3.1.1. Modélisation de la maintenance programmée 181
II.3.1.2. Modélisation de la maintenance non programmée 185
II.3.2. Evaluation de la disponibilité 187
II.4. Conclusions 187
III. ANALYSE DES LEVIERS D'AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE 188
III.1. Introduction 188
III.2. Analyse des gains en disponibilité 189
III.2.1. Analyse de sensibilité 189
III.2.2. Bilan et Recommandations 191

III.3. Conclusions 191
IV. AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE PAR L'OPTIMISATION DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 192
IV.1. Introduction 192
IV.2. Analyse du Programme de maintenance 192
IV.2.1. Sélection des heuristiques potentielles 192
IV.2.2. Proposition du programme de maintenance 193
IV.2.3. Mise en place du programme de maintenance 198
V. BILAN DE L'ETUDE : VERS UN MODELE DE MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE DE L'EXPLOITATION 198

CHAPITRE VIII : EVALUATION DES PROPOSITIONS

I. DEMARCHE DE VALIDATION 202
I.1. Double évaluation 202
I.2. Méthode de validation 203
II. EVALUATION DES PROPOSITIONS DANS LE CADRE DU DOMAINE AERONAUTIQUE 204
II.1. Evaluation de la méthode de maîtrise de la disponibilité 204
II.2. Description des applications industrielles réalisées dans le cadre des analyses de disponibilité 206
II.3. Evaluation de l'impact de nos propositions au niveau des acteurs projets 207
III. EVALUATION DE L'APPLICABILITE DE LA DEMARCHE SUR D'AUTRES SYSTEMES INDUSTRIELS 209
III.1. Contraintes opérationnelles et hypothèses d'applicabilité 209
III.2. Eléments de réflexion sur l'application de la méthode sur d'autres secteurs étudiés 210
IV. BILAN DE VALIDATION 211

CHAPITRE V :

Proposition d'une méthode de modélisation de l'exploitation

Résumé

Nos travaux de recherche ont pour objectif d'évaluer la disponibilité d'un système ou d'un ensemble de systèmes. Dans ce chapitre, nous proposons une méthode qui vise à modéliser l'exploitation en prenant en compte l'ensemble des contraintes opérationnelles (Demandes, Programme de maintenance, Logistique,..). Les résultats de la modélisation aboutissent à un planning d'exploitation constitué d'un planning de demande, d'un plan d'affectation des systèmes, d'un planning de maintenance programmée et non programmée.
La méthode de modélisation de l'exploitation est basée sur quatre étapes de modélisation permettant de réaliser chacune des plannings cités ci-dessus : Modélisation de la demande, Modélisation de l'affectation, Modélisation de la maintenance et Evaluation de la disponibilité.

Ensuite, nous présentons des éléments de méthode permettant d'évaluer la sensibilité des différents leviers d'amélioration de la disponibilité sur l'exploitation.

Enfin, nous terminons ce chapitre par la proposition d'un processus de maîtrise de la disponibilité en identifiant ses flux d'informations ainsi que ses principaux processus de traitement.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE V : PROPOSITION D'UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION

I. INTRODUCTION : VERS L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE D'UN ENSEMBLE DE SYSTEMES 90
II. CADRE METHODOLOGIQUE D'UN MODELE D'EXPLOITATION 91
III. PROPOSITION D'UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION 92
III.1. Modélisation de la Demande 93
III.1.1. Contexte de modélisation 94
III.1.2. Processus de modélisation 95
III.1.2.1. Demande stochastique 97
III.2.1.2. Demande déterministe 99
III.2.1.3. Synthèse 100
III.2. Modélisation de l'affectation 100
III.2.1. Rappel et définition : caractéristiques d'une file d'attente 101
III.2.2. Méthode de modélisation de l'affectation 102
III.2.3. Synthèse 104
III.3. Modélisation de la maintenance 105
III.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 107
III.3.1.1. Description du processus de maintenance programmée 107
III.3.1.2. Evaluation des temps de maintenance programmée 108
III.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 115
III.3.2.1. Description du processus de maintenance non programmée 115
III.3.2.2. Evaluation des temps de maintenance non programmée 116
III.4. Evaluation de la disponibilité 119
IV. BILAN DE LA MODELISATION 125

Chapitre V : Proposition d'une méthode de modélisation d'une exploitation pour évaluer la disponibilité

« La méthode, c'est le chemin, une fois qu'on l'a parcouru »

Marcel GRANET[1]

I. INTRODUCTION : VERS L'EVALUATION DE LA DISPONIBILITE D'UN ENSEMBLE DE SYSTEMES

La mesure de la performance d'une exploitation est une question toujours d'actualité pour tout exploitant de systèmes complexes. En effet, comment évaluer la performance opérationnelle, d'une exploitation ? Dispose-t-on de méthodes et d'outils pour réaliser cette évaluation ? Peut – on réellement tout mesurer ? Quels paramètres entrent en compte dans cette évaluation ? Les exploitants sont amenés à se poser ces questions pour mettre en place et améliorer le système d'évaluation des performances de leur organisation.

La littérature concernant l'évaluation de la performance en entreprise est abondante. Cependant, elle se concentre généralement sur un seul indicateur de l'organisation du système de production ou de sa stratégie.
Concernant par exemple les exploitants d'avions d'affaires, les dirigeants sont à la recherche de méthodes permettant d'avoir une évaluation des performances opérationnelle de leur organisation globale en particulier l'impact de l'organisation de la maintenance sur l'exploitation.

La performance est donc intimement liée à la notion de pilotage qui consiste, en pratique, à mettre à la disposition de la direction de l'entreprise un nombre d'indicateurs opérationnels, à court et long terme regroupés souvent sous la forme d'un tableau de bord, de façon à aider les dirigeants dans leurs prises de décisions stratégiques aussi bien qu'opérationnelles.

Dans ce chapitre, nous allons proposer une démarche de modélisation permettant d'évaluer les performances opérationnelles d'une exploitation. Pour présenter cette méthode, nous devons dans un premier temps définir le cadre méthodologique dans lequel va s'insérer cette méthode. Dans un deuxième

[1] Sociologue et sinologue français, 1884 – 1940.

temps, nous présenterons les étapes de modélisation de l'exploitation. Dans un troisième temps, nous présenterons la synthèse de cette modélisation.

II. CADRE METHODOLOGIQUE D'UN MODELE D'EXPLOITATION

Nous avons vu dans la section précédente, qu'il était nécessaire de proposer une démarche permettant à des experts de métiers différents d'avoir une vue commune de l'exploitation d'un système et en particulier de la disponibilité. Dans cette optique, nous proposons une démarche de modélisation (Figure 17) structurée en quatre phases : **Collecte des données d'exploitation**, **Modélisation de l'exploitation**, **Evaluation des indicateurs de disponibilité** et **Optimisation de l'exploitation**.
Nous allons reprendre chaque phase de cette démarche de modélisation. Ensuite, nous nous focaliserons sur la phase de modélisation.

Collecte des données d'exploitation. Cette phase consiste à capitaliser les données d'exploitation concernant l'occurrence des missions, la durée moyenne des visites de maintenance réalisées sur chaque système, l'effectif des opérateurs de maintenance, etc.

Modélisation de l'exploitation. Cette phase consiste à analyser l'exploitation du système pour aboutir à une évaluation de sa disponibilité. Cette analyse sera fondée sur une modélisation déterministe ou stochastique.

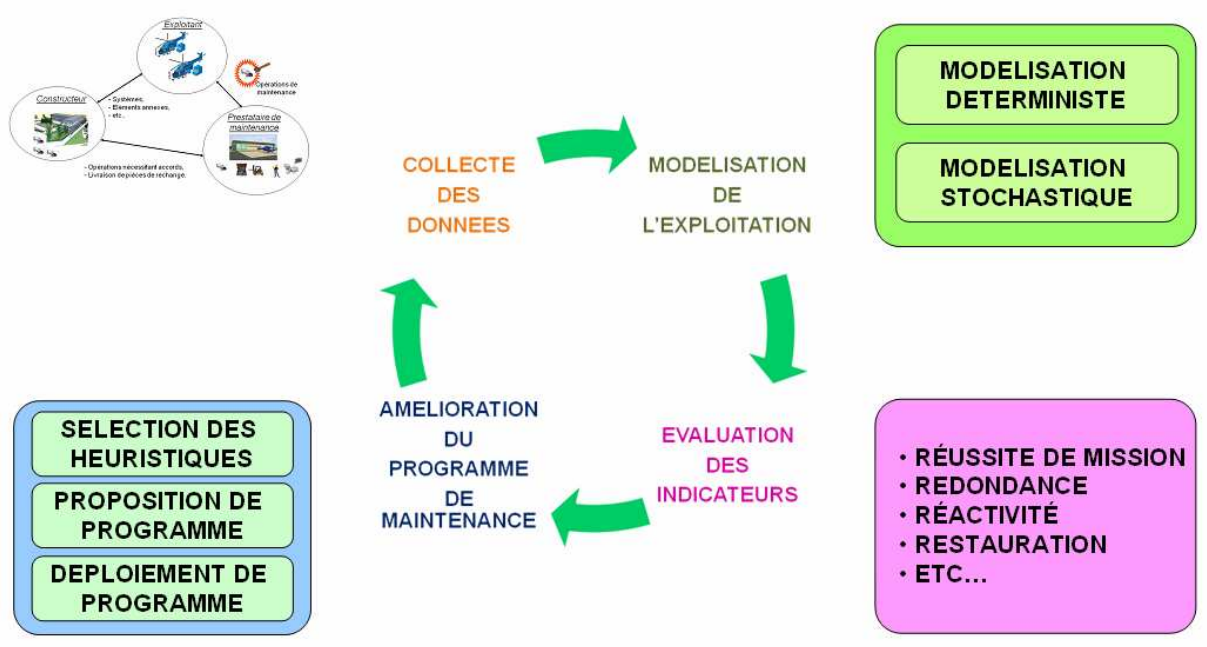


Figure 17. Démarche de modélisation de l'exploitation

Evaluation des indicateurs de disponibilité. Cette phase permet d'aboutir à un diagnostic aidant l'exploitant à identifier les contributeurs d'indisponibilité pénalisant l'exploitation d'un système. Cette analyse passe nécessairement par l'identification et la mesure des indicateurs de disponibilité.

Optimisation de l'exploitation. Cette optimisation peut concerner différentes facettes de l'exploitation : la personnalisation du programme de maintenance au client, le dimensionnement de l'organisation, la gestion des missions, etc.
Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la phase de modélisation de l'exploitation. Les autres phases seront explicitées dans les chapitres suivants.

III. PROPOSITION D'UNE METHODE DE MODELISATION DE L'EXPLOITATION

Nous développerons une analyse déterministe pour laquelle nous disposons de données suffisantes. L'analyse stochastique sera obtenue en partant d'un modèle déterministe comme le montre [Husson 2001], sur lequel nous ferons varier les paramètres d'entrées et ce, en fonction des contraintes fixées au début de l'analyse. Quelle soit déterministe ou stochastique, la modélisation sera structurée en 4 étapes : Modélisation de la demande, Modélisation de l'affectation des systèmes, Modélisation de la maintenance, Evaluation de la disponibilité (Figure 18).

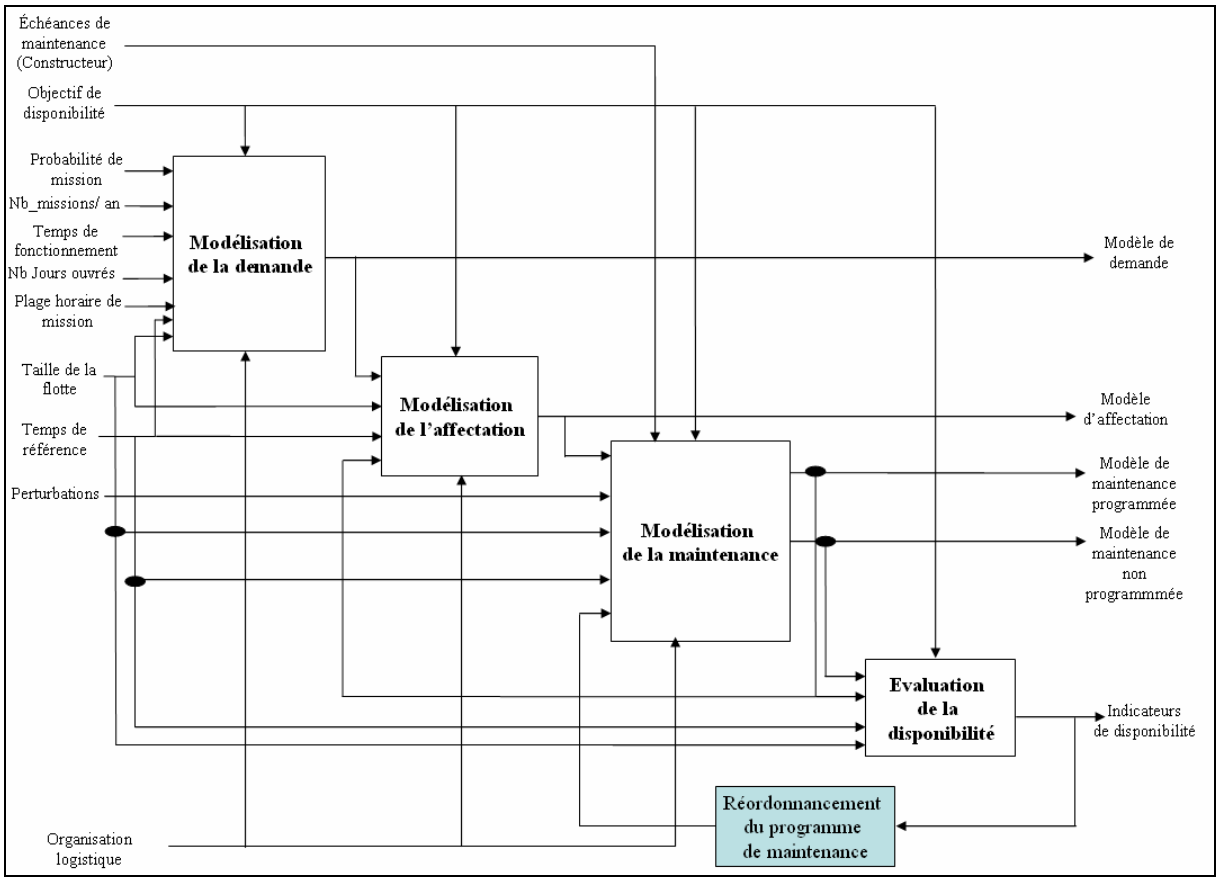


Figure 18. Les quatre étapes clés de la méthode de modélisation de l'exploitation

La méthode de modélisation présentée dans la Figure 18, est construite sur une démarche itérative, basée sur la formule de disponibilité issue de la norme [MIL STD 1388, 93] (Equation 1).

$$\mathbf{D.O} = \frac{\mathbf{TF + TA}}{\mathbf{(TF + TA) + TMP + TMNP + DL}} = \frac{\mathbf{TD}}{\mathbf{TR}} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

D.O	Disponibilité Opérationnelle
TD	Temps de Disponibilité
TR	Temps Requis
TF	Temps de Fonctionnement
TA	Temps d'Attente
TMP	Temps de Maintenance Programmée
TMNP	Temps de Maintenance Non Programmée
DL	Délais logistiques

Tableau 3. Définition des paramètres de l'équation 1

La disponibilité se calcule en mesurant les temps spécifiés dans l'équation (1) ; à savoir le temps de fonctionnement, le temps de maintenance programmée, le temps de maintenance non programmée et les délais logistiques.
Ces différentes quantités sont généralement évaluées à partir de l'historique de l'exploitation. Dans la réalité, on constate souvent la difficulté de les mesurer.

Dans ce cas, il est alors nécessaire d'évaluer ces quantités en utilisant un modèle d'exploitation du système. Dans ce contexte, chaque étape de la modélisation concernera l'analyse et l'estimation d'un paramètre de l'équation (1). Nous allons reprendre chaque étape de la figure 18 pour les expliciter ci après.

III.1. Modélisation de la Demande

Une modélisation pertinente de la disponibilité nécessite la connaissance des demandes futures que l'exploitant aura à satisfaire. La prévision de la demande est un moyen d'améliorer la prise de décision sur la gestion du système pour ce qui concerne :

- la maintenance (Gestion des pièces de rechange, Gestion des outillages, Planification des inspections de maintenance, etc.) à un niveau opérationnel,
- le renouvellement des éléments du système à un niveau tactique,

- l’accomplissement des objectifs de mission au niveau stratégique [Lee et al., 1997].

En effet, la connaissance de la demande est un préalable à toute étude de planification d’activités de maintenance et par là-même de disponibilité. Ce paragraphe s’inscrit dans cet objectif en vue de proposer une méthode d’analyse de la demande qui permet de fournir un scénario de demande que l’exploitant sera amené à utiliser.

Nous présenterons dans le **premier paragraphe** le **contexte de modélisation** pour l’analyse de la demande. Dans le **deuxième paragraphe** nous présenterons la **méthode proposée** pour élaborer des plannings de demande de type déterministe et stochastique. Dans le **dernier paragraphe** nous présenterons la **synthèse de cette modélisation**.

III.1.1. Contexte de modélisation

Les exploitants de systèmes complexes ont des demandes en mission qui peuvent être variables en fonction du type (déterministe et stochastique) et de l’horizon de planification (court, moyen et long terme) [Bonnel 2001].

De ce fait, il est nécessaire de proposer une méthode permettant d’élaborer des scénarios de demande suffisamment précis pour analyser l’organisation de la maintenance de l’exploitant et ainsi prévoir sa disponibilité.

Il existe une relation entre le choix du planning de demande et l’organisation des échéances de maintenance futures.

De ce fait, la modélisation de la demande se base sur plusieurs besoins:

- la **connaissance des paramètres de modélisation** d’une demande déterministe et stochastique,
- la **prise en compte de la demande passée** par des lois de tendance,
- la **prise en compte du caractère incertain** de la demande.

De plus, chaque secteur d’activité présente des spécificités qui permettent de modéliser à un niveau opérationnel l’évolution de la demande. Dans le cadre de notre étude nous avons proposé une arborescence des **paramètres de modélisation** de la demande adaptable pour une grande majorité de secteurs d’activité (Figure 19).

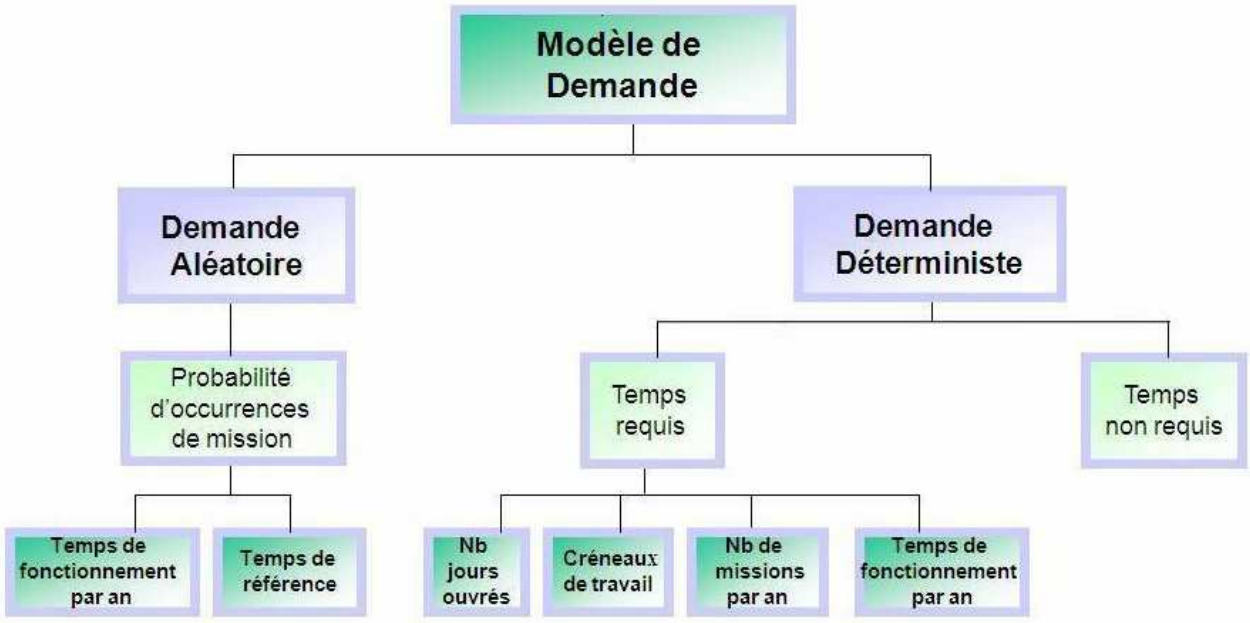


Figure 19. Arborescence des paramètres de modélisation de la demande

Dans cette figure, nous avons présenté une arborescence qui décrit les principaux paramètres de modélisation permettant d'élaborer un modèle de demande. Cette arborescence présente deux types de demande que nous avons cités auparavant (Déterministe et Stochastique) avec les paramètres associés. Ces deux types de demande seront détaillés dans le paragraphe suivant.

La prévision de la demande ne peut être réalisée sans **prendre en compte le caractère incertain, notamment** dans le cas de prévision de demande stochastique. Nous utiliserons une approche de modélisation basée sur des scénarios de demande que pourra rencontrer l'exploitant.

III.1.2. Processus de modélisation

Ce paragraphe présente les étapes de modélisation permettant d'aboutir à un scénario de demande.
Le processus de modélisation de la demande est structuré en trois étapes : **choix du modèle de demande**, **élaboration du planning de missions** et **l'évaluation de la prévision** (Figure 20).

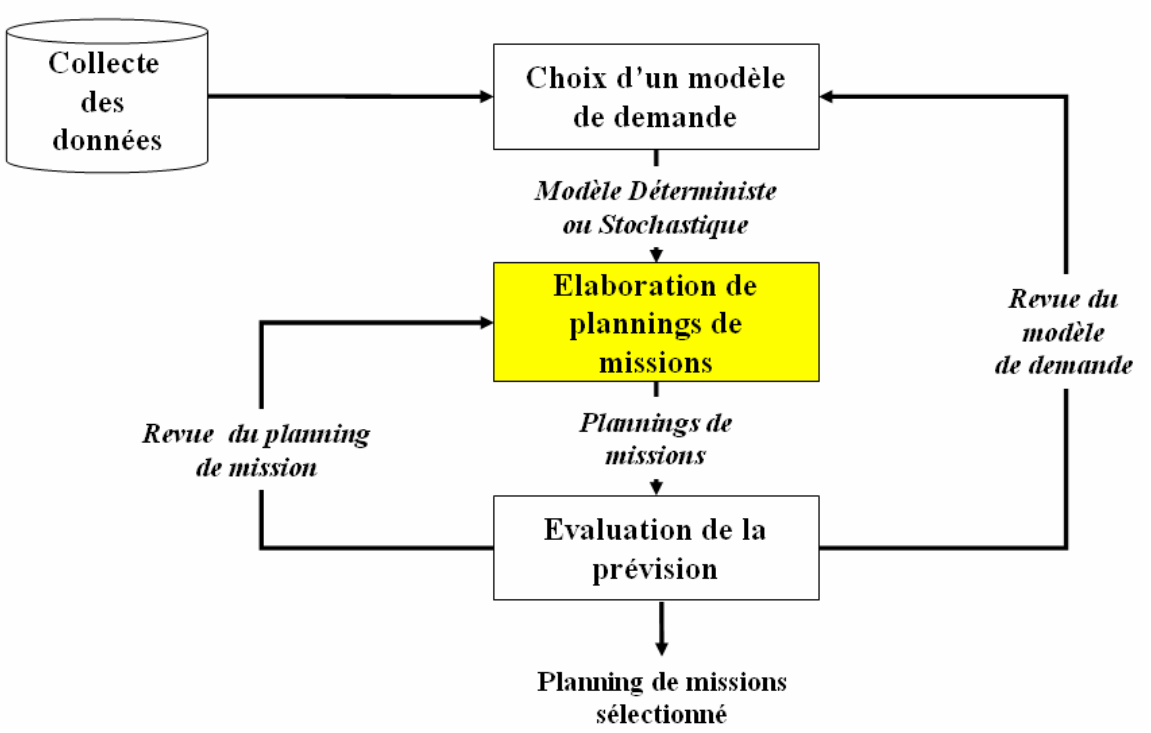


Figure 20. Principe de modélisation de la demande

Le **choix du modèle de** demande consiste à identifier le type de demande (déterministe, stochastique) adéquat pour la prévision de la demande. Le processus suivant consiste à **élaborer le planning de missions** dans lequel seront définies les dates de mission avec leur durée et le nombre de systèmes requis associés à chaque mission. Le dernier processus aura pour objectif **d'évaluer la prévision** pour valider ou remettre en cause, si nécessaire, l'élaboration du planning de missions ou le modèle de demande choisi. Dans le cas où les conditions sont satisfaisantes, le processus de modélisation permet de proposer un planning de missions.

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser plus précisément au processus d'élaboration d'un planning de missions. Ce processus suit généralement quatre étapes : **Synthèse des paramètres de modélisation**, **Caractérisation du temps requis**, **Modélisation des occurrences de missions**, **Elaboration des plannings de mission**.

Synthèse des paramètres de modélisation: Cette étape consiste à collecter les paramètres nécessaires à la modélisation de la demande. Ces informations sont généralement issues du retour d'expérience client, mettant en évidence les hypothèses d'exploitation telles que le volume d'activité moyen, les systèmes sollicités et engagés...
Caractérisation du temps requis: Cette modélisation consiste à définir des intervalles de temps nécessitant un nombre de systèmes. Cette évaluation

moyenne du temps requis peut être exprimée par une modèle déterministe ou stochastique.

Modélisation des occurrences de mission : Cette modélisation consiste à définir les dates de début, les durées ainsi que le nombre de systèmes nécessaires associés à chaque mission.

Elaboration du planning de missions: Cette étape permet de générer le(s) planning(s) de missions sélectionné(s) pour établir une évaluation de la disponibilité.

Nous allons mettre en œuvre ces étapes pour présenter le procédé d'élaboration d'une demande stochastique et déterministe.

III.1.2.1. Demande stochastique

Un modèle de ***demande « Stochastique »*** repose sur l'analyse des phénomènes aléatoires dépendant du temps. Ce type de demande peut être rencontré particulièrement dans le cas de transport d'urgence (Sécurité civile, Pompiers, Douane, Forces de l'ordre…).

Nous décrirons un planning de demande comme un chronogramme caractérisé par le temps de référence, le temps requis, l'occurrence de la mission et la durée de la mission (Figure 21).

Dans un planning de demande stochastique, l'occurrence des missions est aléatoire. La disponibilité requise (temps requis) est équivalente au temps de référence repéré ci-dessous sur l'axe des abscisses. Les créneaux de mission sont spécifiés pour un besoin en nombre de systèmes et par une durée opératoire.

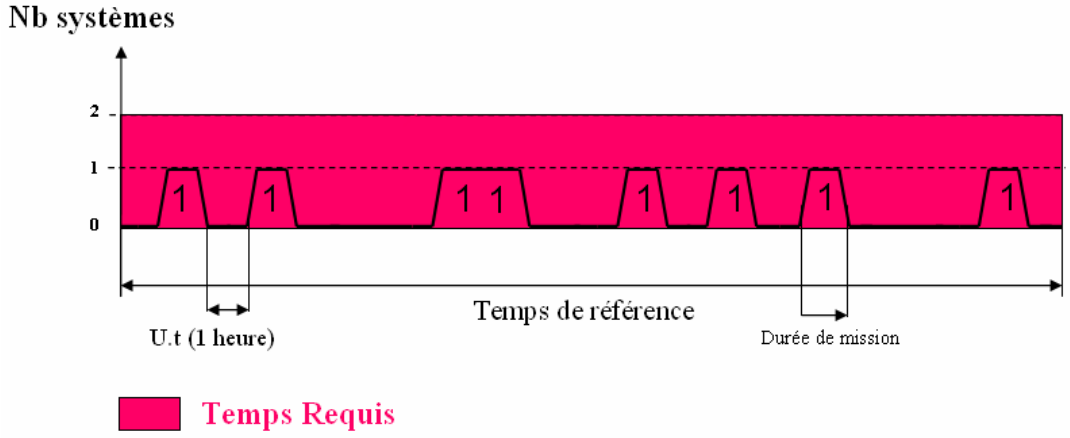


Figure 21. Exemple d'une réalisation de planning stochastique

La modélisation d'une demande stochastique repose principalement sur une **probabilité de mission**. Ce paramètre est défini à partir du rapport entre le **temps de fonctionnement** et le **temps de référence** comme le montre l'équation (2) :

$$\text{Probabilité_mission} = \frac{\text{Tps_fonctionnement}}{\text{Tps_référence}} = p \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Où le

$$\text{Tps_fonctionnement} = \sum_{i=1}^{nb_missions} \text{durée_mission}_i \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Le processus de modélisation consiste à générer un planning de missions (Figure 22). Sur chaque instant du temps de référence i, la demande en mission ($demand_mission_i$) sera exprimée par la formule suivante :

$$\text{demand_mission}_i = \left\{ \begin{pmatrix} \text{Go.(1)} \\ \text{NoGo.(0)} \end{pmatrix}, \ \text{Nb_S} \right\} \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Où l'état de la mission sera défini par le premier terme (Go, NoGo) et le nombre de systèmes nécessaires (Nb_S) dans le cas d'une occurrence de mission en second terme.

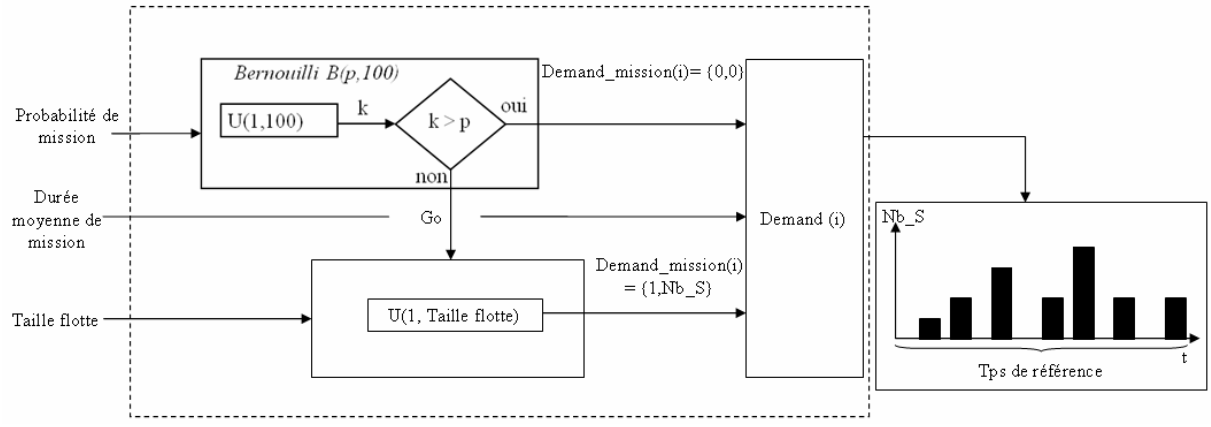


Figure 22. Processus de modélisation d'une demande stochastique

Par ailleurs, dans la modélisation (Figure 22), nous avons utilisé une loi de probabilité définie en 2 paramètres, par exemple la Distribution de Bernouilli de paramètres $B(p,100)$ où « p » est la Probabilité de mission et 100 l'étendue de la

Distribution. Dans le cas d'une occurrence de mission, un deuxième tirage est appliqué sur une loi Uniforme de paramètres U (1, taille de flotte) permettant de générer le nombre d'appareils nécessaires.

III.2.1.2. Demande déterministe

Un modèle de ***demande « Déterministe »*** ne fait intervenir aucune variable aléatoire.

Dans un planning de demande déterministe, l'occurrence des missions est connue. Le temps requis est identifié par les plages de travail de l'exploitant qui peuvent être travaillées ou chômées (Figure 23).

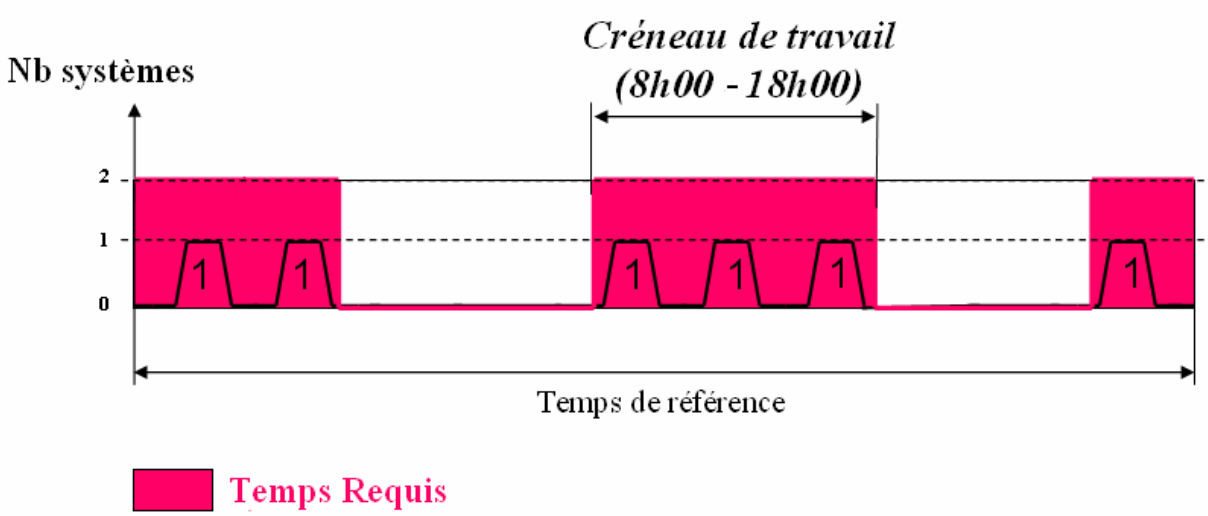


Figure 23. Exemple de planning déterministe

Le temps requis sera principalement caractérisé par un nombre de missions/jour avec des horaires et des durées associés, et ceci sur un temps de référence donné.

Nous avons besoin d'autres paramètres qui vont permettre de définir le Temps requis par jour et par semaine. En effet, un planning de missions de type déterministe suit également une demande de mission planifiée sur un horizon de plusieurs semaines.

Le processus de modélisation (Figure 24) consiste donc à définir le temps requis et les horaires ainsi que les durées de mission. La génération du planning de missions doit respecter 2 conditions successives:

- l'instant considéré doit appartenir à l'intervalle du temps requis (p.ex. instant considéré doit être 8h et 18h).
- Dans le cas où cette condition est satisfaite, l'instant doit correspondre à des horaires de missions planifiées.

Enfin, si cette dernière condition est satisfaite, une identification des systèmes disponibles sera réalisée. Dans le cadre de cette modélisation, le nombre de systèmes est défini par le client.

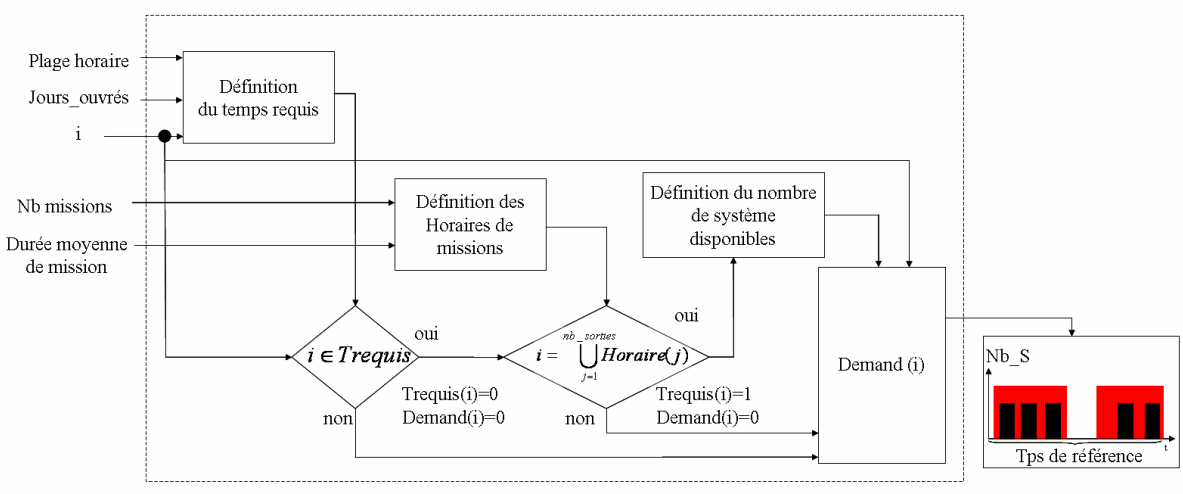


Figure 24. Processus de modélisation d'une demande déterministe

III.2.1.3. Synthèse

Dans ce paragraphe, nous avons présenté les différents processus de modélisation de la demande que nous allons utiliser pour analyser la disponibilité.
En effet, l'identification et la modélisation de la demande est la phase amont de toute analyse de disponibilité d'un système (Figure 18). L'identification et la modélisation de la demande conditionne ainsi toutes les étapes qui aboutissent à l'évaluation de la disponibilité à savoir l'affectation des systèmes aux différentes missions, l'organisation de la maintenance programmée et non programmée et le soutien logistique.

III.2. Modélisation de l'affectation

Après la prévision de la demande en mission, il s'agit de proposer une modèle d'affectation des missions aux différents systèmes. L'affectation des missions aux systèmes dépend non seulement du secteur d'activité et de la complexité de chaque système mais également des exigences conjointes des constructeurs et des exploitants de systèmes.

Dans le domaine des unités de production, l'objectif est généralement de minimiser le temps d'attente du système de production pour maintenir la cadence de production nécessaire à la demande.
Dans le cas d'exploitation de systèmes complexes, l'exploitant s'intéressera également au maintien de sa cadence de production mais aussi à l'optimisation du temps d'attente de ses systèmes afin de limiter les indisponibilités simultanées qui sont dues à la maintenance programmée.

Dans ce paragraphe, nous allons dans un premier temps présenter des méthodes d'analyse du temps d'attente en se référant à la littérature portant sur les files d'attente. Dans un deuxième temps, nous présenterons les différentes méthodes permettant d'affecter une mission à un système. Dans un dernier temps, nous présenterons la synthèse de cette modélisation.

III.2.1. Rappel et définition : caractéristiques d'une file d'attente

La théorie des files d'attente est une théorie mathématique développée par Erlang[2], relevant du domaine des probabilités qui étudie les solutions optimales de gestion de files d'attente ou queues.
Une queue est nécessaire et se créera d'elle-même (si elle n'est pas anticipée), dans tous les cas où l'offre est inférieure à la demande.

Elle peut s'appliquer à différentes situations : gestion des aéronefs (atterrissage, décollage), attente des clients, stockage de programmes informatiques avant leur traitement, etc. Une file d'attente se crée pour chaque cas de **clients** désirant recevoir un **service**, auprès d'un producteur (Figure 25).

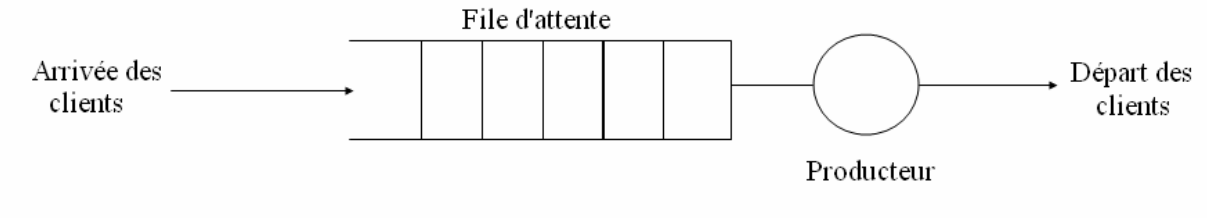


Figure 25. Description d'une file d'attente

Dans le domaine du transport aéronautique, nous décrirons l'arrivée des clients par l'arrivée des missions et le départ des clients par la réussite des missions. Le

[2] Erlang est un ingénieur qui a développé le domaine de recherche des files d'attente à partir de 1917. Ses travaux réalisés sur la gestion des réseaux téléphoniques de Copenhague entre 1909 – 1920, étudient notamment les systèmes d'arrivée dans une queue, les différentes priorités de chaque nouvel arrivant, ainsi que la modélisation statistique des temps d'exécution.

producteur sera décrit dans ce cadre par la réalisation des missions par les aéronefs.

La gestion d'une file d'attente est caractérisée par 3 indicateurs principaux :

λ = fréquence moyenne d'arrivée de clients.

$\frac{1}{\mu}$ = temps moyen de service.

A = $\frac{\lambda}{\mu}$ = traffic offert (nombre moyen d'arrivées pendant le temps moyen de service).

Dans la théorie de files d'attente, nous retrouvons dans la littérature 6 règles de gestion de files d'attente, à savoir :

- FIFO (First In First Out) ou FCFS (First Come First Served): le premier arrivé entre en service le premier.
- LIFO (Last In First Out) ou LCFS (Last Come First Served): le dernier arrivé entre en service le premier.
- SIRO (Service In Random Order): l'ordre de service est déterminé au hasard.
- GSD (General Service Discipline) : l'ordre général c'est-à-dire l'ordre d'entrée en service n'est pas précisé.
- A Priorité : L'utilisateur donne des priorités aux différents processus et ils sont activés en fonction de cette priorité.
- Processor sharing : Cette file d'attente regroupe un ensemble de processeurs dans lesquels chacun va être activé selon un temps partagé.

Ces règles de gestion de file d'attente sont théoriques et nécessitent une contextualisation dans le domaine étudié pour évaluer la disponibilité, ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.

III.2.2. Méthode de modélisation de l'affectation

Les règles présentées dans le paragraphe précédent peuvent intervenir pour étudier un scénario de files d'attente mais peuvent s'avérer insuffisantes pour évaluer la disponibilité.
De ce fait, nous avons recensé les règles de files d'attente dites « terrain » utilisées chez les exploitants de systèmes complexes et en particulier en aéronautique :

• Gestion de l'attente par les caractéristiques physique du système (capacité d'embarquement, autonomie,..) (1)
Cette règle est utilisée pour affecter des systèmes en fonction du besoin opérationnel de la mission. Le besoin opérationnel peut être lié aux caractéristiques techniques du système telles que l'autonomie en carburant, la capacité d'embarquement en équipage et matériels, etc.… Elle vise donc à définir des priorités d'affectation pour chaque système selon la nature de la mission à réaliser.

• Gestion de l'attente par le temps de fonctionnement (2).
Cette règle vise à faire fonctionner à tour de rôle chaque système pendant un temps de fonctionnement défini. Elle vise donc à établir des rotations d'utilisation permettant de planifier la maintenance en fonction de l'organisation logistique disponible.

• Gestion de l'attente par le temps de fonctionnement restant avant la maintenance (3). Cette règle consiste à affecter un système pour une mission en fonction du temps restant avant son entrée en maintenance. Dans le domaine aéronautique, nous l'appellerons : potentiel de vol. Les exploitants utilisent cette donnée pour affecter les appareils en fonction des durées de mission à réaliser.

• Gestion de l'attente par le taux de réalisation de mission (4).
La règle (4) de gestion de l'attente consiste à assigner un objectif de réalisation de mission à chaque système.

L'ensemble des règles que nous avons recensées et que nous allons utiliser dans notre étude s'insère dans un processus de modélisation de l'affectation représenté ci-dessous (Figure 26).

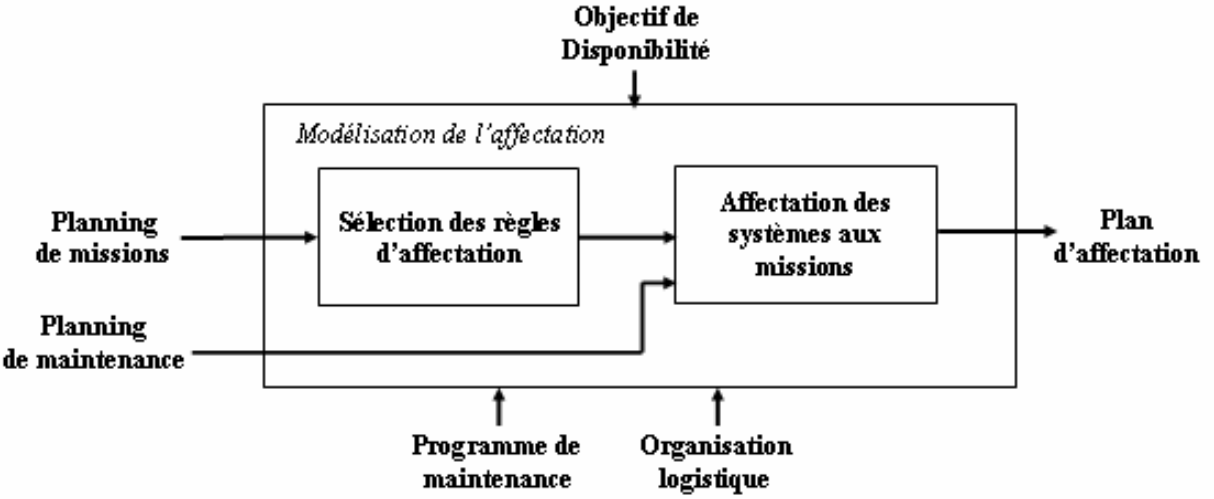


Figure 26. Processus de modélisation de l'affectation en lien avec le modèle de demande et de maintenance

Ces règles permettent une affectation initiale réalisée sur un horizon moyen terme et une réaffectation à court terme en fonction des perturbations pouvant se présenter au cours du temps (Figure 27). La Figure 27 représente 5 files d'attente représentant les séquences de Missions, d'Affectation, de Maintenance et d'Attente. La modélisation de l'affectation permet d'obtenir une affectation initiale (S_i, M_i).

Au cours de l'exploitation de système, il peut arriver qu'un système soit en dans un état de maintenance non programmée entrainant l'impossibilité de réaliser la mission qu'il lui a été affecté. Il sera alors nécessaire de réaffecter la mission à un système disponible. L'ensemble de ce procédé est représenté par les flèches noires. Le système S_1 initialement affecté à la mission M_i, se trouve en maintenance et ne peut donc pas réaliser la mission.

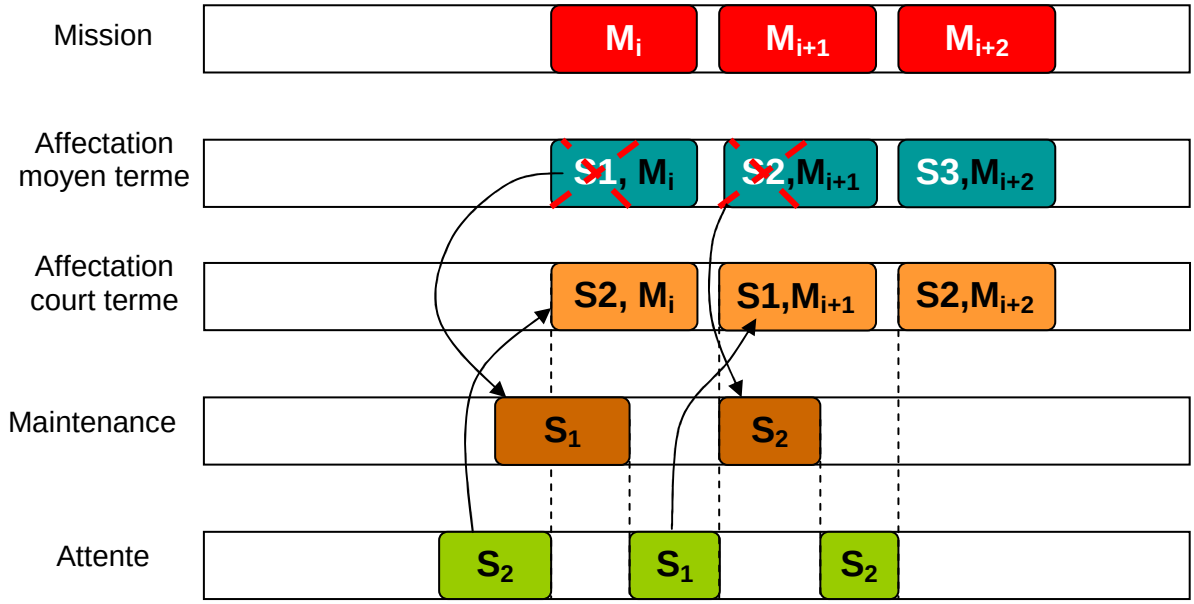


Figure 27. Principe de planification de l'affectation (moyen terme et court terme)

Le procédé consiste à affecter un système disponible en attente de mission, en l'occurrence S_2, pour être réaffecté à la mission M_i. Une fois que le système S_1 termine la maintenance, il retourne dans la file d'attente pour être réaffecté.

III.2.3. Synthèse

L'objectif était de présenter une méthode de modélisation de l'affectation. Cette modélisation peut être basée sur plusieurs règles de files d'attente qui peuvent être combinées. Le résultat de cette modélisation permet d'obtenir des scénarios

d’affectation proches du contexte opérationnel. La figure ci-dessous présente le processus d’affectation des systèmes aux missions (Figure 28).

Dans cette figure, 3 processus sont mis en évidence à savoir, le processus de **choix des règles d’affectation**, le **processus d’affectation moyen terme** et le **processus d’affectation court terme**.

Le **premier processus** vise à identifier la ou les règles d’affectation pertinentes.

Le **processus d’affectation moyen terme** consiste à exploiter les règles d’affectations identifiées en vue d’établir un plan d’affectation présenté sous la forme d’une matrice constituée des systèmes et des missions qui leur sont affectées.

Le **processus d’affectation court terme** consiste à réactualiser le plan d’affectation moyen terme en prenant en compte les perturbations et le planning de maintenance de la flotte de système.

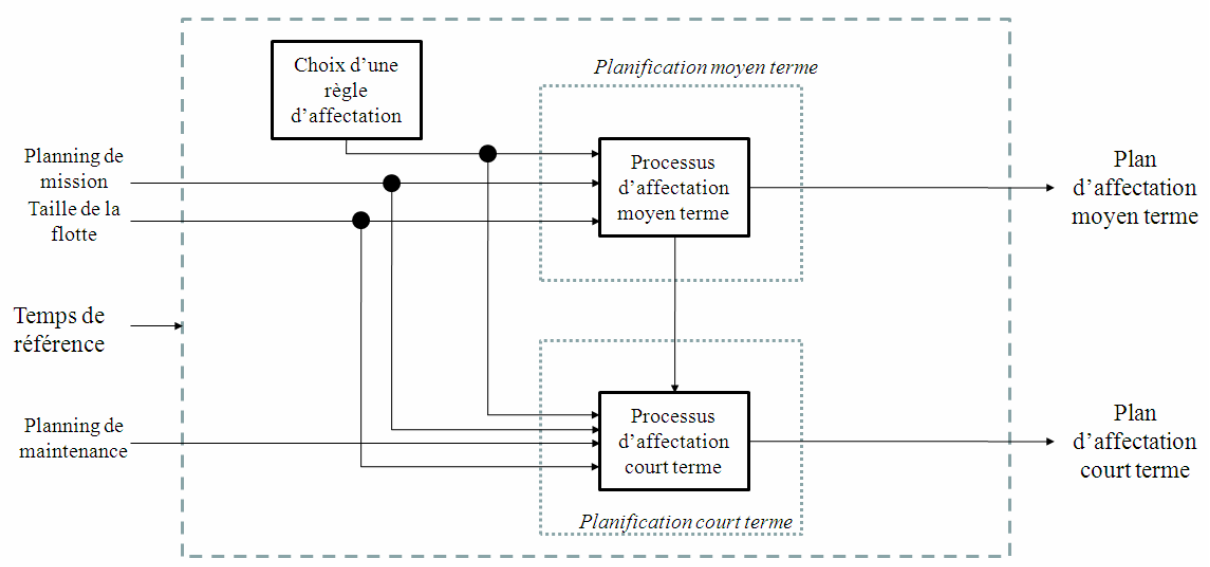


Figure 28. Processus d’affectation des systèmes aux missions

III.3. Modélisation de la maintenance

La modélisation de la maintenance est au centre de la méthode d’évaluation de la disponibilité que nous proposons dans cette thèse. En effet, la maintenance d’un système complexe impacte fortement la disponibilité d’un système et peut entrainer des pertes de productivité si celle-ci est gérée de manière inadaptée. De ce fait, il est nécessaire d’avoir une visibilité suffisamment étendue des opérations de maintenance à réaliser sur chaque système de sorte à évaluer l’organisation de l’exploitant dans un premier temps et à l’optimiser dans un deuxième temps.

L’objectif de ce paragraphe est de présenter une méthode de prévision des temps de maintenance réalisés sur les systèmes de l’exploitation. Cette prévision se base sur les résultats obtenus dans les étapes de modélisation précédentes, à savoir le plan de demande en missions issu de la modélisation de la demande et le plan d’affectation issu de la modélisation de l’affectation.
La modélisation de maintenance est principalement structurée autour du **processus de maintenance programmée**, du **processus de maintenance non programmée** et du **processus de support** (Figure 29).
Le processus de maintenance programmée est alimenté par les **échéances de maintenance** du système à maintenir qui sont définies par le constructeur. Il définit et génère à son tour une **prévision de la demande** en ressources nécessaires aux opérations de maintenance programmée.
Par ailleurs, le processus de maintenance non programmée se trouve lié au processus de maintenance programmée par l’intermédiaire des opérations de maintenance supplémentaire qui ne sont pas prévues par l’opérateur de maintenance mais également par l’apparition de défaillances dues à la fiabilité d’un équipement.
Ce processus est lié au processus de support par la formulation de **demande(s) urgente(s) en ressource, dans le cas de remplacement d’équipements**.
Les deux processus de maintenance sont alimentés par le processus de support, qui est chargé de fournir les ressources nécessaires au bon déroulement des opérations de maintenance.

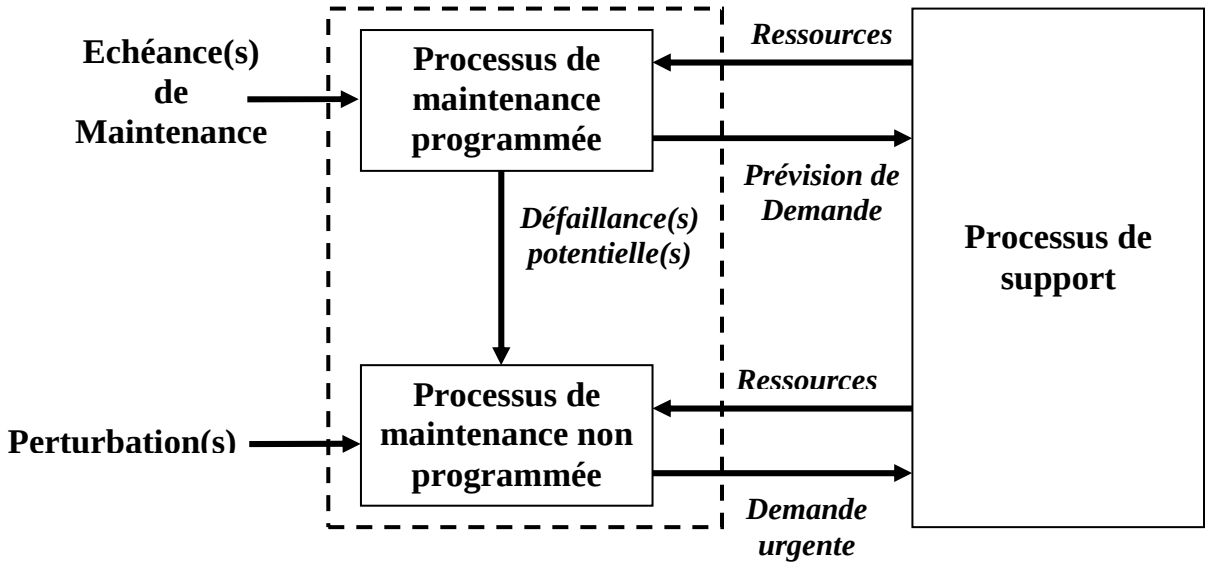


Figure 29. Lien entre le processus de maintenance programmée et le processus de maintenance non programmée

Nous allons modéliser le processus de maintenance avec dans le premier paragraphe la présentation du processus de modélisation de la maintenance programmée et dans le deuxième paragraphe, la présentation du processus de modélisation de la maintenance non programmée.

III.3.1. Modélisation de la maintenance programmée

III.3.1.1. Description du processus de maintenance programmée

L'organisation de la maintenance programmée consiste à fournir un **planning de maintenance programmée du système** (échéances et dates de réalisation) et à prévoir l'organisation logistique du client (Main d'Œuvre, Pièces de rechange, Outillage). Ce planning de maintenance proposé en sortie est obtenu à partir du **plan d'affectation** de chaque système définis dans les précédentes étapes de modélisation ainsi que par le biais du **Programme de maintenance** et de **l'organisation logistique** de l'exploitant.

Le processus de modélisation de la maintenance programmée est structuré en 2 processus (Figure 30) : la réalisation des missions et la planification des échéances de maintenance.

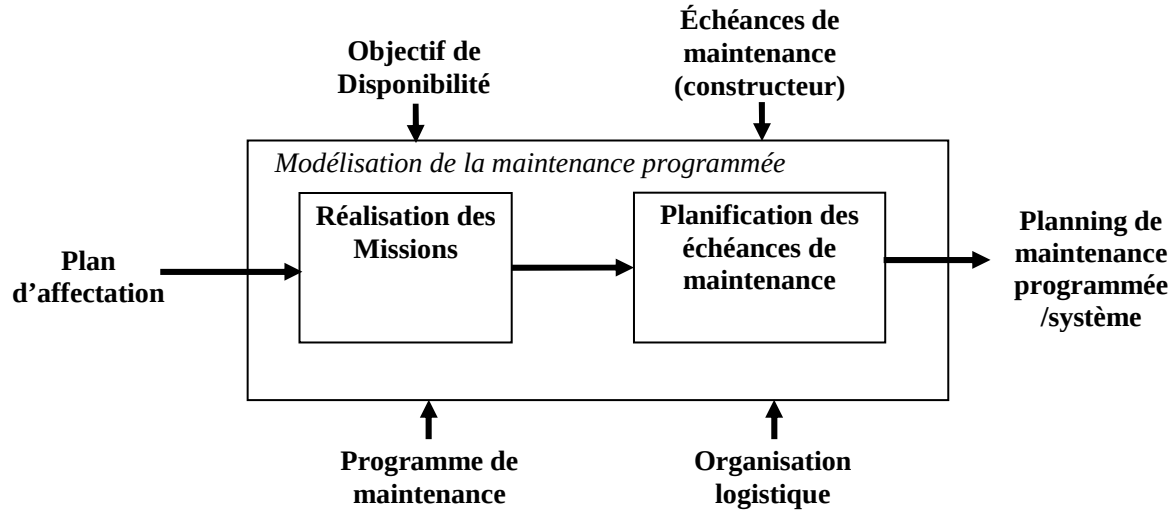


Figure 30. Processus de maintenance programmée

Le processus de réalisation de la mission est constitué de 3 étapes: préparation du système, fonctionnement[9] du système, conditionnement du système.

[9] Le terme « fonctionnement » désigne l'état dans lequel le système est en train de réaliser sa mission.

Préparation du système à son fonctionnement. Ce processus concerne l'ensemble des activités et moyens mis en place pour permettre à un système d'effectuer une mission. Dans ce cadre, nous pouvons retrouver un temps d'indisponibilité lié à la maintenance de routine qui est calculé selon la formule suivante (Equation. 5) :

$$UT_Servicing = \begin{pmatrix} worked_day * worked_week * duration_BSM \\ + \\ worked_day * worked_week * duration_ASM \end{pmatrix} \quad (Eq.\ 5)$$

UT_Servicing	Temps d'indisponibilité lié à la maintenance de routine
Worked_day	Jours travaillés
Worked_week	Semaines travaillées
duration_BSM	Durée d'une visite de routine avant mission
Duration_ASM	Durée d'une visite de routine après mission

Tableau 4. Définition des paramètres de l'équation 5

Fonctionnement du système. Ce processus consiste à recréer les conditions de fonctionnement du système en réalisant dans notre cas, un décompte des temps opérationnels du système : Temps de fonctionnement, Temps calendaires, Cycle d'utilisation,…. Ces temps sont utilisés dans le paragraphe suivant pour évaluer les temps de maintenance.

Conditionnement du système. Ce processus est défini par l'ensemble des opérations permettant le stockage du système jusqu'à une prochaine mission (dépose de certains équipements, vidange, etc…).

III.3.1.2. Evaluation des temps de maintenance programmée

Dans ce paragraphe, nous allons évaluer les temps de maintenance programmée représentés dans l'arbre de disponibilité présenté dans le chapitre II (Figure 3).
Pour ce faire, il est nécessaire de comptabiliser les temps opérationnels (Temps de fonctionnement, temps calendaire, etc..) permettant de prévoir les échéances de visites qui devront être réalisées sur un système.
Avant d'évaluer le nombre de visites de maintenance qui sont potentiellement réalisables par chacun des systèmes, nous avons exprimé ci-dessous les variables intervenant dans une échéance de visite de maintenance (Eq 6) :

$$\mathbf{Ech_Visite_i = f(Charge_nominale_i, Besoin_MO_i, Besoin_Pièces_i, Besoin_Outil_i, Tolérance_i)} \quad (Eq.\ 6)$$

Ech_Visite_i	Echéance de Visite de maintenance i
$Charge_nominale_i$	Charge nominale[3] de travail pour l'échéance de la visite i
$Besoin_MO_i$	Besoin en Main d'œuvre pour l'échéance i
$Besoin_Pièces_i$	Besoin en Pièces de rechange pour l'échéance i
$Besoin_Outil_i$	Besoin en Outils pour l'échéance i
$Tolérance_i$	Tolérance de l'échéance i

Tableau 5. Définition des paramètres de l'équation 6

En effet, cette relation met en évidence la charge nominale de la visite ainsi que les besoins exprimés en type de ressource à savoir : la main d'œuvre, les pièces de rechange, l'outillage et la marge tolérée par l'échéance de la visite.
Pour définir le temps moyen lié à la maintenance programmée, nous utiliserons la durée calendaire moyenne d'une échéance de visite ($durée_cal_Ech_{moy}$) qui dépend de la charge nominale, exprimée en durée et du besoin en Main d'Oeuvre moyen ($Besoin_Mo_{moy}$).

$$\mathbf{durée_cal_Ech_{moy}} = \frac{\mathbf{charge_nominale}}{\mathbf{Besoin_MO_{moy}}} \quad \text{(Eq. 7)}$$

A partir de l'équation (Eq. 7), nous exprimerons le temps moyen lié à la maintenance programmée par la formule suivante:

$$\mathbf{UT_SM} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathbf{TF}}{\mathbf{Ech_i}} * \mathbf{durée_Cal_moy_Ech_i} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\mathbf{TC}}{\mathbf{Ech_j}} * \mathbf{durée_Cal_moy_Ech_j} \quad \textbf{(Eq. 8)}$$

Où

UT_SM	Temps d'indisponibilité lié à la maintenance programmée
TF	Temps de Fonctionnement
Ech_i	Echéance suivant le temps de fonctionnement
$durée_Cal_moy_Ech_i$	Durée calendaire moyenne de l'échéance i
TC	Temps Calendaire
Ech_j	Echéance suivant le temps calendaire
$durée_Cal_moy_Ech_j$	Durée calendaire moyenne de l'échéance j

Tableau 6. Définition des paramètres de l'équation 8

[3] Nous définirons la charge nominale d'une échéance de maintenance comme le temps de réalisation des opérations de maintenance effectuées par un seul opérateur de maintenance. De plus, cette charge de travail nominale est estimée dans un contexte d'exploitation idéal (ressources infinies)

Ainsi, on élabore la somme des rapports entre les temps de fonctionnement et les échéances de visites multipliés par les durées calendaires des visites respectives [Djeridi et al.10].

L'équation 8 permet d'évaluer et de représenter le temps de maintenance programmée effectuée sur un système. Cette relation se base sur des durées d'inspection moyennées. Cette approche permet de réaliser une évaluation macroscopique des temps de maintenance sans prendre en compte l'ensemble des paramètres soumis à des incertitudes tels que l'absence d'une main d'œuvre ou d'outillage nécessaire ou l'absence de la bonne pièce à un moment donné.

Pour analyser ces paramètres (Main d'œuvre, Outillage, Pièces), nous allons utiliser l'approche de résolution Monte-Carlo. Nous présentons les paramètres pouvant influer sur la durée calendaire de l'échéance de maintenance i dans l'équation suivante (Equation. 9) :

$$\mathbf{durée_cal_Ech_i = f(durée_cal_moy_Ech_i, Dispo_MO_i, Dispo_Pièces_i, Dispo_Outil_i)}$$

(Eq. 9)

$durée_cal_Ech_i$	Durée calendaire de l'échéance de maintenance i
$durée_cal_moy_Ech_i$	Durée calendaire moyenne de l'échéance de la visite i
$Dispo_MO_i$	Disponibilité de la Main d'œuvre de l'échéance i
$Dispo_Pièces_i$	Disponibilité des Pièces de rechange de l'échéance i
$Dispo_Outil_i$	Disponibilité des Outils de l'échéance i

Tableau 7. Définition des paramètres de l'équation 9

Dans cette équation, nous mettons en évidence 3 paramètres pouvant être soumis à des incertitudes.

- **Dispo_MO (Disponibilité de la Main d'œuvre)** : Ce paramètre permet de quantifier à un instant donné la durée de mobilisation de la main d'œuvre. Pour cette évaluation nous utiliserons deux paramètres : la **charge en MO (**Charge_MO**)** nécessaire pour une échéance de visite et la **capacité de MO (**Cap_MO**)** autorisée par l'exploitation.

La capacité de la main d'œuvre se calcule à l'aide du nombre d'opérateurs de maintenance (nb_MO) disponibles chez l'exploitant et du nombre d'heures ouvrées par opérateur et par jour (nb_heures_ouvrées).

$$Cap_MO = nb_MO * nb_heures_ouvrées \quad \text{(Eq. 10)}$$

La charge en main d'œuvre se calcule à l'aide du nombre d'opérateurs de maintenance nécessaires (Besoin_MO) pour la visite pendant un intervalle de temps donné et du paramètre nb_heures_ouvrées.

$$Charge_MO = Besoin_MO * nb_heures_ouvrées \quad (Eq.\ 11)$$

Ces deux paramètres seront calculés pour chaque intervalle du temps de référence (k-(k-1)) pour chaque visite i. Nous appellerons Eval_MO le paramètre d'évaluation de la Main d'œuvre.

$$Eval_MO = Charge_MO / Cap_MO \quad (Eq.12)$$

Dans le cas où Eval_MO > 1 alors la charge en Main d'œuvre est supérieure à la capacité de l'exploitation entrainant donc un déficit de main d'œuvre. Nous introduirons à la suite le paramètre µ associé à l'état de disponibilité de la main d'œuvre.

$\mu \in [0,1]$: Disponibilité de la main d'œuvre.

$$\mu \rightarrow \begin{cases} 0 : Eval_MO > 1 \\ 1 : Eval_MO \leq 1 \end{cases}$$

Dans le cas où cette **condition n'est pas satisfaite (µ=0)**, Il est alors nécessaire d'établir une loi de probabilité permettant d'évaluer le temps de **remise à disposition de la main d'œuvre**.

$$\mathbf{Dispo_MO = (1 - \mu) * MO_delai \quad (Eq.\ 13)}$$

Où

µ	Paramètre binaire de disponibilité de la main d'œuvre définie par :1 : Main d'œuvre disponible ; 0 : Main d'œuvre indisponible
MO_delai	Délai de remise à disposition de la main d'œuvre

Tableau 8. Définition des paramètres de l'équation 13

Dans le cadre de notre étude, nous avons élaboré une loi de tirage triangulaire permettant de définir les valeurs (min, mode, max) par du retour d'expérience (Figure 31).

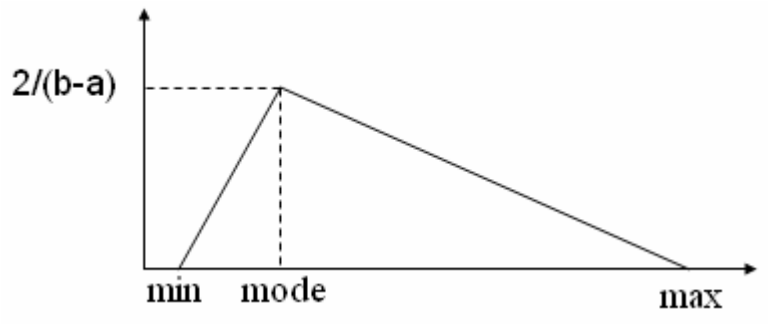


Figure 31. Description d'une loi triangulaire de paramètres T (min, mode, max)

L'utilisation d'une loi triangulaire permet de prendre en compte la variabilité des paramètres. Par exemple, chez les exploitants d'aéronefs le délai de mise à disposition d'une main d'œuvre est une valeur qui est définie mais qui est dépendante de l'organisation de chacun des exploitants.

• **Dispo_Pièces (Disponibilité des Pièces de Rechange)** : Ce paramètre permet d'évaluer la durée de mobilisation d'une pièce de rechange nécessaire au cours d'une opération de maintenance.

L'évaluation de ce paramètre peut se faire de deux façons, soit par **comparaison des pièces nécessaires et des pièces disponibles**. Soit en utilisant la **probabilité de non rupture de stock**. Nous présenterons dans cette partie, la première méthode qui est la plus fidèle à la réalité. La seconde méthode repose sur une approche pratique permettant de réaliser l'analyse en disposant de données approximatives. Cette méthode sera présentée en application (Chapitre VII).
L'évaluation des paramètres concernant la disponibilité des pièces de rechange par la comparaison est la méthode la plus contraignante des deux méthodes. Elle nécessite un inventaire précis et régulier des pièces de rechange stockées.
Pour ce faire, il est nécessaire d'intégrer l'ensemble des références d'un système $Pièces_Ref_j$ dans le stock. Dans chaque visite de maintenance, il sera identifié un besoin en pièces de rechange pouvant aller d'un simple remplacement en fonction de l'état jusqu'au remplacement systématique d'équipement. Nous désignerons donc le besoin d'une pièce de rechange j pour une visite i sur un intervalle du temps de référence par $Visite_i_PiècesRef_{j,\ k-(k-1)}$.

Par ailleurs, nous appellerons le stock de pièces de rechange situé chez l'exploitant à chaque instant du temps de référence par $SRef_{k-(k-1)},\ _j$. La comparaison peut-être réalisée entre les pièces nécessaires et les pièces disponibles en stock. Cette comparaison devra respecter la condition suivante :

$$Visite_i_PiècesRef_{j,\,k-(k-1)} \leq SRef_{j,\,k-(k-1)} \quad \text{(Eq. 14)}$$

Nous introduirons à la suite le paramètre σ associé à l'état de disponibilité d'une pièce.

$\sigma \in [0,1]$: Disponibilité de pièces de rechange.

$$\sigma \rightarrow \begin{cases} 0: Visite_i_PiècesRef_{j,\,k-(k-1)} > SRef_{j,\,k-(k-1)} \\ 1: Visite_i_PiècesRef_{j,\,k-(k-1)} \leq SRef_{j,\,k-(k-1)} \end{cases}$$

Dans le cas où **cette condition n'est pas satisfaite (σ = 0)**, il sera nécessaire d'évaluer le délai de remise à disposition Pièces_délai des pièces nécessaires à la réalisation de la maintenance.

Pour ce faire, nous effectuerons des tirages sur une loi de probabilité. Cette loi de probabilité peut être élaborée en fonction de l'historique des retards constatés par l'exploitant. Dans une grande partie des analyses élaborées, nous avons eu la connaissance de trois paramètres à savoir le délai minimum, le délai maximum et le délai mode.

Cette loi de probabilité peut-être modélisée par une loi triangulaire comme nous l'avons représenté dans l'estimation du délai de mise à disposition de la main d'œuvre (Figure 31).

Dans les deux méthodes d'analyse (**comparaison des pièces nécessaires et des pièces disponibles** et la **probabilité de non rupture de stock)** la prise en compte des délais associés à la disponibilité des pièces de rechange *Dispo_pièces* est analysée par la formule suivante :

$$Dispo_pièces = (1 - \sigma) * Pièces_délai \quad \text{(Eq.15)}$$

Où

Pièces_délai : Délai de remise à disposition d'une pièce dans le cas d'une rupture de stock.

• **Dispo_Outil (Disponibilité des Outils)** : L'évaluation de la durée de mobilisation d'un outillage peut rejoindre celle de la main d'œuvre.

En effet, dans chaque visite de maintenance, il sera identifié un besoin en outillage en fonction de l'opération de maintenance réalisée.
Nous désignerons le besoin d'un outillage j d'une échéance de visite i sur un intervalle du temps de référence par $Ech_Visite_i_Outillage_{j,\ k-(k-1)}$.
Le stock d'outillage situé chez l'exploitant à chaque intervalle du temps de référence sera désigné par $SOutil_{k-(k-1),\ j}$.
La comparaison est réalisée entre les outillages nécessaires et les outillages disponibles en stock. Cette comparaison devra respecter la condition suivante :

$$Ech_Visite_i_Outillage_{j,\ k-(k-1)} \leq SOutil_{k-(k-1),\ j} \quad \text{(Eq. 16)}$$

Nous introduirons à la suite le paramètre τ associé à l'état de disponibilité d'outillage.

$\tau \in [0,1]$: Disponibilité d'outillage.

$$\tau \rightarrow \begin{cases} 0: Ech_Visite_i_Outillage_{j,\ k-(k-1)} > SOutil_{k-(k-1),\ j} \\ 1: Ech_Visite_i_Outillage_{j,\ k-(k-1)} \leq SOutil_{k-(k-1),\ j} \end{cases}$$

Dans le cas où cette condition n'est pas satisfaite (τ=0), il est nécessaire d'évaluer le temps de remise à disposition Outil_délai. Il est analysé par la formule suivante (Eq. 17) :

$$Dispo_Outil = (1 - \tau) * Outil_délai \quad \text{(Eq.17)}$$

Où

Outil_délai : Délai de remise à disposition d'un outillage dans le cas d'une absence d'outil. Ce paramètre suit une loi triangulaire comme présenté dans le délai de mise à disposition de la main d'œuvre et des pièces (Figure 31).

L'ensemble de ces points permet de présenter la formule permettant d'évaluer le temps de maintenance programmée (UT_SM) (Eq. 18) :

$$UT_SM = \sum_{k=1}^{k=n} \sum_{i=0}^{i=TF/Ech_k} \left(\begin{array}{c} durée_cal_Ech_i \\ + \\ (1-\mu_i) * MO_Délai_i \\ + \\ (1-\sigma_i) * Pièces_Délai_i \\ + \\ (1-\tau_i) * Outil_Délai_i \end{array} \right) + \sum_{m=1}^{m=n} \sum_{j=0}^{j=TC/Ech_m} \left(\begin{array}{c} durée_cal_Ech_j \\ + \\ (1-\mu_j) * MO_Délai_j \\ + \\ (1-\sigma_j) * Pièces_Délai_j \\ + \\ (1-\tau_j) * Outil_Délai_j \end{array} \right)$$

(Eq.18)

Où

k : nombre d'échéances horaires

m : nombre d'échéances calendaires

TF : Temps de fonctionnement

TC : Temps calendaire

Ech : Périodicité de l'échéance

III.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée

III.3.2.1. Description du processus de maintenance non programmée

L'objectif de la modélisation de la maintenance non programmé consiste à quantifier le temps de maintenance liée à la maintenance non programmée. Cette évaluation est réalisée en élaborant des scénarios de panne potentiels permettant d'évaluer la disponibilité la plus défavorable.
L'organisation de ce type de maintenance est conditionnée par **la maintenance programmée**. En effet, plus la maintenance programmée sera faite correctement, moindre sera le risque de panne. De plus, l'organisation de la maintenance non programmée doit être suffisamment flexible pour qu'une **perturbation** n'altère pas le fonctionnement de l'exploitation.

Le processus de maintenance non programmée est déclenché par une **perturbation**. L'opérateur de maintenance va réaliser un **diagnostic** en vue de détecter la défaillance. Une fois détectée, l'opérateur va **réparer la pièce** ou **remplacer** celle–ci. Ensuite une série de **tests** sera appliquée sur le système pour finaliser le **processus de restauration** du système (Figure 32).

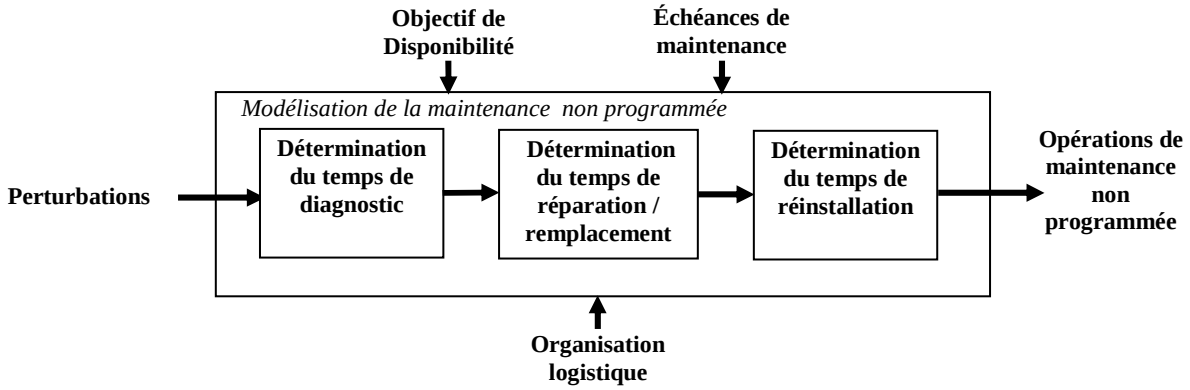


Figure 32. Processus de maintenance non programmée

III.3.2.2. Evaluation des temps de maintenance non programmée

Dans ce paragraphe, nous allons évaluer les temps de maintenance non programmée représentés dans l'arbre de disponibilité présenté au début du chapitre II (Figure 3).

Ce processus pose le problème de la gestion d'une perturbation. Pour le résoudre, nous avons proposé une matrice de perturbation comportant les types de perturbations ainsi que la probabilité d'apparition associée [Djeridi et al. 10] (Annexes). De cette matrice, nous évaluerons **le nombre de défaillances potentiel** en utilisant le temps de fonctionnement annuel (TF) et le temps moyen de bon fonctionnement (MTBF). Le temps de maintenance liée à la maintenance non programmée sera estimé en multipliant le nombre de défaillances théoriques par la durée moyenne d'une défaillance (Eq. 19).

$$\mathbf{UT_UM} = \frac{\mathbf{TF}}{\mathbf{MTBF}} * \mathbf{durée_cal_moy_def} \quad \mathbf{(Eq.19)}$$

UT_UM	Temps d'indisponibilité lié à la maintenance non programmée
TF	Temps de Fonctionnement
MTBF	Temps moyen entre deux défaillances
durée_cal_moy_def	Durée calendaire_moyenne d'une défaillance

Tableau 9. Définition des paramètres de l'équation 19

A ce stade, la formule (19) donne une évaluation moyenne mais ne permet pas de prendre en compte la variabilité des paramètres impactant la **fiabilité** d'une part et la **durée de restauration du système** après une défaillance d'autre part.

La fiabilité exprimée à travers le MTBF dans l'équation (19) est considérée comme constante. Nous avons retenu cette hypothèse dans un but de simplification des calculs. En réalité, elle évolue en fonction de nombreux paramètres tels que : le respect des échéances de maintenance programmée, l'environnement d'utilisation, le profil de mission, etc.

Concernant **la durée de restauration du système**, nous prendrons en compte l'incertitude liée à ces paramètres en ayant recours à la modélisation Monte-Carlo. De ce fait, nous exprimerons la durée moyenne d'immobilisation due à une défaillance par la relation suivante (Eq. 20) :

$$\text{durée_cal_def} = f(\text{Tps_diagnostic}, \text{Tps_réparation}) \quad \text{(Eq. 20)}$$

durée_cal_def	Durée calendaire d'une défaillance
Tps_diagnostic	Temps de diagnostic
Tps_réparation	Temps de réparation

Tableau 10. Définition des paramètres de l'équation 20

Dans cette relation, 2 paramètres sont à déterminer ; à savoir : le temps de diagnostic et le temps de réparation. Ces paramètres seront évalués en prenant en compte la gestion des ressources sous-jacentes (main d'œuvre, pièces de rechange et outillage).

- Temps de diagnostic

Le diagnostic permet entre autres de déclencher ou non, en fonction de la criticité des éléments défaillants ou défectueux, les opérations de maintenance nécessaires pour remettre le système en état de fonctionnement.
Dans ce sens, le diagnostic d'une défaillance peut être défini comme l'ensemble des activités permettant d'identifier et de localiser au plus vite la défaillance et de déclencher les opérations de maintenance nécessaires [Lefebvre 09].
L'activité de diagnostic pose de nombreux problèmes pour les constructeurs de systèmes. En effet, le temps de diagnostic (**Tps_diagnostic**) d'une défaillance peut présenter deux problèmes majeurs. Le premier problème concerne la **variabilité** des temps de diagnostic qui sera fonction de l'organisation du client et particulièrement de l'expertise que possèdera le client pour élaborer un diagnostic. L'autre problème concerne la capitalisation des **temps de diagnostic qui peut être insuffisante**.

Pour l'estimation de ces temps, nous avons défini une loi de distribution basée sur les données dont nous disposons chez le constructeur pour lequel nous avons entrepris cette étude. Dans cette optique, nous pouvons choisir de définir une loi

Uniforme ou Triangulaire (figure 31) sur laquelle nous avons réalisé des tirages aléatoires.

- Temps de réparation

Le temps de réparation est évalué dans le cadre de cette étude en utilisant la formule suivante (Eq. 21) :

$$\mathbf{Tps_réparation = f(Tps_échange_moy_{Eq_défaillant})} \quad \text{(Eq. 21)}$$

Tps_réparation	Temps de réparation ou de remplacement des équipements.
$Tps_échange_moy_{Eq_défaillant}$	Temps d'échange moyen de l'équipement défaillant

Tableau 11. Définition des paramètres de l'équation 21

L'équipement défaillant (Eq_défaillant) est identifié par l'étude de diagnostic réalisée au dessus. L'identification de l'équipement défaillant permet d'évaluer **le temps d'échange moyen (**Tps_échange_moy**)** qui est défini avec un effectif nécessaire. Ce temps d'échange moyen dépend de la durée nominale d'un échange qui est estimé pour chaque équipement pendant le stade de développement du système. Ce temps d'échange moyen dépend également de l'organisation de la logistique comprenant la disponibilité des pièces de rechange, des outils nécessaires et de la main d'œuvre. Ce temps sera exprimé à travers l'équation suivante (Eq. 22) :

$$\mathbf{Tps_échange_moy_{Eq_defaillant} = f(durée_cal, Dispo_MO, Dispo_Pièces, Dispo_Outil)}$$

(Eq. 22)

Durée_cal	Durée calendaire lié au temps d'échange de l'équipement
Dispo_MO	Disponibilité de la main d'œuvre
Dispo_Pièces	Disponibilité des pièces de rechange nécessaires
Dispo_Outil	Disponibilité de l'outillage

Tableau 12. Définition des paramètres de l'équation 22

Ces paramètres seront estimés similairement aux paramètres estimés dans le cadre de la maintenance programmée présentée dans le paragraphe précédent.

Nous présentons ci-dessous le temps de maintenance non programmée (UT_UM) (Eq. 23) :

$$UT_UM = \sum_{j=1}^{j=TF/MTBF} \left(\begin{array}{c} Tps_diagnostic_j \\ + \\ Durée_cal_j \\ + \\ (1-\delta_j)*MO_délai_j \\ + \\ (1-\varepsilon_j)*Pièces_délai_j \\ + \\ (1-\zeta_j)*Outil_délai_j \end{array} \right) \quad \text{(Eq. 23)}$$

j : nombre de pannes potentielles

TF : Temps de fonctionnement

MTBF : Temps de bon fonctionnement moyen

III.4. Evaluation de la disponibilité

Dans cette étape, l'objectif est dans un premier temps de distinguer la notion d'indicateur de disponibilité et d'exigence de disponibilité et dans un deuxième temps de présenter la définition d'indicateur de disponibilité et dans un dernier temps, l'évaluation de ces indicateurs.

Dans ce contexte, nous présentons dans la figure ci-dessous, une vue simplifiée de l'analyse de l'exploitation (Figure 33). Dans ce processus, l'analyse de l'exploitation est déployée pour répondre à un besoin qui est ici exprimé par une exigence en disponibilité. Au cours de l'exploitation d'un système, l'exploitant va ainsi mesurer la performance de son organisation qui est ici exprimée par l'indicateur de disponibilité qui sera comparé à la performance exigée pour optimiser l'organisation de la maintenance.

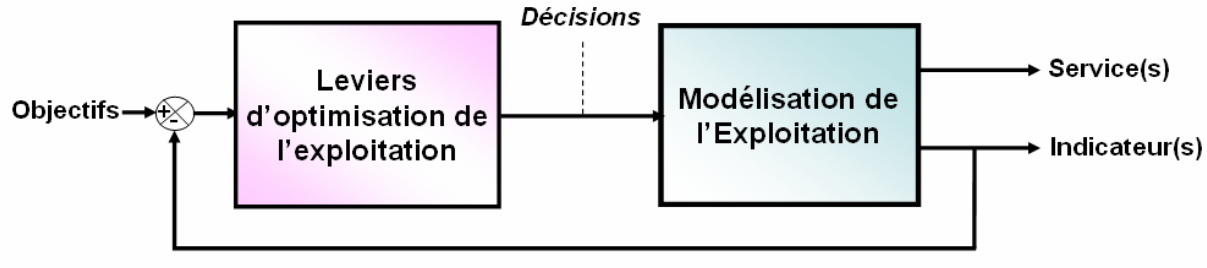


Figure 33. Analyse de l'exploitation

Un indicateur est une grandeur qui fournit une information sur une variable ou sur un système, afin d'aider un exploitant dans la gestion de sa flotte [Girardin et al., 00].

Le deuxième objectif de cette section est de proposer une méthode permettant de définir la notion d'indicateur de disponibilité. Dans le cas de notre étude, nous adopterons l'approche inductive pour définir les indicateurs de suivi de la disponibilité. Nous suivrons les cinq étapes suivantes:

1. **Définition des objectifs du système (mission)**
2. **Définition des objectifs de l'organisation**
3. **Proposition des indicateurs**
4. **Détermination des paramètres influents**
5. **Validation**

1. Définition des objectifs du système (mission)

Cette étape consiste à identifier les objectifs en termes de missions de l'exploitation. Elle permet de définir les types de mission que l'exploitant doit réaliser, les contraintes d'ordre environnemental, etc...

2. Définition des objectifs de l'organisation

Contrairement l'étape précédente, celle-ci vise à analyser les objectifs organisationnelles et les contraintes opérationnelles qui peuvent être relatives à la fourniture des pièces de rechange et des consommables.

3. Proposition des indicateurs

La proposition d'indicateurs est directement liée aux objectifs attendus de l'exploitant. Ces indicateurs peuvent être à finalité technique en vue de contrôler des performances du système comme la qualité ou la disponibilité d'un équipement précis. Ces indicateurs peuvent également être à finalité organisationnelle (par exemple : le nombre de MO disponible à un instant donné).

4. Détermination des paramètres influents

Les paramètres influents peuvent être déterminés par une analyse de type « cause à effet » ou « diagramme d'Ishikawa ». Ces paramètres sont identifiés en fonction de leur pertinence par rapport aux indicateurs proposés.

5. Validation

Cette dernière étape consiste à valider ces indicateurs, leur adéquation par rapport aux objectifs de l'exploitation et les moyens mis en place pour mesurer cet indicateur.

Le dernier objectif de ce paragraphe est de présenter la méthode d'évaluation de l'indicateur. Cette évaluation est décrite à travers la Figure 34. Dans la Figure 34, la demande opérationnelle est liée au planning de missions qui est issu de la modélisation de la demande. Le modèle d'état du système consiste à caractériser l'ensemble des indisponibilités pouvant interrompre le fonctionnement d'un système. Les indisponibilités ici comptabilisées concernent la maintenance programmée, qui inclut la maintenance de routine, et la maintenance non programmée. Enfin, le dernier chronogramme concerne la disponibilité réalisable évaluée sur chaque instant qui est explicitée ci-après.

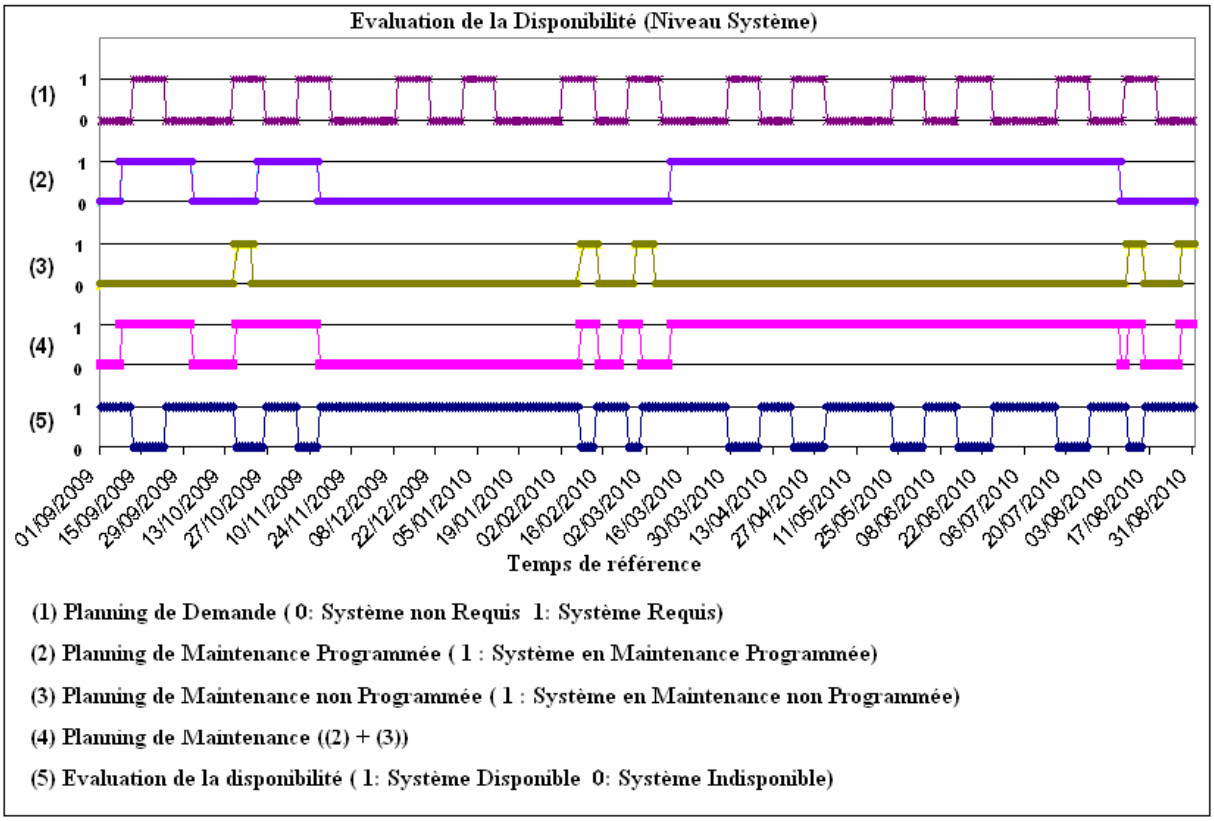


Figure 34. Evaluation de la disponibilité (Niveau système)

Pour présenter la démarche, nous évaluerons la disponibilité réalisable **DR** pour chaque instant où le système est engagé. De même, pour simplifier la démonstration, nous considérons la disponibilité réalisable instantanée, DR_i comme une valeur binaire définie ci-dessous.

où

$$\mathbf{DR_i} = \begin{matrix} \mathbf{0\,(\%)} \\ \mathbf{100\,(\%)} \end{matrix} \qquad \mathbf{(Eq.\ 24)}$$

$$\mathbf{DR_i = 100\,\%\ \ si\ \ UT_SM_i \bigcap UT_UM_i = 0} \qquad \mathbf{(Eq.\ 25)}$$

DR_i	Disponibilité réalisable instantanée
UT_SM_i	Temps d'indisponibilité lié à la maintenance programmée sur un instant i
UT_UM_i	Temps d'indisponibilité lié à la maintenance non programmée sur un instant i

Tableau 13. Définition des paramètres de l'équation 25

A partir de l'équation (25), il est alors possible d'établir une moyenne des disponibilités instantanées sur le temps de référence (Eq. 26):

$$\mathbf{< DR > = \ TRef^{-1} \sum_{i=1}^{range_max} DR_i} \qquad \mathbf{(Eq.26)}$$

< DR >	Disponibilité réalisable moyenne
DR_i	Disponibilité réalisable instantanée
TRef	Temps de référence
range_max	Plage de référence

Tableau 14. Définition des paramètres de l'équation 26

L'évaluation de la disponibilité effectuée ci-dessus, concerne le niveau système. Nous présentons ci-après, l'évaluation de la disponibilité d'un ensemble de systèmes. L'évaluation de la disponibilité réalisable d'une flotte consiste à agréger les chronogrammes de la Figure 34, qui seront établis pour chaque système, un chronogramme qui sera image de la disponibilité (Figure 35) de l'ensemble des systèmes.

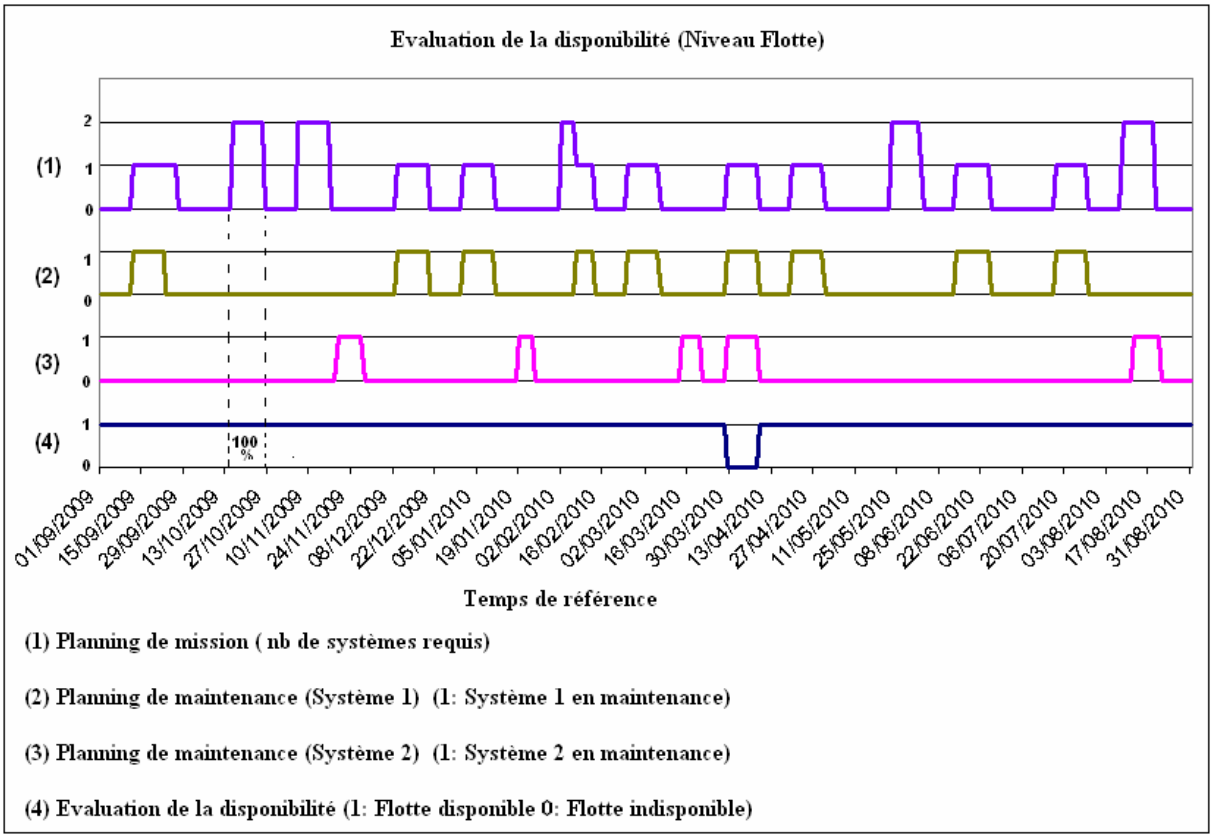


Figure 35. Evaluation de la disponibilité d'une flotte de systèmes

L'évaluation de la disponibilité de la flotte consistera à établir l'intersection sur chaque instant du temps de référence. La disponibilité réalisable instantanée de la flotte, $\mathbf{DR_flotte_i}$ sera formulée selon l'expression suivante (Eq. 27) :

$$\mathbf{DR_flotte_i} = \frac{\sum_{j=1}^{nb_S} \left(\mathbf{DR_S_{ij}}\right)}{\mathbf{nb_S_i}} \qquad \mathbf{(Eq.\ 27)}$$

DR_flotte_i	Disponibilité réalisable instantanée d'une flotte de systèmes
nb_S_i	Nombre de systèmes requis sur un instant i du temps de référence
DR_S_{ij}	Disponibilité réalisable instantanée de chaque système j sur un instant de référence i

Tableau 15. Définition des paramètres de l'équation 27

A partir de l'équation (27), il est alors possible d'établir une moyenne sur le temps de référence des disponibilités instantanées :

$$< \mathbf{DR_Flotte} >= \mathbf{TRef}^{-1} \bullet \sum_{i=1}^{i=Range_max} \frac{\sum_{j=1}^{nb_S} (DR_S_{ij})}{nb_S_i} \qquad (\mathbf{Eq.\ 28})$$

Cette représentation permet de superposer les données mesurées sur le terrain et d'ajuster notre modélisation. Dans cette section, nous avons présenté la méthode de modélisation de l'exploitation permettant d'évaluer la disponibilité.

De plus, deux autres indicateurs seront nécessaires pour évaluer la performance de la gestion de la flotte. Ces indicateurs représentent le taux de réussite de mission ainsi que le taux de redondance.

Le taux de réussite de mission permet de mesurer le taux de service de la flotte. Il caractérise ainsi le principal indicateur pour l'exploitant de la flotte. Cet indicateur sera mesuré pour chaque mission planifiée et ce sur le temps de référence (Eq. 29):

$$< \text{Réussite_mission} >= \frac{\text{Missions_réussies}}{\text{Missions_planifiées}} \quad \text{(Eq. 29)}$$

Le taux de redondance permet de mesurer la capacité à mobiliser des ressources (nb_S) de l'exploitation. Il permet ainsi d'identifier les excès de charge et de mieux ajuster la mobilisation des systèmes (Eq. 30):

$$< \mathbf{Taux_redondance} >= \mathbf{TRef}^{-1} \bullet \sum_{i=1}^{i=Range_max} \frac{nb_S}{\sum_{j=1}^{nb_S} (DR_S_{ij})} \qquad \mathbf{(Eq.\ 30)}$$

En conclusion, pour évaluer la performance en disponibilité, nous utiliserons les principaux indicateurs:

- La disponibilité[4] (Eq. 26),
- Le taux de réussite de mission (Eq. 29),
- Le taux de redondance (Eq. 30).

[4] Dans cette section, nous avons présenté la disponibilité réalisable. Cependant le calcul peut être appliqué à la disponibilité opérationnelle à condition d'inclure les paramètres d'indisponibilité dans la prise en compte de la disponibilité.

IV. BILAN DE LA MODELISATION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode permettant d'évaluer la disponibilité en suivant les 4 étapes présentées dans la Figure 18. Nous présentons dans la figure ci-dessous une synthèse de ces 4 étapes : modélisation de la demande, modélisation de l'affectation, modélisation de la maintenance et de l'évaluation de la disponibilité. Ces parties sont représentées dans ce cadre en vue d'évaluer la disponibilité (Figure 36).

Nous représentons également dans cette figure le séquencement global du traitement des données permettant de suivre la méthode d'évaluation de la disponibilité. En effet, le séquencement du traitement des données commence par l'identification du **modèle de demande** (**Déterministe** ou **Stochastique**) qui sera la **première étape**.

En **deuxième étape**, il s'agira de choisir ou d'identifier un **modèle d'affectation** comme ce que l'on a représenté dans cette figure. A la suite de ces deux premières étapes, un **profil de mission** avec des horaires de missions sera défini pour chaque système.
La **troisième étape** consiste à partir de **chaque de profil de mission** associé à chaque système d'établir une prévision des opérations de maintenance sur un horizon défini. Cette prévision des opérations de maintenance permettra de proposer un planning de maintenance prévisionnel pour chaque système que l'on appellera le **modèle de maintenance programmée**.
L'agrégation de ces modèles de maintenance programmée permettra de réaliser le planning de maintenance programmée global de la flotte de systèmes qui sera le **modèle de maintenance programmée de la flotte**.

La **quatrième étape** qui consiste à **modéliser la maintenance non programmée** utilise chaque profil de mission et chaque planning de maintenance prévisionnel des appareils pour réaliser un planning prévisionnel de maintenance non programmée que nous appellerons le **modèle de maintenance non programmée**. A l'image de l'étape précédente, l'agrégation de ces modèles de maintenance non programmée permettra de réaliser le planning de maintenance non programmée global de la flotte de systèmes qui sera le **modèle de maintenance non programmée de la flotte**.

Dans ces dernières étapes, nous avons considéré que le traitement des données logistiques est inclus dans les étapes de modélisation respectives (maintenance programmée et non programmée). Enfin, l'ensemble de ces modèles établis dans chaque étape de traitement contribue à évaluer la **disponibilité opérationnelle**.

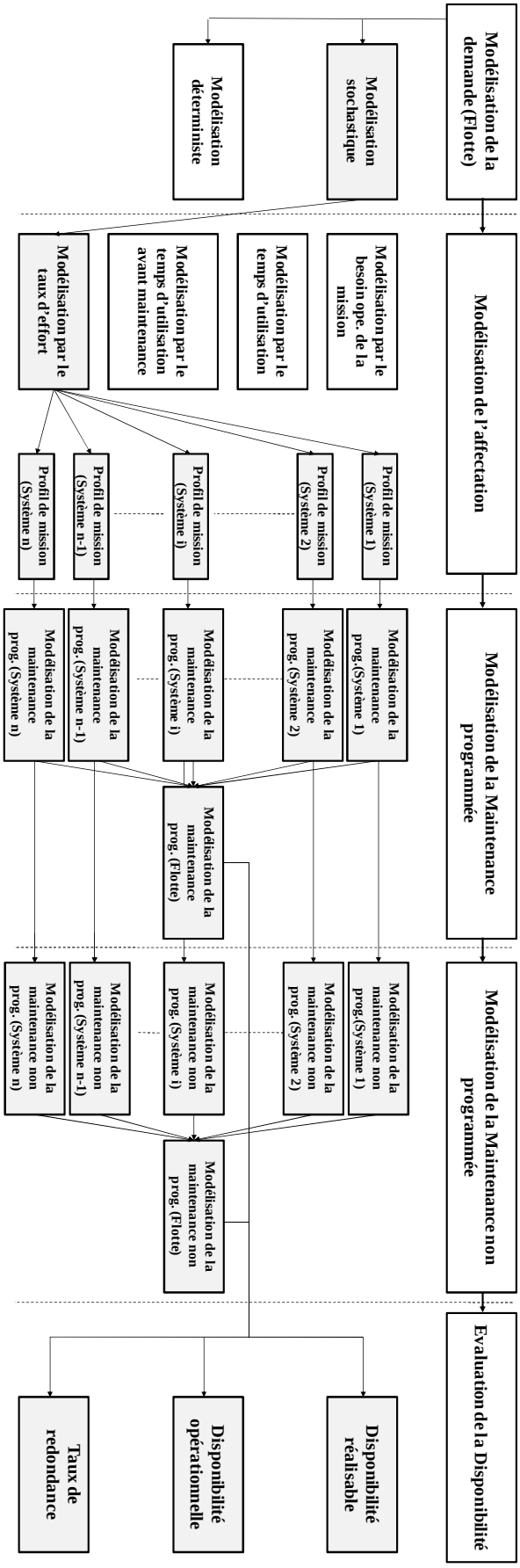


Figure 36. Processus d'évaluation de la disponibilité

CHAPITRE VI :

Proposition d'une méthode de réordonnancement proactif d'un programme de maintenance

Résumé

Ce chapitre a pour objectif de proposer une méthode permettant de réordonnancer un programme de maintenance de manière proactive. Nous proposons dans la première partie de ce chapitre un processus d'analyse structuré en quatre phases : l'évaluation des performances, la sélection des heuristiques, la proposition du programme de maintenance et le déploiement de ce programme de maintenance.
Cette méthode repose en partie sur un ensemble d'heuristiques de réordonnancement que nous proposons dans la seconde partie de ce chapitre. Partant d'un planning de maintenance de référence, cette méthode a pour objectif d'effectuer une sélection et une application d'une ou de plusieurs heuristiques permettant de proposer des scénarios de planning de maintenance en adéquation avec les caractéristiques opérationnelles de l'exploitant (demande, logistique,..).

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE VI : PROPOSITION D'UNE METHODE DE REORDONNANCEMENT PROACTIVE D'UN PROGRAMME DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME COMPLEXE

I. INTRODUCTION : CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 129
II. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE REORDONNANCEMENT PROACTIF DE MAINTENANCE 131
II.1. Descriptif des étapes de la méthode 132
II.2. Sélection des heuristiques d'ordonnancement 134
III. PROPOSITION DES HEURISTIQUES DE REORDONNANCEMENT DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 136
III.1. Présentation des heuristiques de réordonnancement 137
III.1.1. Notations 137
III.1.2. Les heuristiques de réordonnancement 139
III.2. Heuristique de réordonnancement par décalage 140
III.2.1. Présentation générale de l'heuristique 140
III.2.2. Description détaillée de l'heuristique 141
III.2.2.1. Sélection des tâches potentielles 141
III.2.2.2. Décalage des tâches de maintenance sélectionnées 143
III.2.2.3. Evaluation des performances 145
III.2.3. Synthèse 145
III.3. Heuristique de réordonnancement par agrégation 146
III.3.1. Présentation générale de l'heuristique 146
III.3.2. Description détaillée de l'heuristique 146
III.3.2.1. Identification des temps non requis 147
III.3.2.2. Agrégation des tâches de maintenance 147
III.3.2.2.1. Processus d'agrégation suivant le temps d'immobilisation 147
III.3.2.2.2. Processus d'agrégation suivant le zonage du système 150
III.3.2.3. Evaluation des performances 155
III.3.3. Synthèse 155
III.4. Heuristique de réordonnancement par désagrégation 156
III.4.1. Présentation générale de l'heuristique 156
III.4.2. Présentation détaillée de l'heuristique 156
III.4.2.1. Sélection des visites candidates 157
III.4.2.2. Identification des temps non requis 157
III.4.2.3. Désagrégation des visites de maintenance 157
III.4.2.3.1. Réordonnancement suivant le temps d'immobilisation 157
III.4.2.3.2. Réordonnancement suivant le zonage du système 159
III.4.2.4. Evaluation des performances 161
III.4.3. Synthèse 161
IV. BILAN DE LA MODELISATION 162

Chapitre VI : Proposition d'une méthode de réordonnancement proactive d'un programme de maintenance

« L'organisation est une machine à maximiser ses forces humaines ».

Peter Ferdinand DRUCKER[10]

I. INTRODUCTION : CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

Une des préoccupations majeures du monde industriel est d'avoir une exploitation performante permettant de garantir au mieux la qualité des missions réalisées, le maintien des délais demandés et la minimisation des coûts d'exploitation. Toutefois, aujourd'hui la production est souvent ordonnancée en considérant que les systèmes sont disponibles à tout moment pour exécuter des missions sur un horizon planifié.

Dans ces conditions, la détermination de la demande prévisionnelle de la production, d'une politique de maintenance des systèmes, de méthode d'ordonnancement des opérations de maintenance et d'affectation des produits aux machines est un enjeu pour l'optimisation de l'exploitation d'une flotte de systèmes.

Dans ce chapitre, nous traitons un aspect particulier de cette problématique qui consiste à organiser efficacement un planning de maintenance de sorte à pouvoir réduire les temps d'arrêts des systèmes et donc les périodes de non productivité.

Dans ce contexte, la planification de la maintenance de ces systèmes est une activité qui présente un enjeu pour les grandes organisations. Cette activité se trouve au centre d'une organisation multi acteurs, présentée dans [Djeridi et al., 2009] constituée de façon générique d'un constructeur de système, d'un exploitant (client) et d'un prestataire de maintenance (Figure 5). Par ailleurs, l'émergence des contraintes opérationnelles des flottes de systèmes complexes

[10] Théoricien américain du management né le 19 novembre 1909 à Vienne en Autriche, mort le 11 novembre 2005 à Claremont en Californie aux États-Unis. Il est à l'origine de nombreux concepts utilisés dans le monde de l'entreprise.

et la demande croissante de performance exigée par le client ont conduit les industriels à développer des gammes de services permettant de proposer des offres de services en disponibilité et par là-même de proposer des plannings de maintenance « sur mesure » alignés sur l'activité du client.

L'optimisation de la maintenance s'appuie sur une planification des activités. En effet, elle vise à organiser au mieux l'activité de maintenance, en liaison avec les prévisions de travaux à effectuer (actions de maintenance périodiques, maintenance préventive suite à pronostic ou réparation suite à un diagnostic de défaillance) et avec la logistique de soutien (approvisionnements, stocks, échanges de pièces, activité de l'atelier, etc.).
Cependant, les systèmes peuvent tomber en panne, être en visite périodique ou bien en réparation. Malgré cela, bien souvent le planning des missions est élaboré indépendamment du planning de maintenance programmée. Il arrive qu'il y ait antagonisme entre les deux plannings et par conséquent un manque de coordination entre les équipes de maintenance et de production, ce qui nuit au fonctionnement de la flotte (Figure 37).

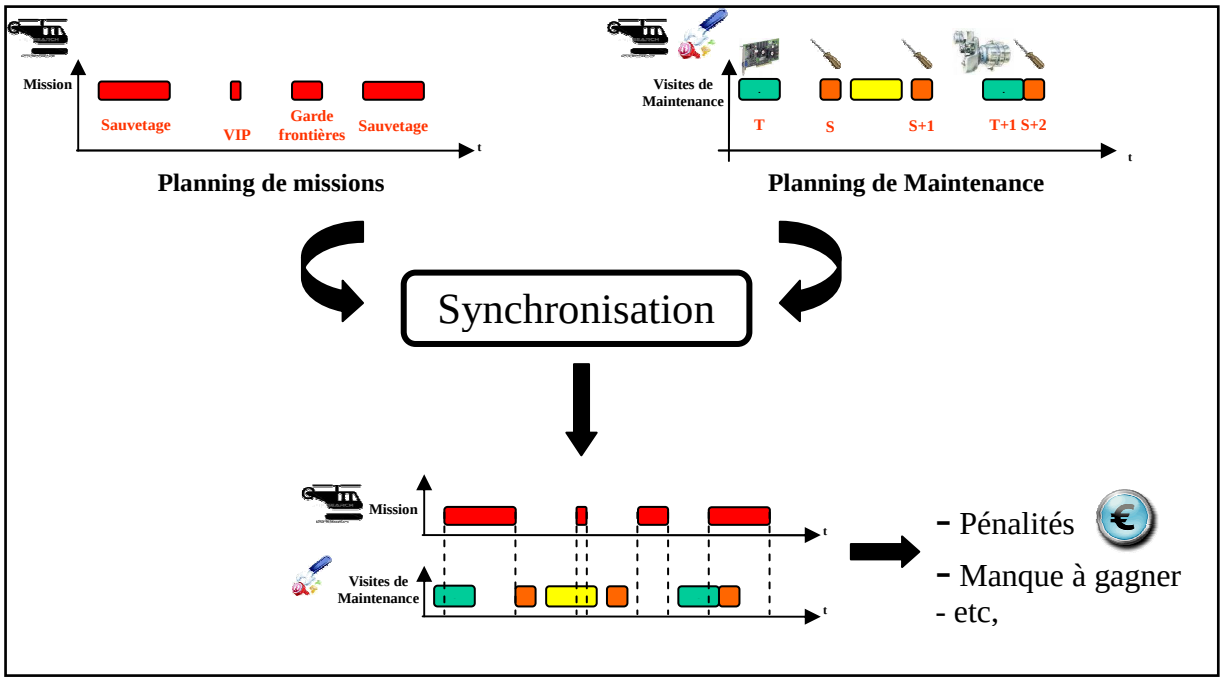


Figure 37. Problème lié à l'antagonisme du planning de missions et du planning de maintenance

La gestion de la maintenance d'une flotte est complexe dans l'exploitation d'un système industriel. Elle met en jeu d'une part, l'aspect complexité du système, mis en évidence par l'importante quantité de sous-systèmes, de contraintes, de ressources nécessaires et d'autre part, la collaboration de plusieurs organisations différentes mettant en évidence la gestion de l'ensemble des flux (consommables, rechanges, outillages, documentation,..) et des flux

d'informations (expertise, certification des décisions prises, surveillances de l'état des stocks, retour d'expérience,…) nécessaires au soutien du système industriel.

Face à ce constat lié à l'**antagonisme entre planning de missions et planning de maintenance**, nous proposons les 2 leviers d'amélioration suivants :

- **Heuristiques d'ordonnancement.** L'usage d'heuristiques de réordonnancement permettrait de proposer une organisation des activités de maintenance efficace pouvant faire face à une multitude de perturbations.
- **Soutien logistique flexible**. Un planning de maintenance « sur mesure » doit pouvoir reposer sur un soutien logistique flexible permettant d'ajuster l'organisation de maintenance (Main d'œuvre, Pièces de rechange, Outillage,..) en fonction de la prévision de la demande ou des perturbations pouvant avoir lieu.

Nous proposons une méthode de modélisation permettant d'actionner ces leviers d'amélioration qui permet de résoudre le problème de planification précédemment cité et de proposer des pistes pour l'aide à la prise de décision d'un exploitant.

Ce chapitre sera articulé en quatre parties distinctes. Dans un premier temps, nous présenterons la démarche méthodologique permettant d'optimiser l'organisation de la maintenance. Dans un deuxième temps, nous présenterons successivement les heuristiques de réordonnancement qui formeront l'étape principale de la méthode d'optimisation de la disponibilité. Dans un troisième temps, nous établirons un bilan de la démarche dans lequel nous présenterons des éléments de validation de la méthode.

II. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE REORDONNANCEMENT PROACTIF DE MAINTENANCE

Dans le domaine de la gestion de production, l'ordonnancement est une discipline qui a fait l'objet de nombreux travaux permettant d'aider et de guider le choix des décideurs dans la planification des activités de production. Cependant, l'ordonnancement de la production appliqué au secteur du transport aérien où le concept de « produit » se réfère à un service ou une mission, se montre nécessairement corrélé à l'ordonnancement des activités de maintenance. Ces activités sont plus complexes à appréhender sachant que la maintenance est une activité constituée de contraintes qui lui sont propres.

L'objet de ce paragraphe consiste à présenter l'approche de réordonnancement proactif permettant de proposer des configurations optimisées du programme de maintenance. Cette approche devra respecter les objectifs suivants :

- Anticiper les opérations de maintenance non prévues.
- Intervenir sur le réordonnancement de différents niveaux : total, partiel et local.
- Exploiter des heuristiques de réordonnancement classique (Figure 11).
- Utiliser le modèle d'exploitation comprenant un modèle de demande, d'affectation, maintenance,..) présenté dans la Figure 18.

Cette approche de réordonnancement proactive suit 4 phases distinctes : **l'évaluation des performances**, **la sélection des heuristiques d'ordonnancement**, **la proposition d'un programme de maintenance** et **la mise en place du programme de maintenance chez le client** (Figure 38).

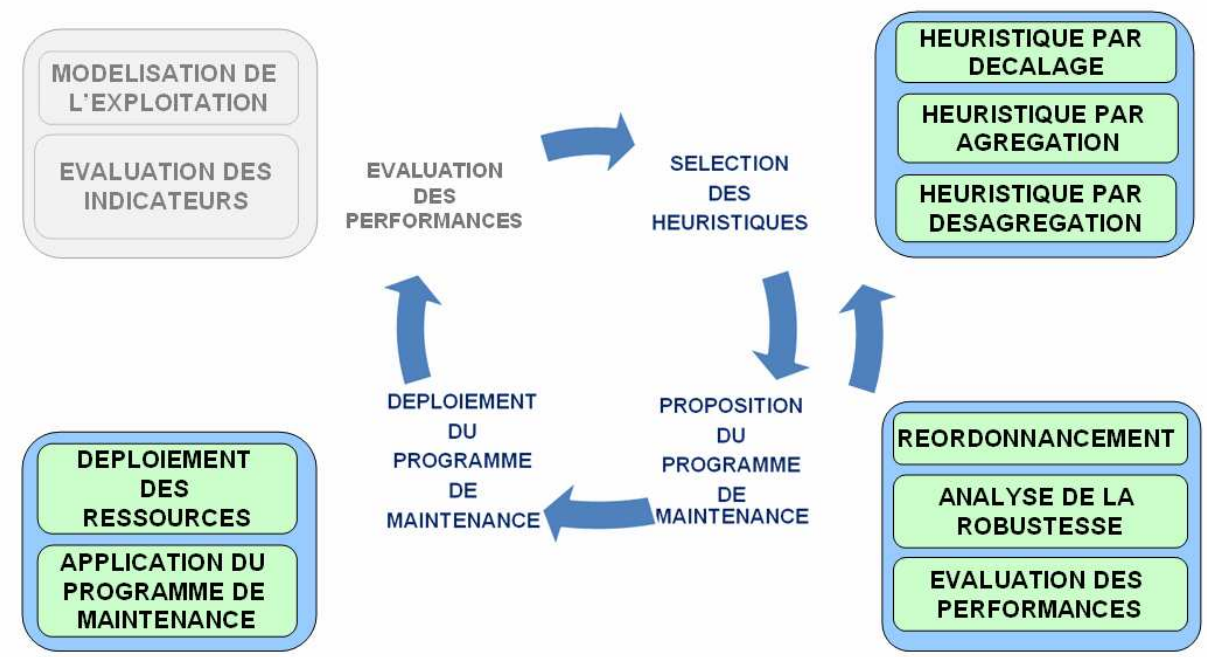


Figure 38. Approche de réordonnancement proactif

II.1. Descriptif des étapes de la méthode

Nous allons présenter chacune de ces phases pour nous focaliser ensuite sur la phase de sélection des heuristiques d'ordonnancement.

- **Evaluation des performances**

Cette phase consiste à réaliser une évaluation des performances opérationnelles en termes de disponibilité de l'exploitation. Cette évaluation permettra d'avoir une estimation quantitative des déficits en disponibilité de l'exploitation.
Cette évaluation suit une démarche en 4 étapes consistant à : modéliser la demande de l'exploitation, modéliser l'affectation des systèmes aux missions, modéliser la maintenance programmée et non programmée pour enfin évaluer les performances opérationnelles par le biais des indicateurs proposés dans le chapitre précédent.

- **Sélection des heuristiques**

Cette phase consiste à sélectionner les heuristiques les plus performantes permettant de répondre aux exigences du client. Le procédé de sélection s'appuiera sur un processus de simulation. En utilisant la simulation, chaque heuristique va être évaluée en fonction de son potentiel de gain en termes de disponibilité. Les heuristiques ainsi sélectionnées seront celles qui fourniront la meilleure performance. Cette phase suit 3 étapes essentielles : la sélection des heuristiques, le réordonnancement hors ligne et la pré-évaluation des performances théoriques du réordonnancement (Figure 39). Cette phase de sélection des heuristiques va être détaillée dans la section suivante.

- **Proposition du programme de maintenance**

Cette phase a pour objectif de fournir les dates d'opération de maintenance pour plusieurs scenarios de demande et d'incertitudes. Cette phase suit 2 étapes : Réordonnancement en ligne, Evaluation performance / robustesse du planning de maintenance.
La première étape consiste à effectuer un réordonnancement en ligne pour un jeu de demande potentiel et d'incertitudes permettant d'évaluer la robustesse de ce planning. La seconde étape permettra de reboucler avec la phase de sélection d'heuristiques où les performances du programme de maintenance seront améliorées par le choix de combinaison d'heuristiques.

- **Mise en place du programme de maintenance**

Cette dernière phase concerne « l'opérationnalisation » du programme de maintenance. Il s'agit d'analyser l'applicabilité du programme de maintenance proposé. Ces analyses concernent la planification des livraisons de pièces de rechange et d'outillage, le planning de travail des équipes de maintenance.

II.2. Sélection des heuristiques d'ordonnancement

La phase de sélection des heuristiques d'ordonnancement est l'une des phases centrales de notre démarche puisqu'il s'agit de sélectionner les heuristiques les plus performantes permettant de répondre aux exigences du client.
La sélection d'une heuristique peut-être réalisée soit à l'aide de la simulation, soit à l'aide d'un modèle de connaissance. Nous traiterons dans le cadre de ces travaux de recherche le premier aspect. Le recours aux modèles de connaissance est explicité dans les travaux de [Tranvouez et al.2001].
Lors d'une prise de décision, la sélection d'heuristiques à l'aide de la simulation consiste à simuler l'application d'un ensemble d'heuristiques en se projetant dans le futur. Les heuristiques ainsi sélectionnées seront celles qui fourniront la meilleure performance. Nous proposerons dans le cadre de cette méthode, un mécanisme d'ordonnancement à base de simulation conforme à cette orientation.

Cette phase suit 3 étapes essentielles : la ***sélection des heuristiques***, le ***réordonnancement hors ligne*** et la ***pré-évaluation des performances théoriques du réordonnancement*** (Figure 39).

L'étape de ***sélection des heuristiques*** sera réalisé de façon énumérative, ce qui consiste à sélectionner une à une chaque heuristique pour évaluer sa performance dans un réordonnancement hors ligne. La sélection de combinaison d'heuristiques sera envisagée après une première proposition de programme de maintenance dans la phase suivante. Cette combinaison d'heuristiques aura pour objectif d'améliorer le réordonnancement à l'image d'un cycle itératif.

L'étape de ***réordonnancement hors-ligne*** consiste à réaliser un traitement de l'ordonnancement de référence hors de son contexte réel suite à la sélection d'une ou plusieurs heuristiques.
A ce stade de traitement, cette étape prendra uniquement en compte les contraintes de demande théorique et de disponibilité des systèmes. Les contraintes d'ordre logistique (Pièces de rechange, Outillage, Main d'œuvre) seront plutôt exploitées dans la phase suivante.

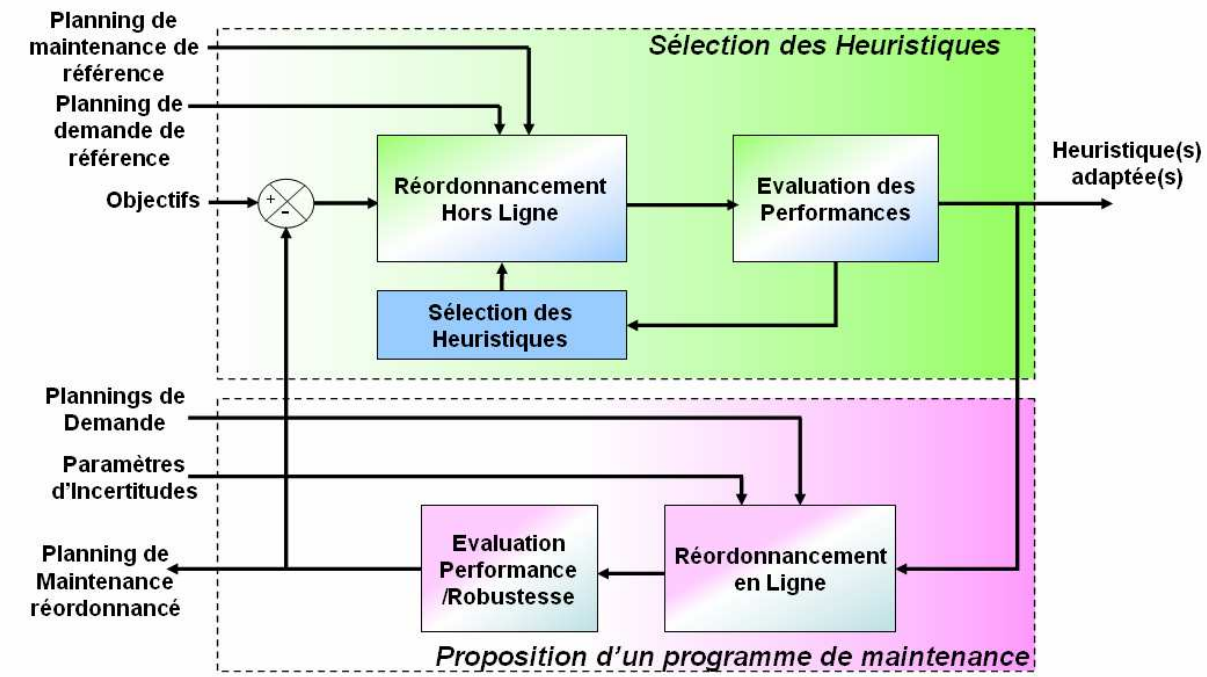


Figure 39. Interaction entre la phase de sélection des heuristiques et de proposition du programme de maintenance

L'étape de ***pré-évaluation*** consiste à mesurer la performance théorique de l'heuristique appliquée à l'ordonnancement. Les indicateurs ainsi mesurés sont : la disponibilité opérationnelle, le taux de réussite de mission et le taux de redondance.

Le choix des heuristiques adaptées se fera par l'intermédiaire de l'arbre de sélection des heuristiques (Figure 40). Cet arbre présente sur chaque branche les séquences d'heuristiques de réordonnancement choisies. Pour chaque sélection d'heuristiques (A, B ou C), figure l'évaluation en termes de disponibilité prévisionnelle (X%) apportée par le réordonnancement résultant de cette heuristique. Les éléments terminaux de chaque branche présente la disponibilité prévisionnelle évaluée pour le cumul des heuristiques sélectionnées dans cette branche.

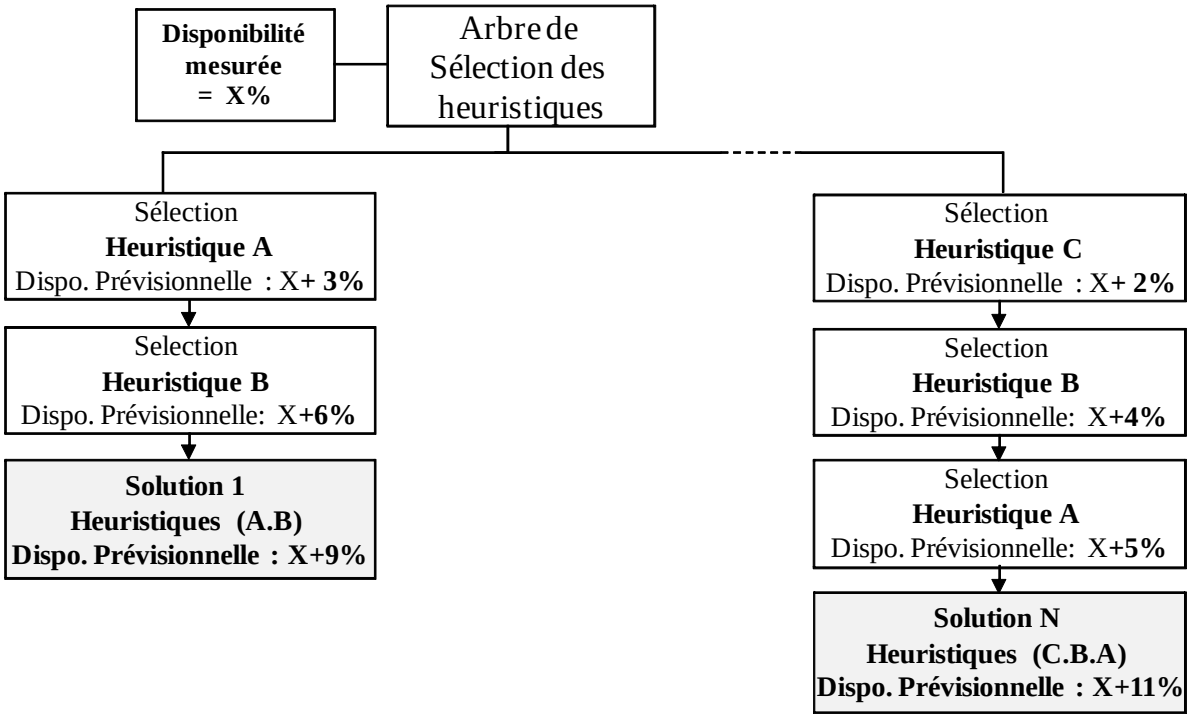


Figure 40. Arbre de sélection des heuristiques associé à la solution de réordonnancement évaluée en termes de disponibilité prévisionnelle

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter de manière plus approfondie chacune des heuristiques que nous proposons dans cette thèse.

III. PROPOSITION DES HEURISTIQUES DE REORDONNANCEMENT DU PROGRAMME DE MAINTENANCE

Dans ce paragraphe, nous présenterons les différentes heuristiques permettant de réordonnancer le planning de maintenance. Ce réordonnancement sera effectué en fonction des « opportunités[11] » qu'un exploitant pourra saisir pour effectuer des opérations de maintenance sur un système, Nous désignerons donc ces différentes heuristiques de réordonnancement comme des « heuristiques de réordonnancement par opportunités ».
Avant de décrire les heuristiques, nous allons présenter dans le paragraphe ci-dessous, les éléments nécessaires à leur définition.

[11]Nous définirons le terme « opportunité » comme le moment adéquat pour les exploitants pour réaliser des opérations de maintenance en prenant en compte l'organisation des missions et de la disponibilité des ressources.

III.1. Présentation des heuristiques de réordonnancement

Dans ce paragraphe, nous allons présenter d'une manière générale les heuristiques que nous proposons dans cette thèse. Pour ce faire, nous allons présenter dans un premier temps les paramètres nécessaires à leur analyse à savoir : **Temps de référence**, **Temps requis**, **Temps de fonctionnement** et le **Programme de maintenance**.

III.1.1. Notations

- Temps de référence

Le temps de référence (TREF) représente la période de référence choisie pour l'analyse des temps. Généralement défini pour 1 an, nous le représenterons dans notre étude suivant une échelle horaire ou journalière permettant de mettre en avant les périodes de mission et de maintenance.

- Temps requis

Le temps requis (TR) représente la période de temps pendant laquelle l'utilisateur de l'entité exige qu'elle soit en état d'accomplir une fonction requise.

- Temps de fonctionnement

Le temps de fonctionnement (TF) est la partie du temps effectif de disponibilité correspondant à un état de fonctionnement de l'entité.

Les temps que nous venons de décrire sont présentés de manière globale, or dans notre étude, nous les représenterons de manière instantanée. Nous présentons ces temps dans le tableau suivant (Tableau 16).

Temps	Notation	Définition
Temps de référence	$TREF_i$	$TREF_i \in [dd_ref ; df_ref]$
Temps requis	TR_i	$TR_i = \begin{cases} 1 & si\ TR_i \in I \\ 0 & sinon \end{cases}$ Où $I = [8;18]$ (Eq. 30)
Temps de fonctionnement	TF_i	$TF_i \in [0;1]$

Tableau 16. Représentation et définition des temps d'exploitation

- Programme de maintenance

Le programme de maintenance synthétise l'ensemble des opérations de maintenance en vue de maintenir « l'utilisabilité » [ISO 9241-11 98] d'un système. Dans ce cadre, un programme de maintenance est constitué d'un ensemble de visite de maintenance *V*:

$$\mathbf{V} = \{\mathbf{V_1}, \mathbf{V_2}, \ldots\ldots\mathbf{V_k}\ldots\ldots, \mathbf{V_n}\} \text{ (Eq. 31)}$$

Où chaque visite V_k est caractérisée par une échéance Ech_k pouvant être définie sur une échelle horaire, calendaire ou par cycle d'utilisation, un ensemble m de tâches de maintenance T_m et d'une durée calendaire théorique D_k.

$$\mathbf{V_k} = \{\mathbf{Ech_k}, \mathbf{T_m}, \mathbf{D_k}\} \text{ (Eq. 32)}$$

Une tâche de maintenance T_m est quant à elle caractérisée par une zone d'emplacement dans le système Zon_m, un type Ty_m faisant référence au mode d'entretien de la tâche, une classe Cl_m faisant référence au caractère sécuritaire de la tâche, une échéance Ech_m, un nombre *n* d'activité A_n sur un équipement Eq_m, une tolérance To_m, un nombre *g* de Main d'œuvre Mo_m (Mo_g), un nombre *s* d'Outillage Ou_m (Ou_s), une durée opératoire D_m et un nombre m de pièces de rechange. Cette tâche peut-être exprimée par la formule suivante :

$$\mathbf{T_m} = \{\mathbf{Zon_m}, \mathbf{Ty_m}, \mathbf{Cl_m}, \mathbf{Ech_m}, \mathbf{A_n}, \mathbf{Eq_m}, \mathbf{D_m}, \mathbf{To_m}, \mathbf{Mo_g}, \mathbf{Ou_s}, \mathbf{Rec_m}\} \text{ (Eq. 33)}$$

- Ty_m : Les tâches de maintenance sont typées en 3 groupes :
  - Opération de vérifications selon état.
  - Dépose de l'élément concerné à chaque échéance pour des opérations de reconditionnement.
  - Remplacement systématique de l'élément concerné.

- Cl_m : Les tâches sont classées selon 3 degrés d'importance :
  - « _ » Les échéances et le mode opératoire peuvent être adapté sans autorisation.
  - « * » Les échéances et le mode opératoire peuvent faire l'objet d'adaptation avec accord du constructeur.
  - « ** » Les échéances et le mode opératoire ne peuvent faire l'objet d'adaptation qu'avec l'accord du constructeur et des autorités de certification.

- A_n : Les activités qui constituent une tâche de maintenance T_m peuvent être variées. Elles sont globalement communes à tous les types de tâches de maintenance. On retrouve les activités de préparation, de traitement et de reconditionnement.

L'ensemble de ces relations va être utilisé dans le paragraphe suivant pour la présentation des heuristiques de réordonnancement.

III.1.2. Les heuristiques de réordonnancement

Dans la pratique les activités de réordonnancement du programme de maintenance se limitent généralement au décalage des échéances de maintenance. Cette pratique consiste à réaliser les opérations de maintenance le plus tard possible en utilisant la tolérance autorisée par le programme de maintenance.
Cette pratique de réordonnancement reste limitée pour le réordonnancement de la maintenance d'un ensemble de systèmes et pour optimiser la disponibilité de celui-ci.

Pour élargir l'éventail des solutions, nous proposons trois heuristiques qui couvrent l'ensemble des réordonnancements possibles (Figure 41) :

- **Heuristique de réordonnancement par décalage**. Cette heuristique ajoute à celle que nous avons décrite au dessus le fait de pouvoir ajuster de manière optimale en amont ou en aval la date de réalisation de l'opération de maintenance.

- **Heuristique de réordonnancement par agrégation**. Cette heuristique consiste à regrouper des tâches de maintenance permettant la réalisation de lots de maintenance.

- **Heuristique de réordonnancement par désagrégation**. Cette heuristique réalise le traitement inverse de la précédente heuristique.Le principe de cette heuristique consiste à désagréger une visite de maintenance en plusieurs lots permettant d'étaler les opérations de maintenance au cours du temps et de lisser la charge de travail.

Parmi les heuristiques que nous proposons dans la figure ci-dessous, l'heuristique de réordonnancement par décalage peut-être basée sur des valeurs moyennes ou sur des plages de valeur de décalage.

Concernant les deux autres heuristiques, l'agrégation et la désagrégation des tâches de maintenance peuvent être réalisées soit, en fonction de l'emplacement sur le système où va être réalisée la maintenance (**Zonage**), soit en fonction du **temps d'immobilisation** engendré par ces tâches de maintenance.

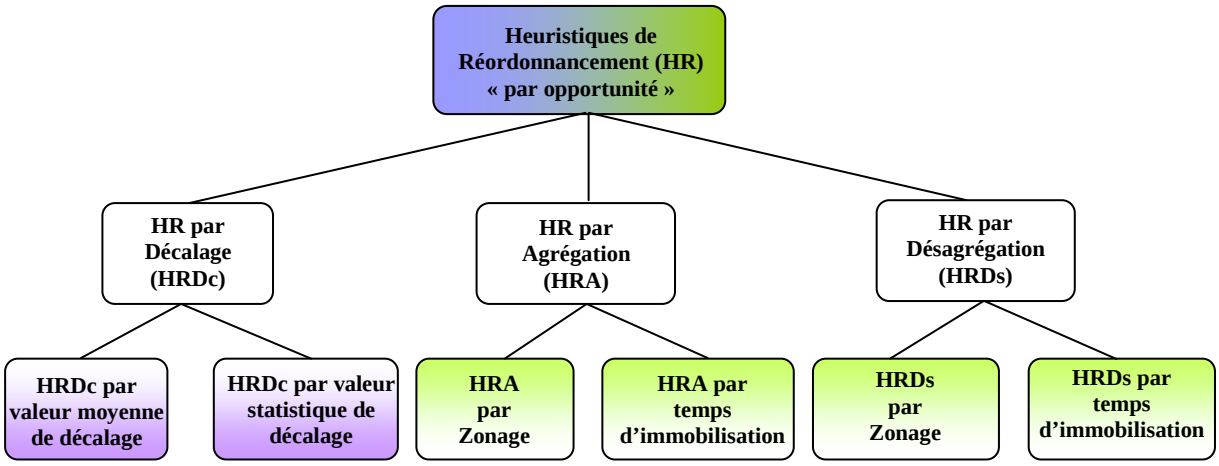


Figure 41. Représentation arborescente des heuristiques de réordonnancement

III.2. Heuristique de réordonnancement par décalage

III.2.1. Présentation générale de l'heuristique

Cette méthode consiste à simplement retarder ou anticiper l'exécution des tâches posant des problèmes de disponibilité. Cette méthode est habituellement appliquée pour résoudre les incohérences, provoquées par une perturbation, liées au respect des contraintes de temps et de ressources.
Nous décrivons ci-dessous les paramètres d'entrées et sorties ainsi que les contraintes et ressources du processus de réordonnancement par décalage présentés à la figure suivante (Figure 42).

Cette méthode de réordonnancement fournit en sortie, les dates d'exécution ainsi que les durées des tâches de maintenance préalablement sélectionnées pour réordonnancer le planning de maintenance. Nous définierons les « ordres de Maintenance » par les deux paramètres suivants : dates d'exécution et durées.
Ces ordres de maintenance sont fournis par l'intermédiaire du modèle de demande, d'incertitude et de réordonnancement de référence. Cette méthode est soumise à plusieurs contraintes (objectif de disponibilité, tolérance amont, tolérance aval).

La tolérance aval (α) désigne la marge temporelle admissible pour le report de cette tâche. La tolérance amont (β) désigne la marge économique admissible pour l'anticipation d'une opération de maintenance.
Cette méthode s'appuie principalement sur le programme de maintenance dans lequel est décrit l'échéancier des opérations de maintenance ainsi que les ressources (Main d'œuvre, Outillage, Pièces de rechange) nécessaires à la réalisation des tâches de maintenance.

III.2.2. Description détaillée de l'heuristique

Nous proposons ci-dessous un descriptif détaillé du processus de réordonnancement par décalage (Figure 42).

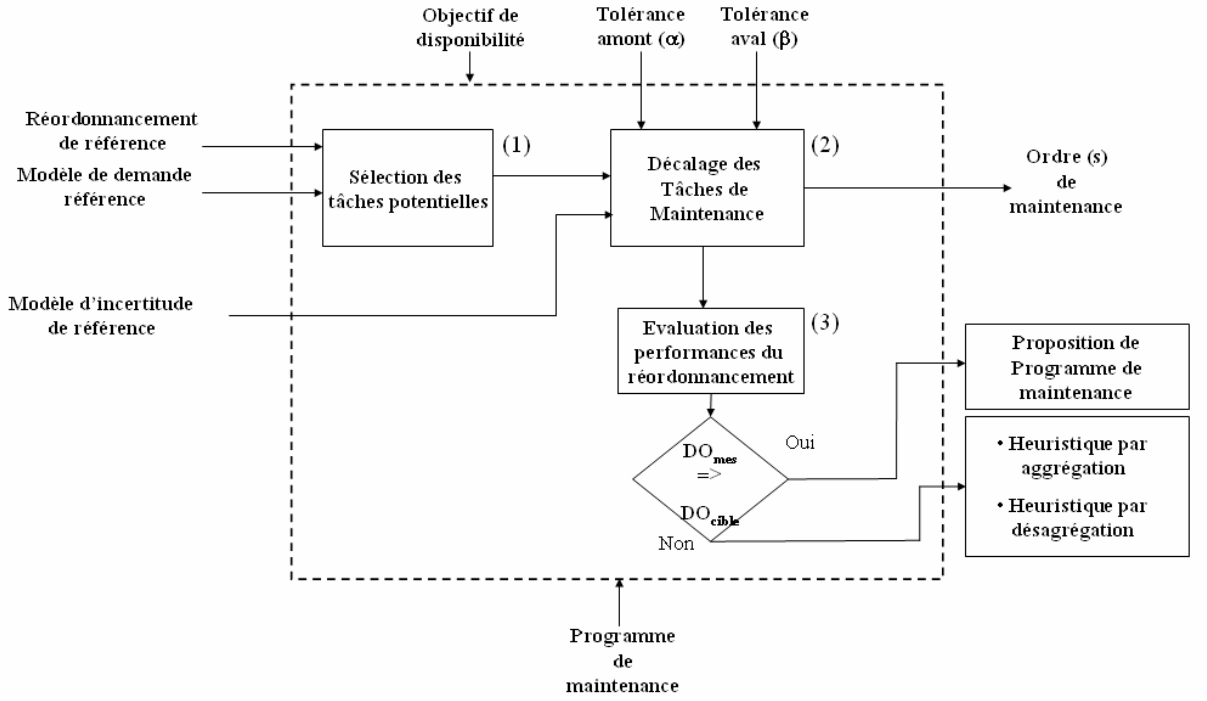


Figure 42. Démarche de réordonnancement par décalage

Cette heuristique est articulée autour de 3 processus : **Sélection des tâches potentielles (1)**, **Décalage des tâches de maintenance sélectionnées (2)** et **l'Evaluation des performances du réordonnancement (3)**.

III.2.2.1. Sélection des tâches potentielles

Ce processus consiste à cibler les tâches pénalisant les performances de l'ordonnancement. Une tâche sélectionnée répond à deux principales conditions,

à savoir, la planification de cette tâche pendant un créneau de temps requis et l'indisponibilité des ressources permettant la réalisation de cette tâche. Dans la figure ci-dessous, nous présentons un exemple de planning d'exploitation représenté pour 1 système et constitué d'un **planning de demande**, d'un **planning de maintenance programmée** et d'un **planning de ressources (Figure 43)**.

Dans l'exemple, le planning de demande est représenté par des créneaux de temps requis (TR_i) de même durée sur un temps de référence donné. L'état haut d'un créneau (TR_i) signifie un besoin d'un système disponible. Le planning de maintenance programmée met en évidence des tâches de maintenance T_i disposées sur le temps de référence. L'état haut d'un créneau T_i indique l'état du système en maintenance. Enfin, le planning de ressource est ici représenté de façon binaire (ressource disponible ou indisponible) sur le temps de référence.

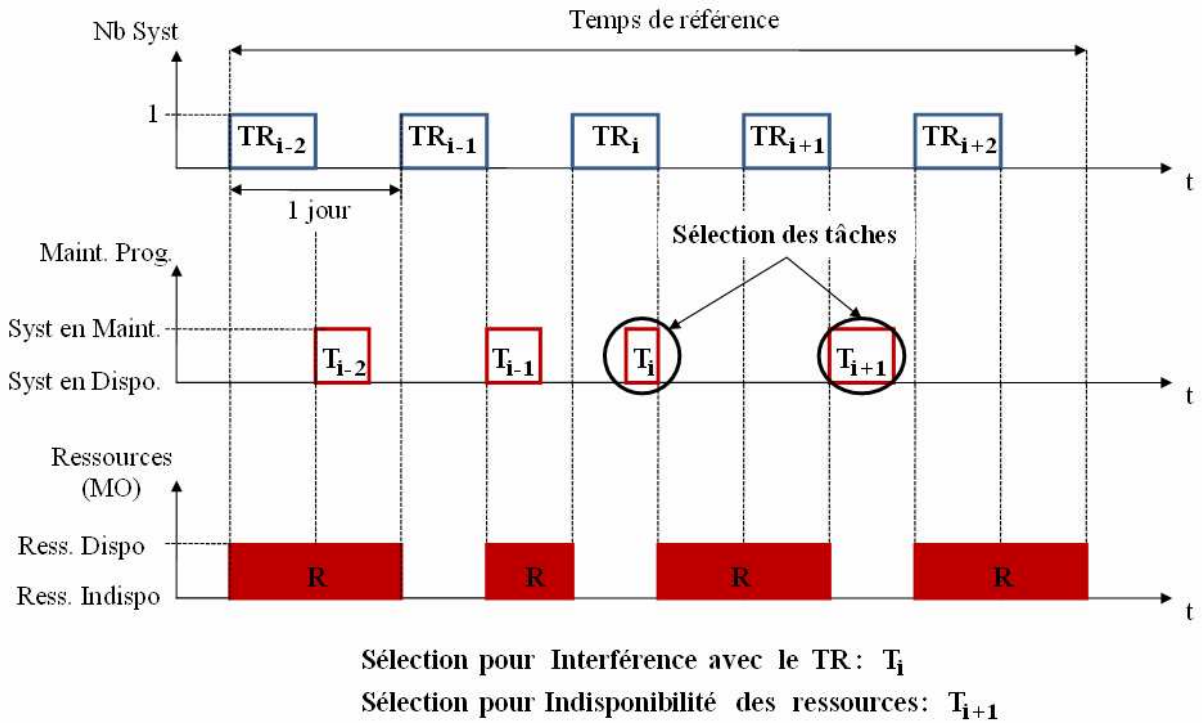


Figure 43. Description du principe de sélection des tâches de maintenance à réordonnancer

A partir des conditions que nous avons énoncées plus haut, nous avons sélectionnée T_i en raison de sa planification dans un intervalle de Temps requis et T_{i+1} en raison de sa planification dans une période où les ressources sont indisponibles.

III.2.2.2. Décalage des tâches de maintenance sélectionnées

Cette étape consiste à mettre en œuvre la simulation pour décaler les dates d'exécution des tâches de maintenance que nous avons sélectionnées précédemment. La simulation repose sur un processus de tirage de valeurs extraites d'une loi Uniforme de paramètres U(α,β).

Le processus de décalage est décrit dans la figure ci-dessous (Figure 44). Ce processus est structuré en cinq étapes : **Analyse de la plage de décalage de la tâche (2.1)**, **Réalisation de tirage suivant une loi de distribution (2.2)**, **Décalage de l'exécution de la tâche (2.3)**, **Evaluation de l'emplacement de la tâche (2.4)** et **Synthèse des ordres de maintenance (2.5)**.

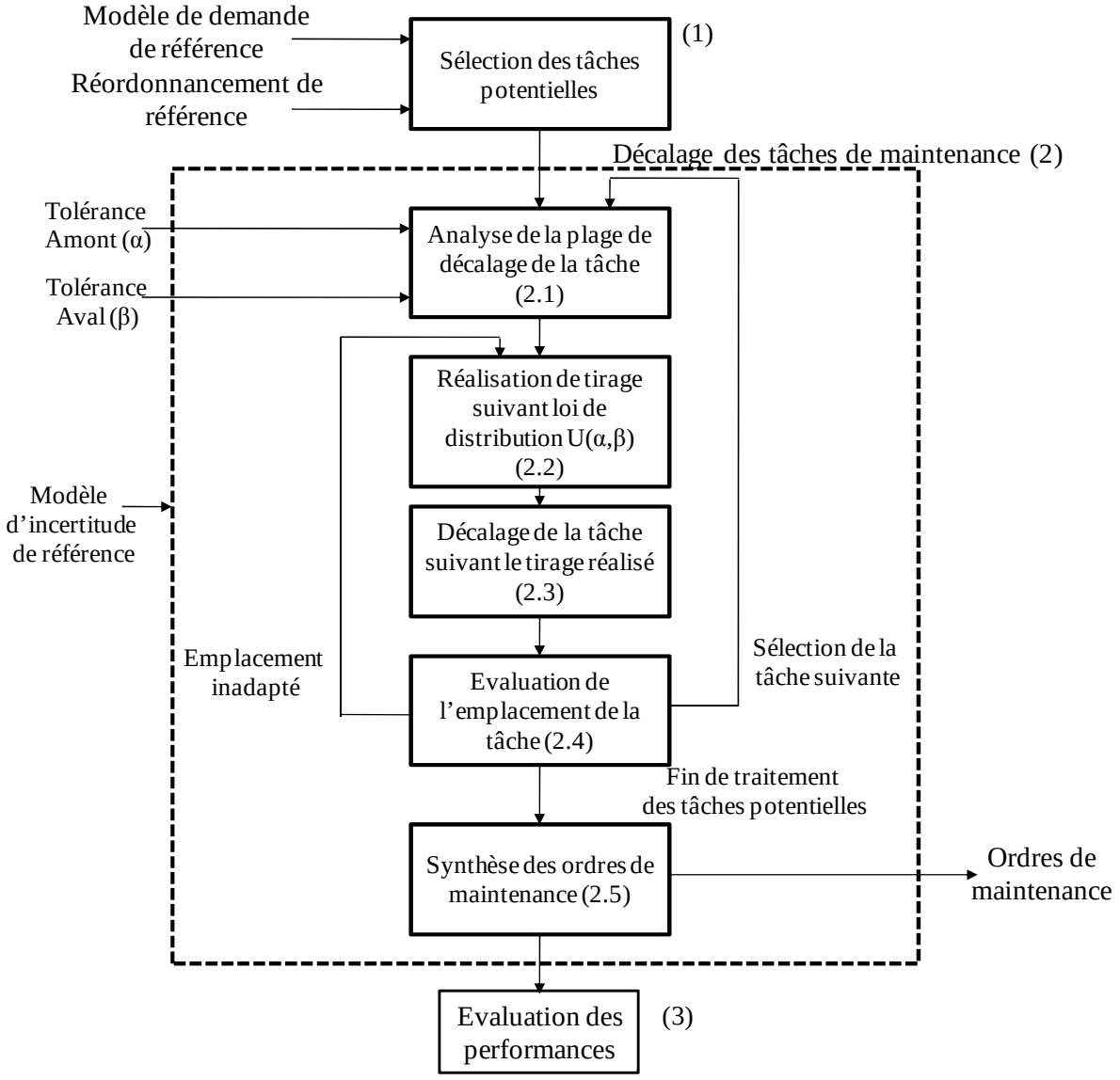


Figure 44. Schéma de principe du processus de décalage des tâches

- **Analyse de la plage de décalage (2.1)**

L'analyse de la plage de décalage consiste à évaluer la tolérance amont et aval de chaque tâche en liaison avec le modèle de demande (Figure 45). La valeur de β (Tolérance avale) est généralement indiquée dans le programme de maintenance pour chaque tâche. La valeur α est à évaluer en fonction du coût sur un horizon long terme de cette tâche de maintenance.

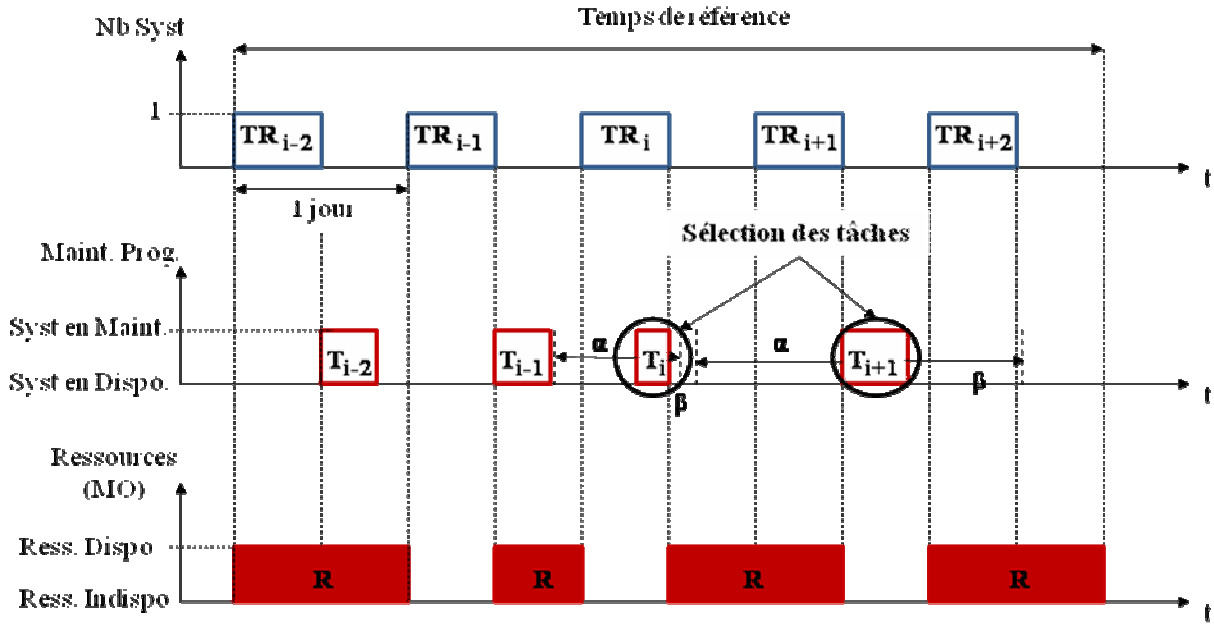


Figure 45. Analyse de la plage de décalage

- **Réalisation de tirage et décalage de la tâche (2.2) (2.3)**

Cette étape consiste à prélever une valeur (dd) sur une loi de distribution uniforme U(α, β) et de calculer avec cette valeur la nouvelle date d'exécution de la tâche de maintenance.

- **Evaluation de l'emplacement de la tâche (2.4)**

A la suite du tirage, une évaluation de l'emplacement de la tâche est réalisée en vérifiant deux conditions successives :

- La première évaluation concerne la présence de la tâche de maintenance hors du créneau de temps requis.
- La deuxième évaluation concerne la disponibilité des ressources pour réaliser la tâche de maintenance.

Dans le cas où ces deux conditions sont satisfaites, une autre tâche sera sélectionnée dans le groupe des tâches potentielles du processus (1).

- **Synthèse des ordres de maintenance (2.5)**

Cette étape consiste à dresser une synthèse des activités de maintenance en mettant en évidence la description des tâches de maintenance avec leur date de début actualisé qui constituera les ordres de maintenance.

III.2.2.3. Evaluation des performances

Ce processus d'évaluation permet de mesurer les performances opérationnelles du réordonnancement obtenu. Cette évaluation est faite de manière instantanée sur le temps de référence. Dans le cas où la performance cible n'est pas atteinte, le recours à d'autres heuristiques doit être envisagé.

III.2.3. Synthèse

Cette heuristique consiste à proposer des décalages de tâches de maintenance en fonction de leur disposition par rapport au planning de missions. Ce type de réordonnancement se place dans le cadre de réordonnancement local. Il permet de reconstruire très rapidement un ordonnancement cohérent suite à des aléas

III.3. Heuristique de réordonnancement par agrégation

III.3.1. Présentation générale de l'heuristique

Cette heuristique permet de reconstruire un ordonnancement en élaborant des groupes de tâches permettant à un exploitant de maximiser les périodes de disponibilité entre opérations de maintenance. Ces groupes de tâches seront désignés dans notre étude par « des lots de maintenance ». Cette méthode est habituellement appliquée pour réordonnancer le planning de maintenance d'un système effectuant peu de missions.

Cette méthode de réordonnancement fournit en sortie, les différents lots de maintenance ainsi que leur composition, à savoir la durée calendaire ($durée_p$), date de début (dd_p), le nombre de tâches de maintenance (nb_tk_p). Un lot de maintenance est défini suivant la relation suivante :

$$L_p = \{dd_p, durée_p, nb_tk_p\} \qquad \text{(Eq. 34)}$$

Nous faisons la distinction entre un lot de maintenance et un ordre de maintenance sachant qu'un lot de maintenance comptabilise au moins 2 ordres de maintenance.
Le dimensionnement des lots est réalisé par le biais de l'ordonnancement de référence, le modèle de demande et d'incertitude de référence.
Ce réordonnancement est soumis à des contraintes en termes d'objectif de disponibilité, de zones et de temps moyen entre maintenance. Les ressources utilisées par ce processus de réordonnancement concernent principalement le programme de maintenance.

III.3.2. Description détaillée de l'heuristique

Nous proposons un descriptif détaillé de l'heuristique de réordonnancement par agrégation à travers la figure ci-dessous (Figure 46)

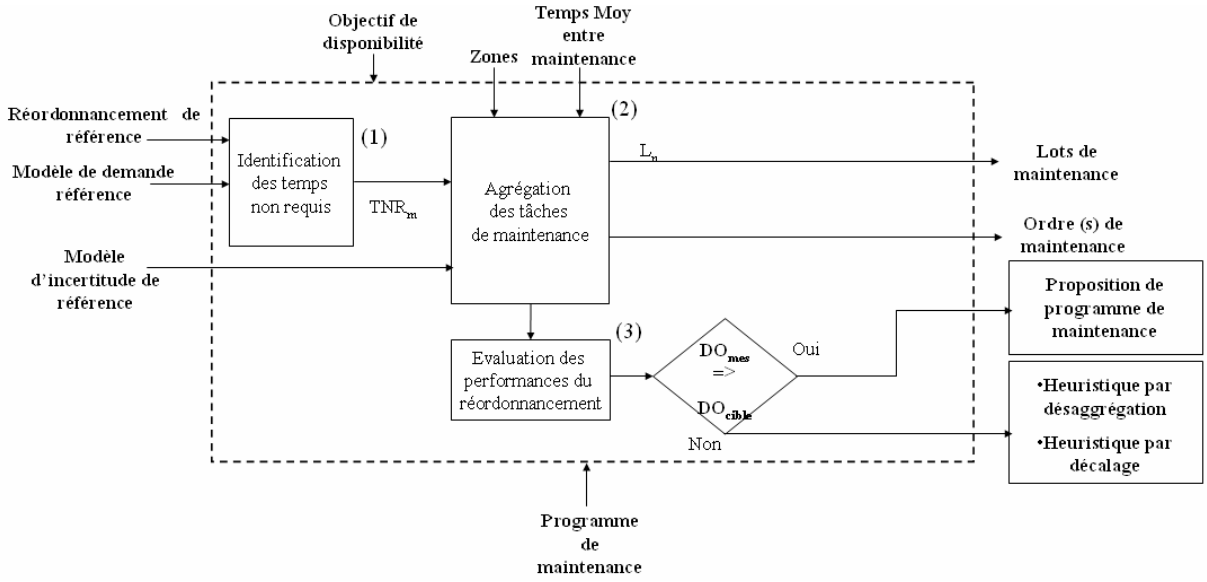


Figure 46. Démarche de réordonnancement par agrégation

Cette heuristique est articulée autour de 3 processus : **Identification des temps non requis** (1), **Agrégation des tâches de maintenance** (2) et **Evaluation des performances du réordonnancement** (3).

III.3.2.1. Identification des temps non requis

Ce processus consiste à parcourir le planning de demande pour comptabiliser les fenêtres de temps non requis et les classer en fonction de leur date de début et de leur durée.

III.3.2.2. Agrégation des tâches de maintenance

Le processus de réordonnancement par agrégation peut suivre deux orientations : réordonnancement suivant le temps d'immobilisation engendré par les opérations de maintenance et réordonnancement suivant le zonage du système. Nous allons reprendre chacune de ces orientations ci-dessous.

III.3.2.2.1. Processus d'agrégation suivant le temps d'immobilisation

Ce mode de réordonnancement permet de trier les tâches de maintenance en fonction du temps d'immobilisation engendré (Figure 47). Pour ce faire quatre étapes sont nécessaires :

- **Sélection des tâches de maintenance (2.1)**,
- **Génération des stratégies d'agrégation de tâches (2.2),**
- **Elaboration des lots de maintenance (2.3)**,
- **Synthèse des ordres de maintenance (2.4).**

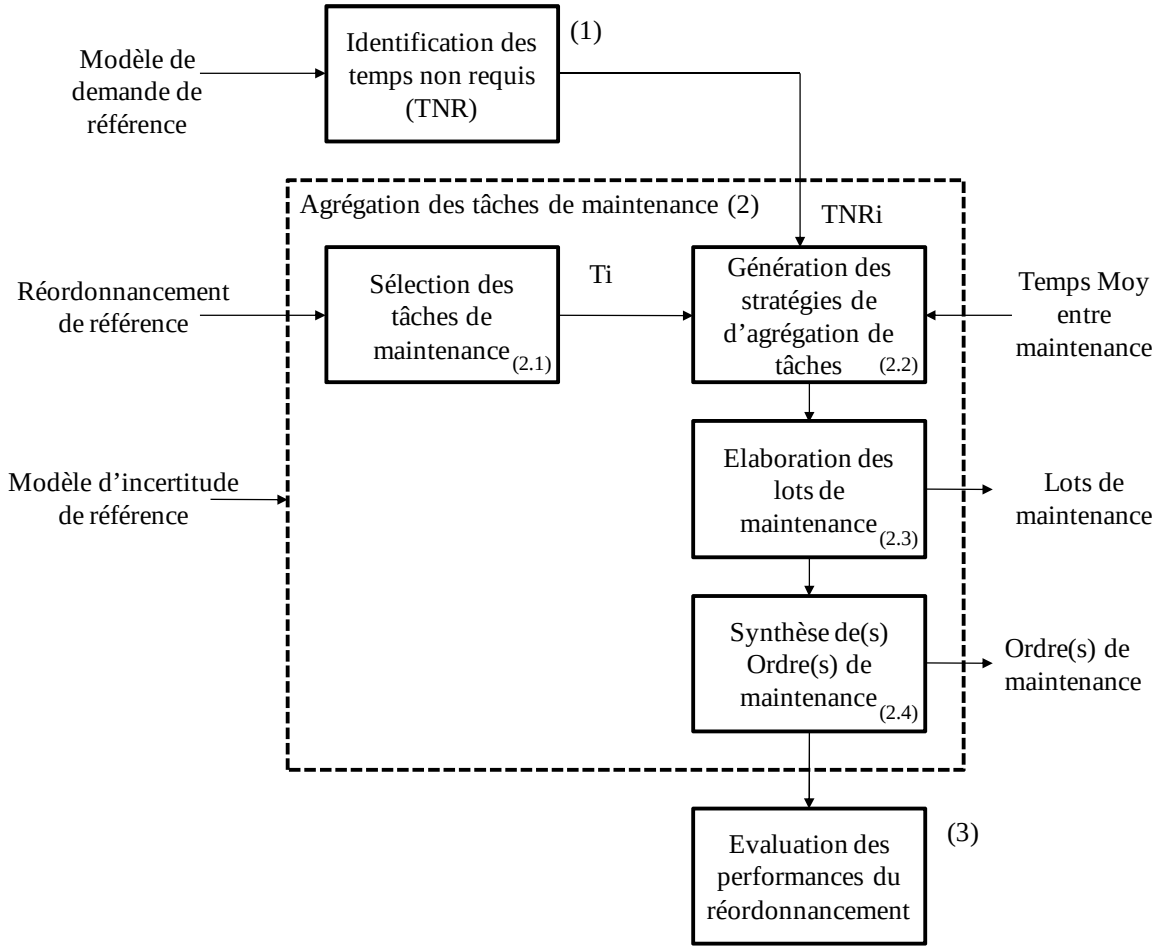


Figure 47. Principe de réordonnancement par agrégation suivant le temps d'immobilisation engendré par les activités de maintenance

Les principales entrées de ce processus concerne les temps non requis identifiés dans le processus (1), le réordonnancement de référence qui sera utilisé pour sélectionner les tâches de maintenance pouvant faire l'objet d'un réordonnancement et enfin le temps moyen entre maintenance. En sortie, ce processus délivre les lots et les ordres de maintenance. Nous allons reprendre les sous processus constituant le processus d'agrégation.

- **Sélection des tâches de maintenance (2.1)**

Ce processus consiste à analyser les intervalles de décalage possibles de chaque tâche de maintenance en utilisant leur tolérance admissible (β) ou de leur marge

économique (α) que nous aurons défini dans ce processus. Dans le cas, où la tâche admet une marge temporelle amont ou aval, elle sera sélectionnée pour être réordonnancée avec un groupe de tâches, comme présenté dans la figure du paragraphe précédent (Figure 45).

- **Génération des stratégies d'agrégation de tâches (2.2)**

Cette étape consiste à générer des solutions de réordonnancement utilisant plusieurs stratégies d'agrégation. Nous pouvons déduire 2 stratégies d'agrégation (Figure 48).

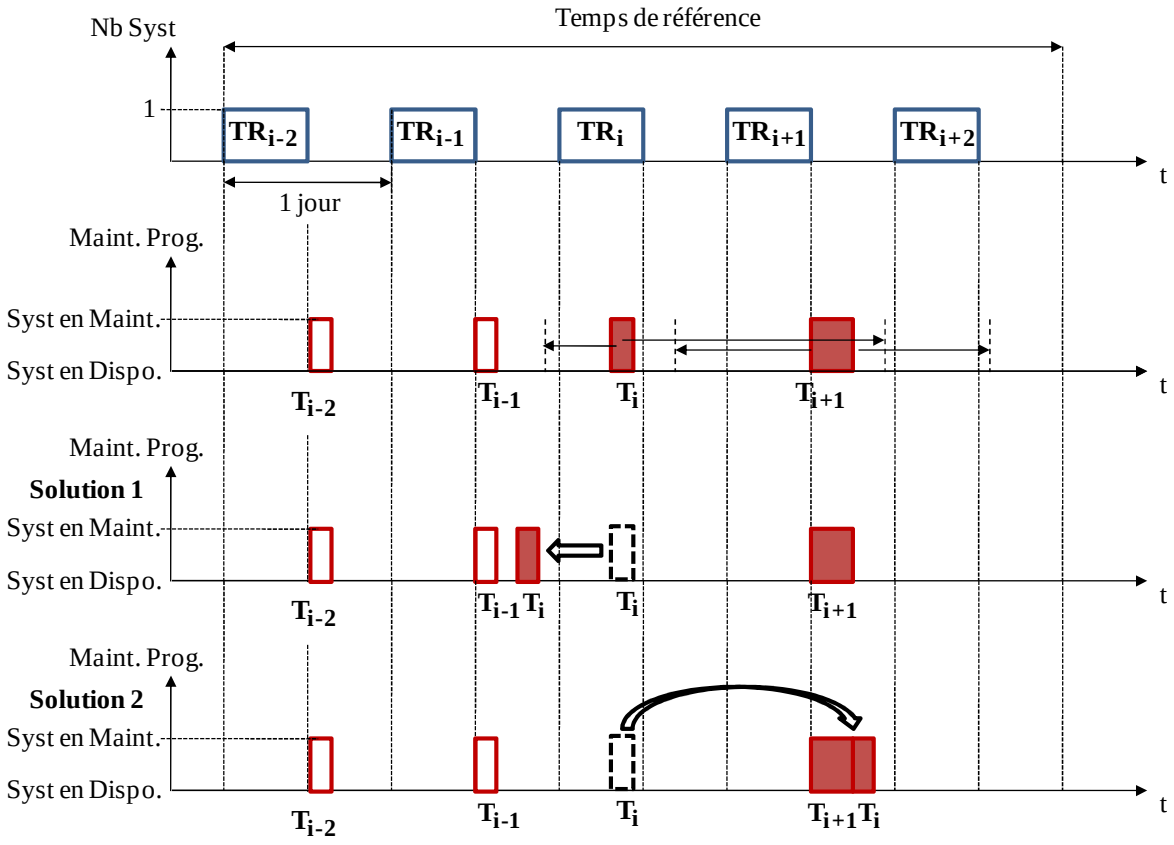


Figure 48. Description des stratégies d'agrégation possibles

Dans cette figure, nous avons illustré l'alternative d'agrégation qui pourrait avoir lieu dans le cadre de la tâche T_i.

- **Elaboration des lots de maintenance (2.3)**

Cette étape consiste à élaborer des regroupements de tâches que nous appellerons des lots de maintenance. Chaque lot L_i sera constitué d'au moins

deux tâches de maintenance. La sélection des tâches ainsi que la génération des stratégies d'agrégation permettent d'établir par conséquent des lots (Figure 49). Le choix d'une stratégie se fait principalement par la prise en compte de la disponibilité des ressources.

$L_1 = \{T_{i-1}, T_i\}$
$L_2 = \{T_{i+1}, T_{i+2}\}$

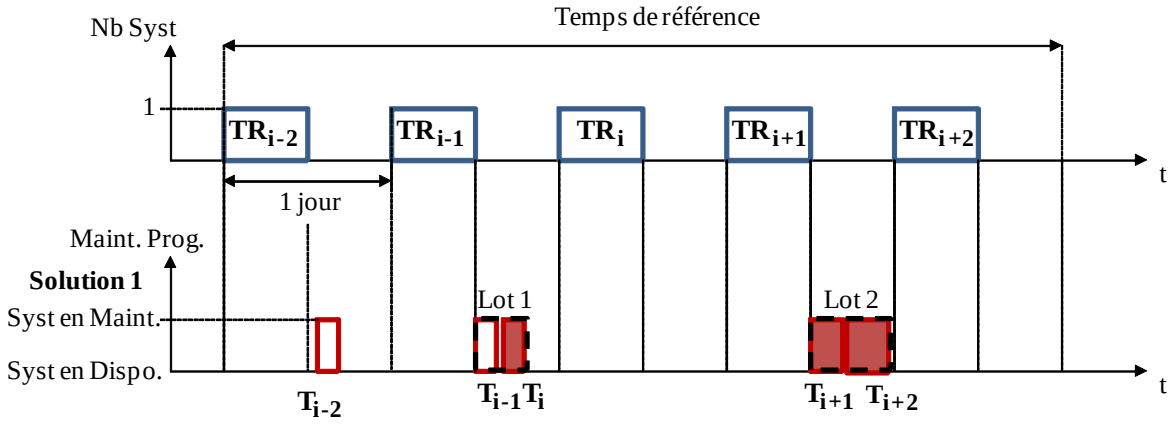


Figure 49. Présentation des lots de tâches de maintenance

- **Synthèse des ordres de maintenance (2.4)**

Cette étape consiste à dresser une synthèse des activités de maintenance en mettant en évidence la description des lots de maintenance avec leurs dates de début ainsi que leur composition, qui constitueront les ordres de maintenance.

III.3.2.2.2. Processus d'agrégation suivant le zonage du système

Contrairement au processus d'agrégation précédent, ce mode de réordonnancement permet de trier les tâches de maintenance en fonction de l'emplacement sur le système des opérations à réaliser. Nous définirons ces emplacements par des zones. Pour ce faire, six étapes sont nécessaires (Figure 50) :

- **Définition des zones du système (2.1),**
- **Sélection des tâches de maintenance (2.2),**
- **Correspondance entre tâches sélectionnées et zones identifiées (2.3),**
- **Evaluation des durées de maintenance par zones (2.4),**
- **Elaboration des lots de maintenance (2.5),**
- **Synthèse des ordre(s) de maintenance (2.6)**.

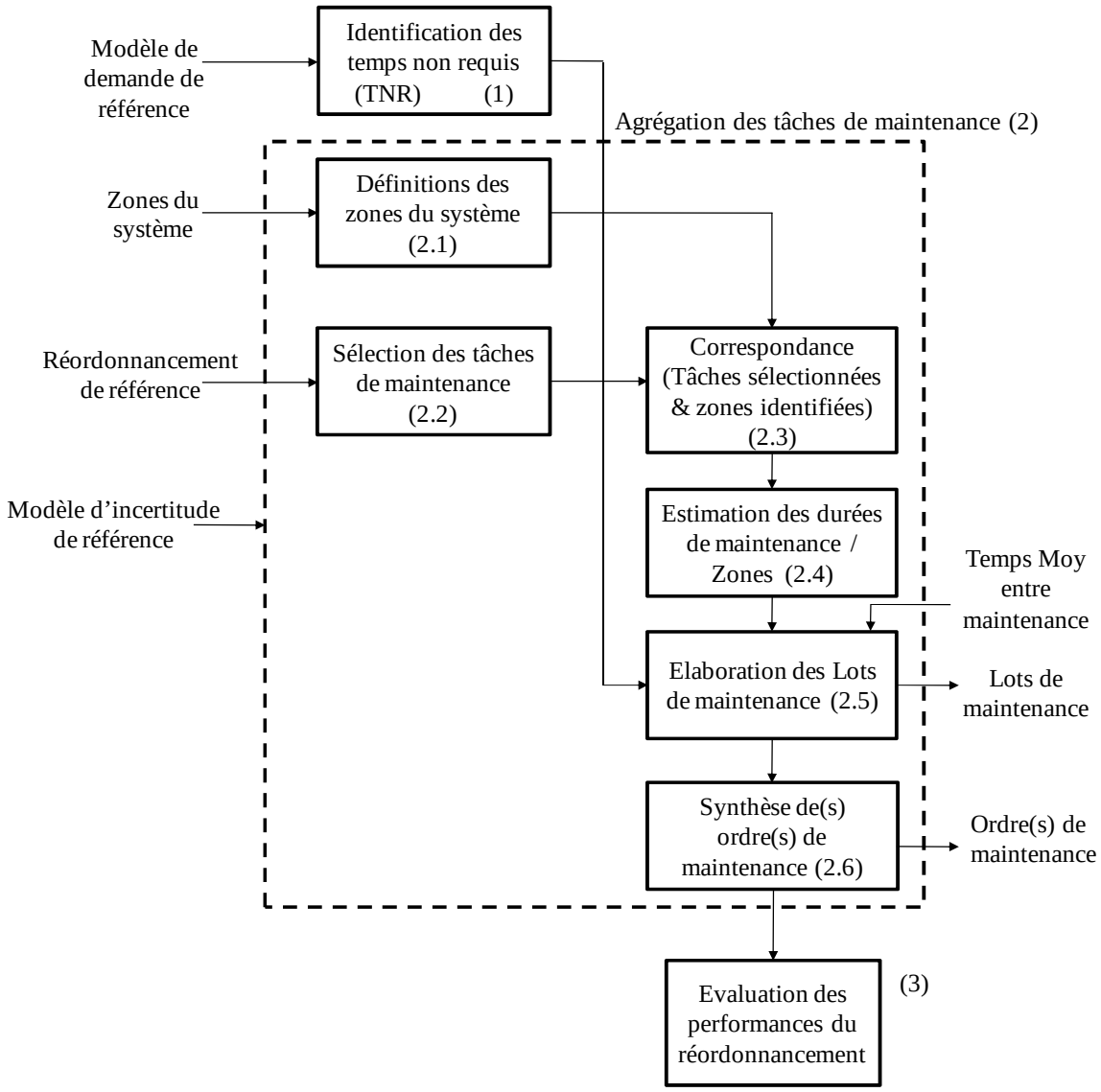


Figure 50. Processus de réordonnancement par agrégation suivant le zonage du système

- **Définition des zones du système (2.1)**

Cette étape a pour objectif de définir les zones d'emplacement des tâches de maintenance du système représentées par le paramètre **Z**. Dans le cadre de la maintenance de système complexe, la définition des zones n'est pas systématiquement présentée dans le programme de maintenance. Dans ce cas, les prestataires de maintenance doivent proposer des zones adaptées permettant de fractionner et de répartir les activités de maintenance. Une des conditions nécessaires à cette étude est l'indépendance des zones. En d'autres termes, les activités de maintenance définies pour une zone ne doivent pas avoir d'influence importante sur une autre zone. Dans la figure ci-dessous nous proposons un

exemple de système constitué de 5 zones d'emplacement dans lesquelles les équipements seront identifiés par le paramètre **Eq**. (Figure 51).

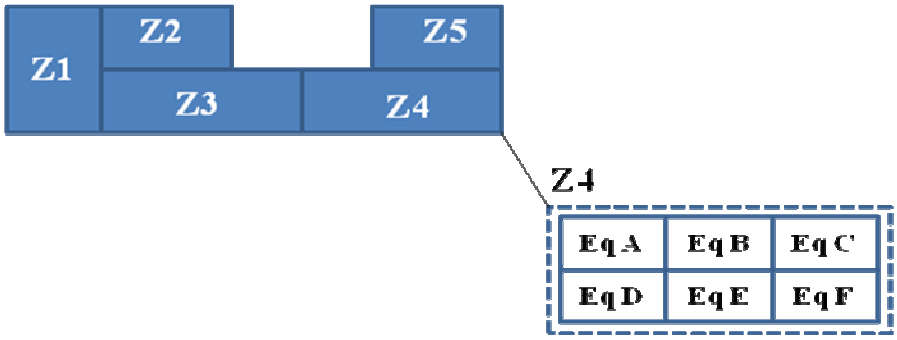


Figure 51. Description des zones du système S

La définition des zones du système appliquée à l'exemple ci-dessus est représentée dans la relation (Equation 35) ci-dessous :

$$Z = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5\} \quad \text{(Eq 35)}$$

Dans chaque zone, une identification des équipements est réalisée. Cette identification est utilisée pour établir une correspondance entre :
- les équipements compris dans les zones,
- les tâches de maintenance portant sur ces équipements.

Par exemple, les équipements identifiés dans la zone Z4 sont présentés dans la relation suivante :

$$Z_{4_{Eq}} = \{Eq_A, Eq_B, Eq_C, Eq_D, Eq_E, Eq_F\} \quad \text{(Eq 36)}$$

- **Sélection des tâches de maintenance (2.2)**

Dans cette étape, les tâches sélectionnées ont des périodicités élevées et des charges de travail associées importantes. A titre d'exemple, pour une utilisation annuelle de 1500 heures de vol d'un système aéronef, elles correspondent aux tâches réalisées tous les 500 heures de vol ou tous les 12 à 18 mois. Ce choix de tâches de maintenance permet une flexibilité de réordonnancement du programme de maintenance et une utilisation plus efficace des heuristiques.

- **Correspondance des tâches sélectionnées et des zones identifiées (2.3)**

Cette étape consiste à analyser la correspondance des équipements identifiés dans chaque tâche $\mathbf{T_i(Eq_m)}$ à réaliser et des équipements inclus dans chaque zone $\mathbf{Z_k(Eq_p)}$. Dans le cas où la correspondance est vérifiée, la tâche T_i sera réalisée dans le cadre de la zone Z_k. Cette analyse de correspondance est résumée par la relation suivante (Equation 37):

$$\text{Si } \mathbf{T_i(Eq_m) = Z_k(Eq_p)} \quad \text{(Eq 37)}$$
$$\text{Alors } \mathbf{T_i \in Z_k}$$

- **Estimation des durées de groupe de tâches de maintenance / zone (2.4)**

D'une zone à une autre, le nombre de tâches de maintenance (T_i_durée) peut être différent. Il est alors nécessaire d'évaluer les durées de groupe de tâches de maintenance pour chaque zone (Z_i_durée) en vue d'élaborer des lots de maintenance concordant aux fenêtres de temps non requis.

$$\mathbf{Z_i_durée} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{T_i_durée} \quad \text{(Eq 38)}$$

- **Elaboration des lots (2.5)**

La réalisation des lots de maintenance tient compte de la durée, du nombre de tâches et de la zone d'emplacement des tâches de maintenance.
Cette étape consiste à faire coïncider les lots de maintenance élaborés avec les fenêtres de temps non requis (Figure 52). Dans certains cas, les lots de maintenance peuvent être répartis sur plusieurs plages de temps non requis. Cette répartition est dûe au fait que la durée de ce lot de maintenance est supérieure à la durée de la plus grande plage de temps non requis compris dans le temps de référence.

$$\mathbf{Lot_i = Z_i_durée} \quad \text{(Eq 39)}$$

$$\mathbf{Si\ TNR_i \geq Lot_i}$$
$$\mathbf{Alors\ Lot_i \rightarrow TNR_i} \quad \text{(Eq 40)}$$

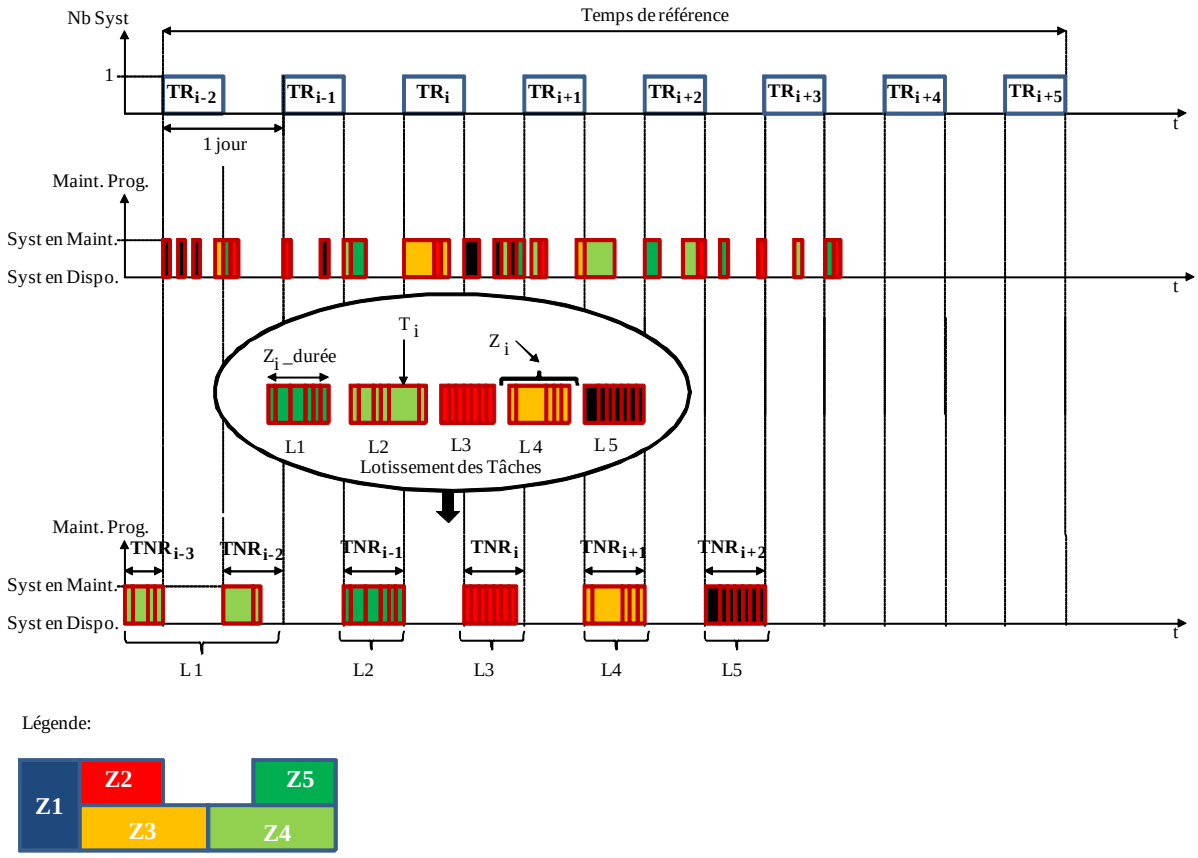


Figure 52. Principe d'agrégation des tâches de maintenance suivant les zones identifiées du système

Dans la figure ci-dessus nous avons représenté un exemple de réordonnancement par agrégation des tâches de maintenance en fonction des zones du système.
Nous avons illustré dans cette figure l'intérêt d'agréger les tâches de maintenance pour permettre à l'exploitant de mettre à disposition le nombre de système requis pendant les plages de temps TR_i et de réaliser la maintenance en temps masqué. Les tâches de maintenance ainsi sélectionnées présentent toutes de grandes périodicités permettant l'élaboration des lots de maintenance.

Dans cet exemple nous pouvons mettre en évidence le lot L5, qui regroupe l'ensemble des opérations de maintenance effectuées sur la zone 1 (Z1). Ce lot a été inséré dans l'intervalle de temps non requis TNR_{i+2} en raison des tolérances admises par les tâches. Ces tolérances ont permis de repousser l'ensemble des tâches de la zone jusqu'à cet intervalle de temps non requis.

- **Synthèse de(s) ordre(s) de maintenance (2.6)**

Cette étape consiste à dresser une synthèse des activités de maintenance en mettant en décrivant les lots de maintenance avec leurs dates de début ainsi que leur composition qui constitueront les ordres de maintenance.

III.3.2.3. Evaluation des performances

L'évaluation des performances de l'exploitation reprend les étapes d'évaluation énoncées dans le paragraphe précédent.

III.3.3. Synthèse

Cette heuristique consiste à regrouper les tâches de maintenance en fonction de leur emplacement par rapport au planning de missions. Ce type d'heuristiques se place dans le cadre du réordonnancement total et local définis comme nous l'avons présenté dans l'état de l'art (Chapitre IV).

III.4. Heuristique de réordonnancement par désagrégation

III.4.1. Présentation générale de l'heuristique

A l'inverse de l'heuristique précédente, cette heuristique permet de reconstruire un ordonnancement en proposant un lotissement des tâches de maintenance permettant à un exploitant d'étaler les opérations de maintenance sur une plus longue période.

Cette technique est habituellement appliquée pour réordonnancer un programme de maintenance de système hautement sollicité.

La description des flux d'entrées et de sorties de ce processus est quasiment similaire à la représentation de la dernière heuristique (Figure 53). Elle se distingue par les contraintes de lotissement (Nb lots de maintenance maximal, Temps maximal par lot).

III.4.2. Présentation détaillée de l'heuristique

Nous proposons un descriptif détaillé de l'heuristique de réordonnancement par désagrégation à travers la figure ci-dessous (Figure53).

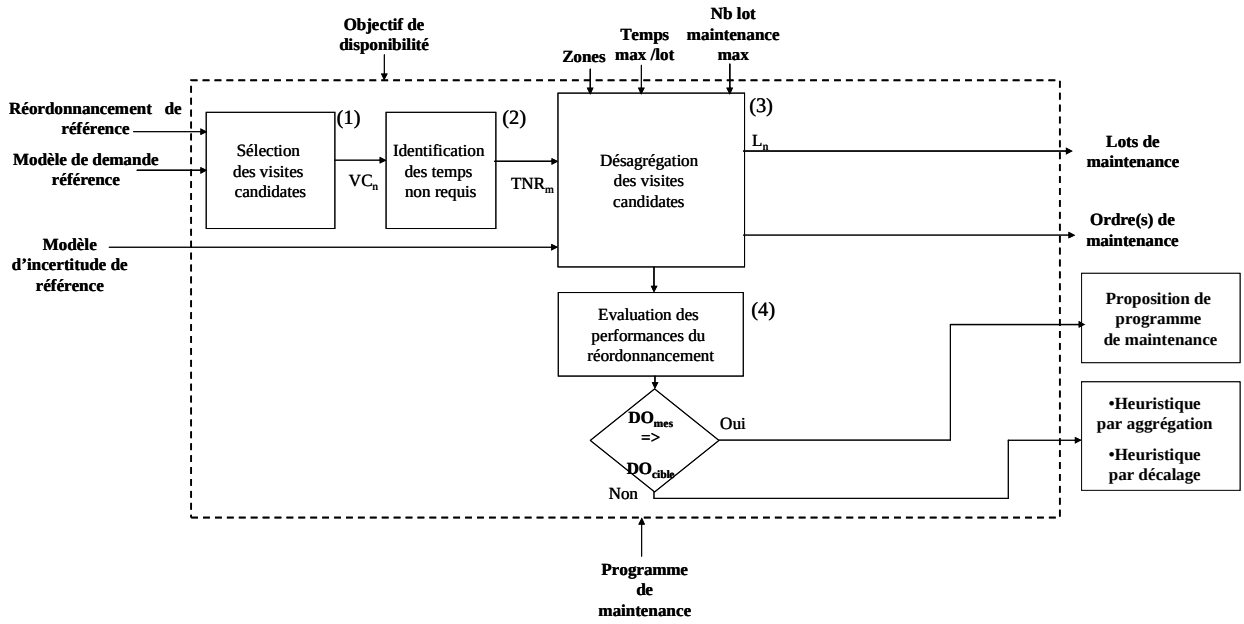


Figure 53. Démarche de réordonnancement par désagrégation

Cette heuristique est articulée autour de 4 processus : **Sélection des visites candidates (1)**, **Identification des Temps non requis (2)**, **Désagrégation des visites de maintenance (3)** et **Evaluation des performances (4)**.

III.4.2.1. Sélection des visites candidates

Cette étape consiste à cibler les visites **Vc** les plus pénalisantes pour la performance de l'ordonnancement. Cette sélection peut se baser sur la durée d'une visite de maintenance maximale. Chaque visite sélectionnée va être désagrégée pour être étalée dans les temps non requis. L'ensemble des visites ainsi sélectionnées seront regroupées sous l'ensemble Vc présenté dans la relation suivante (Equation 41) :

$$\mathbf{Vc} = \{\mathbf{Vc_1}, \mathbf{Vc_2}, .., \mathbf{Vc_n}\} \quad \text{(Eq 41)}$$

III.4.2.2. Identification des temps non requis

Ce processus consiste à parcourir le planning de demande pour comptabiliser les fenêtres de temps non requis. Cette étape est similaire à celle du paragraphe III.3.2.1.

III.4.2.3. Désagrégation des visites de maintenance

De la même manière, le processus de désagrégation des visites de maintenance peut suivre deux procédés : réordonnancement suivant le temps d'immobilisation et le réordonnancement suivant le zonage du système. Nous allons reprendre chacun de ces procédés ci-dessous.

III.4.2.3.1. Réordonnancement suivant le temps d'immobilisation

Ce mode de réordonnancement permet de trier les tâches de maintenance en fonction du temps d'immobilisation engendré par ces tâches (Figure 54).Pour ce faire quatre étapes sont nécessaires :

- **Sélection des tâches de maintenance (3.1)**,
- **Génération de stratégies de désagrégation (3.2)**,
- **Elaboration des lots (3.3),**
- **Synthèse de(s) ordre(s) de maintenance (3.4).**

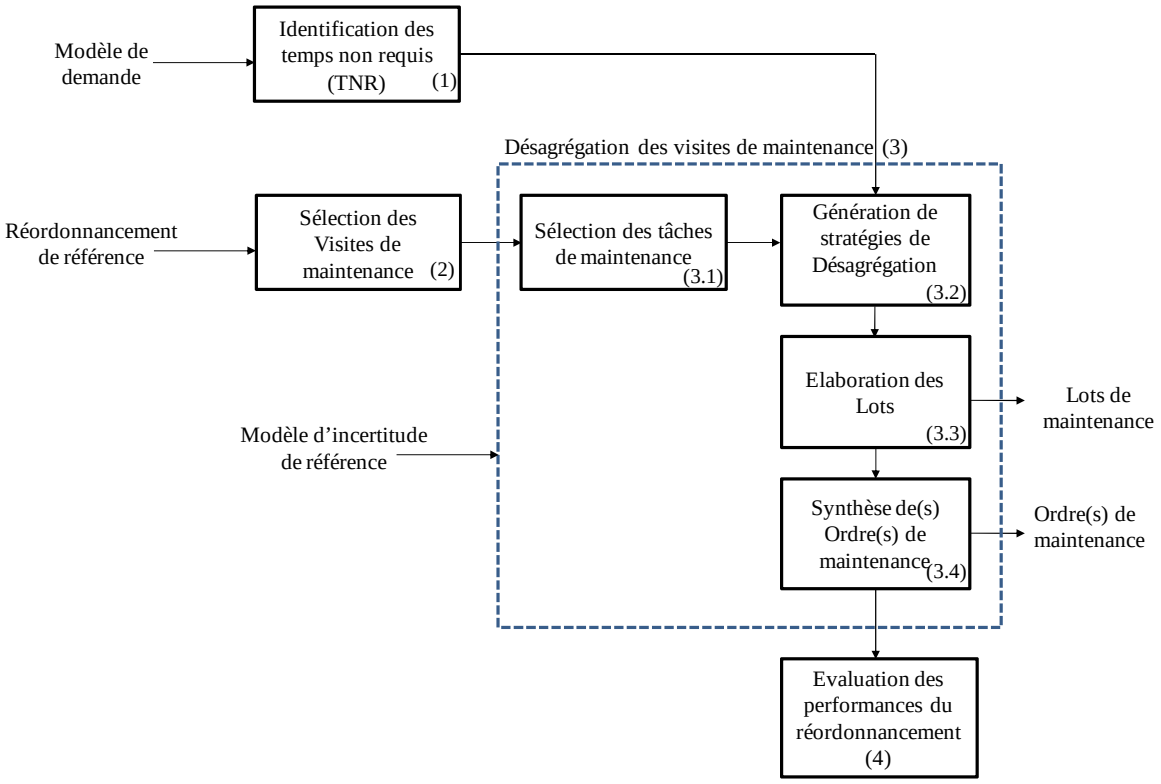


Figure 54. Processus de réordonnancement par désagrégation suivant le temps d'immobilisation du système

Les étapes (3.1) (3.3) et (3.4) sont identiques aux étapes que nous avons décrites dans l'heuristique de réordonnancement par agrégation. Nous allons ci-dessous expliciter la génération de stratégie de désagrégation (3.2).

- **Génération de stratégies de désagrégation (3.2)**

Cette étape consiste à générer des solutions de réordonnancement reposant sur plusieurs stratégies de désagrégation (Figure 55). Les solutions de désagrégation sont liées à la méthode de tri des tâches de maintenance dans chacun des Temps Non Requis (TNR). Dans l'exemple ci-dessous nous présentons deux solutions de réordonnancement :
- les tâches seront triées par ordre décroissant de durée (Solution 1).
- les tâches seront triées par ordre d'arrivée dans le temps (Solution 2).

La première solution consiste à classer les tâches par ordre décroissant de durée. Dans cet exemple, le classement des tâches donne l'ordre suivant :

$$C= \{T6; T7; T8; T1; T2; T3; T4; T5\} \text{ (Eq 42)}$$

A la suite de ce classement, chaque tâche sera sélectionnée consécutivement et placée dans le temps non requis ayant la durée suffisante.

La deuxième solution consiste à conserver le classement d'origine des tâches de maintenance et de les placer successivement dans les temps non requis.

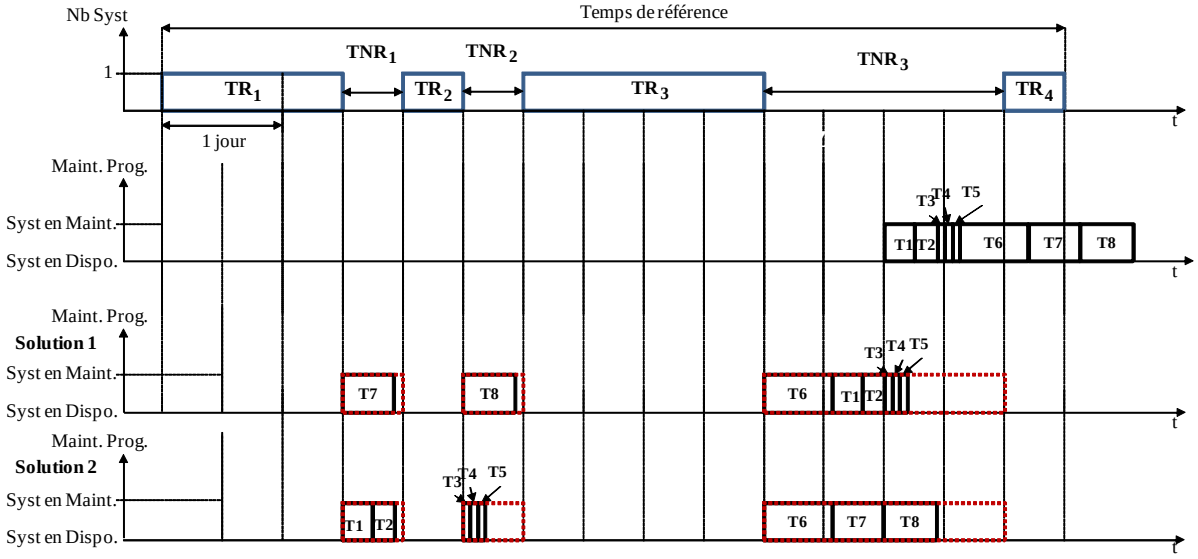


Figure 55. Description des stratégies de désagrégation possibles

Les stratégies de désagrégation peuvent être nombreuses, elles doivent cependant être spécifiques au cas d'application.

III.4.2.3.2. Réordonnancement suivant le zonage du système

Ce mode de réordonnancement permet de trier les tâches de maintenance en fonction de l'emplacement des opérations à réaliser sur le système. Nous définirons ces emplacements par des zones (Figure 56). Pour ce faire six étapes sont nécessaires :

- **Définition des zones du système (3.1),**
- **Sélection des tâches de maintenance (3.2),**
- **Correspondance entre tâches sélectionnées et zones identifiées (3.3),**
- **Estimations des durées de maintenance par zones (3.4),**
- **Elaboration des lots de maintenance (3.5),**
- **Synthèse des ordre(s) de maintenance (3.6)**.

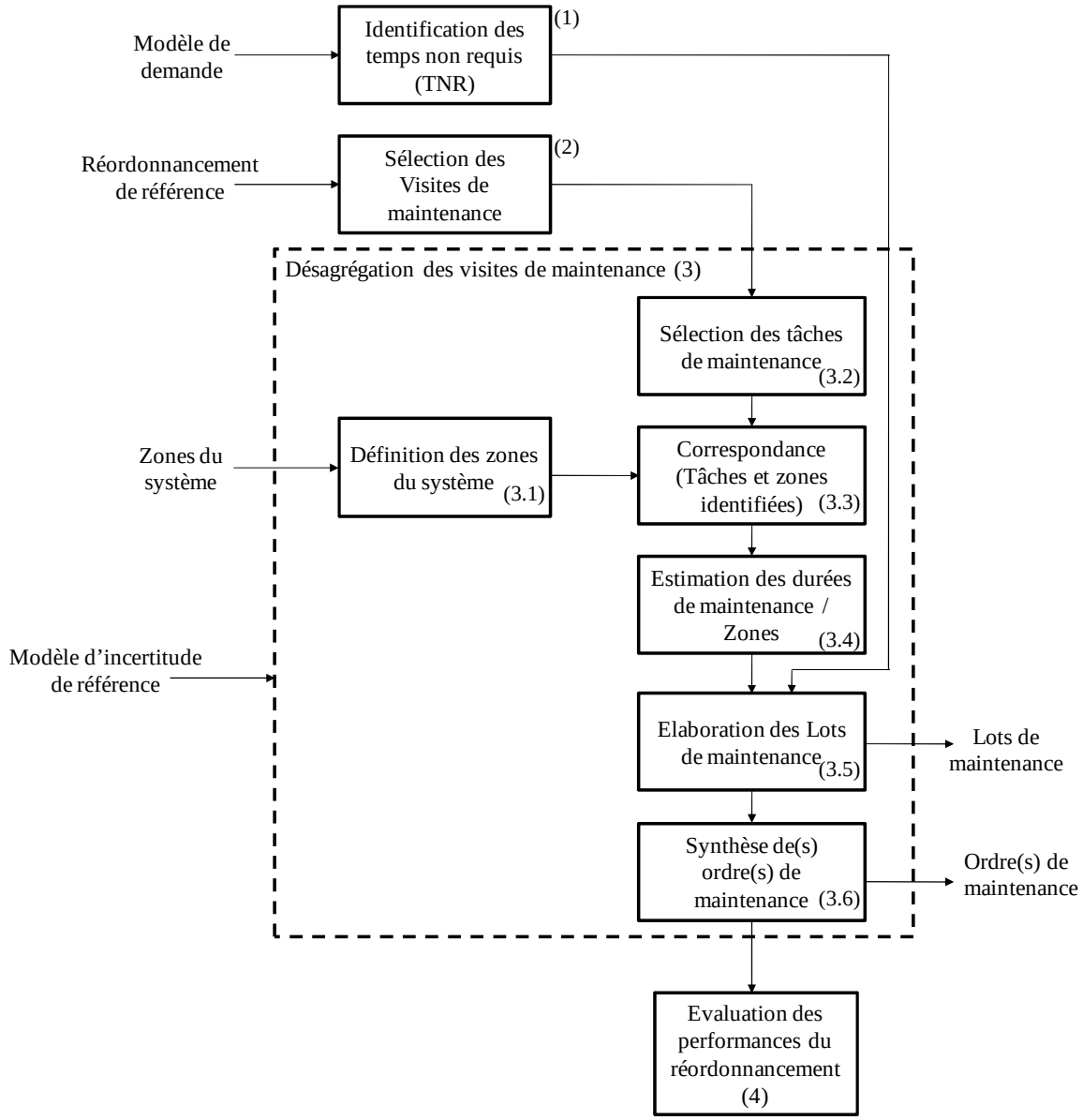


Figure 56. Processus de réordonnancement par désagrégation suivant le zonage du système

Les étapes présentées dans la figure ci-dessus sont identiques aux étapes que nous avons décrites dans l'heuristique de réordonnancement par agrégation. Nous allons ci-dessous présenter le principe de désagrégation à travers la figure ci-dessous (Figure 57).

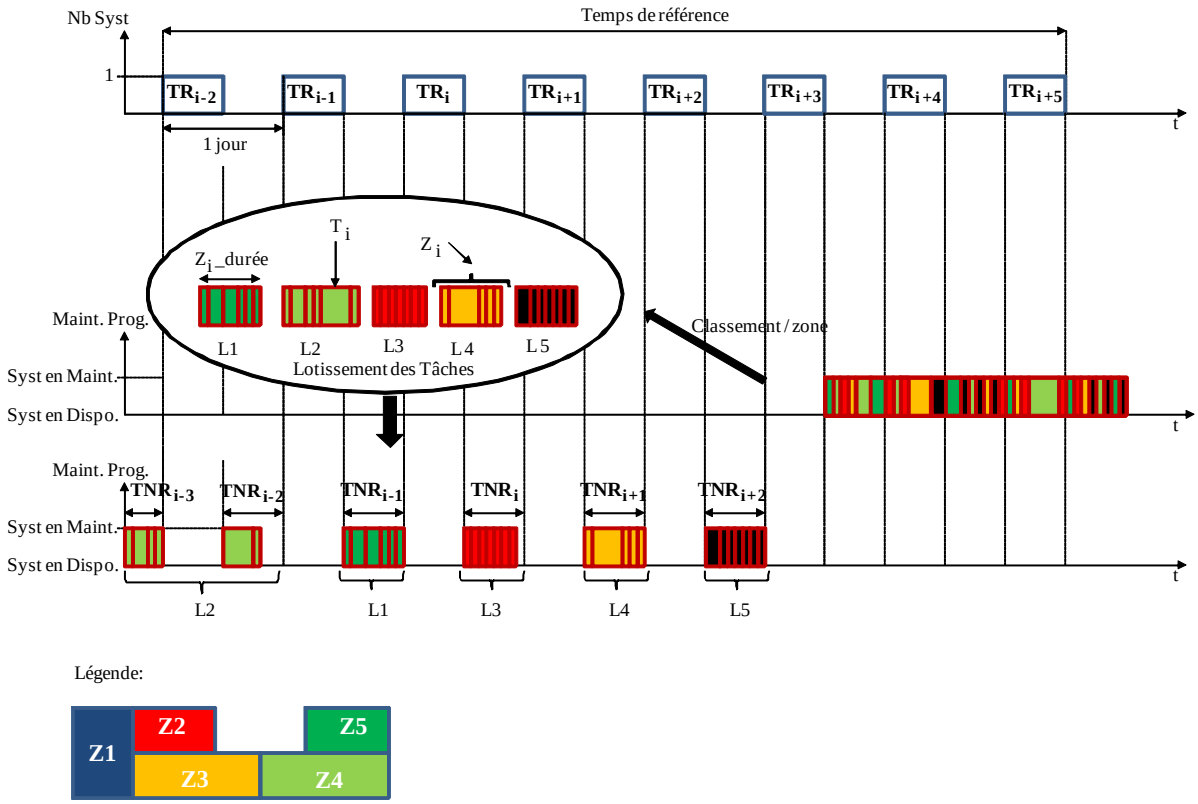


Figure 57. Principe de désagrégation de visites par zonage

De cette figure, nous pouvons déduire que ce type de réordonnancement convient pour la répartition des opérations de maintenance au cours du temps. Les lots de tâches seront placés avant l'arrivée de la date de visite initiale.

III.4.2.4. Evaluation des performances

L'évaluation des performances est similaire à l'évaluation réalisée dans le paragraphe précédent.

III.4.3. Synthèse

Ce type d'heuristiques consiste à désagréger les visites d'un programme de maintenance. Contrairement aux deux autres heuristiques qui se placent dans le cadre du réordonnancement total ou local, ce type d'heuristiques est plutôt exploité pour un réordonnancement partiel. Dans ce type d'ordonnancement, on s'intéresse à un groupe ou ensemble de tâches d'un planning de maintenance.

IV. BILAN DE LA MODELISATION

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode permettant d'améliorer le réordonnancement d'un programme de maintenance en vue d'optimiser la disponibilité d'un ensemble de systèmes.
Cette méthode repose sur 4 parties distinctes : Etat des lieux, Sélection des heuristiques adaptées, Proposition de programme de maintenance et Mise en œuvre du programme de maintenance. Dans le cadre de cette méthode, nous avons proposé des heuristiques permettant de traiter et de réordonnancer les opérations de maintenance en fonction des opportunités d'un exploitant de système.

Les heuristiques que nous proposons dans cette thèse regroupent des opérations de décalage, d'agrégation et de désagrégation d'activités de maintenance. Le retour d'expérience des industriels montre un intérêt pour l'utilisation de ces méthodes de réordonnancement des activités de maintenance. Ce retour d'expert montre que ces méthodes ne peuvent pas être appliquées directement sur l'exploitation analysée, elles doivent faire l'objet d'adaptation dans ce qui concerne l'identification des contraintes de maintenance et des ressources mais également dans la définition des critères de réordonnancement en d'autres termes ce que l'on va chercher à optimiser en utilisant ces heuristiques. Dans notre cas, nous nous sommes penchés sur l'amélioration de la disponibilité, mais elles peuvent être également intéressantes pour le dimensionnement des ressources nécessaires à la maintenance. Nous présentons en annexes des cas d'études liés à l'utilisation de ces heuristiques sur des systèmes complexes différents.

CHAPITRE VII :

Application de la méthodologie pour la maîtrise de la disponibilité d'une flotte d'hélicoptères

Résumé

Nous décrirons dans ce chapitre la mise en œuvre des propositions visant à améliorer les performances de l'exploitation d'une flotte d'hélicoptères en termes de disponibilité.
L'application de nos propositions sera structurée en 3 temps.
Dans un premier temps nous avons présenté la démarche permettant d'évaluer la disponibilité d'une flotte d'aéronefs. Dans un deuxième temps, nous avons analysé les principaux contributeurs à l'indisponibilité sur lesquels nous pourrions nous focaliser pour améliorer la disponibilité. Dans un dernier temps, nous avons recentré notre étude sur le réordonnancement du programme de maintenance de cette flotte.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE VII : APPLICATION DE LA METHODOLOGIE POUR LA MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE D'UNE FLOTTE D'HELICOPTERES

I. CONTEXTE 166
I.1. Confidentialité des résultats 166
I.2. Exploitation étudiée 166
I.2.1. Description des caractéristiques organisationnelles 167
I.2.2. Description de la demande 167
II. MODELISATION DE L'EXPLOITATION ET EVALUATION DE LA DISPONIBILITE 168
II.1. Introduction 168
II.2. Modélisation déterministe de l'exploitation 169
II.2.1. Modélisation de la demande 169
II.2.2. Modélisation de l'affectation 170
II.2.3. Modélisation de la maintenance 170
II.2.3.1. Modélisation de la maintenance programmée 170
II.2.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée 176
II.2.4. Evaluation de la disponibilité 180
II.3. Modélisation stochastique de l'exploitation 181
II.3.1. Modélisation de la maintenance 181
II.3.1.1. Modélisation de la maintenance programmée 181
II.3.1.2. Modélisation de la maintenance non programmée 185
II.3.2. Evaluation de la disponibilité 187
II.4. Conclusions 187
III. ANALYSE DES LEVIERS D'AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE 188
III.1. Introduction 188
III.2. Analyse des gains en disponibilité 189
III.2.1. Analyse de sensibilité 189
III.2.2. Bilan et Recommandations 191
III.3. Conclusions 191
IV. AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE PAR L'OPTIMISATION DU PROGRAMME DE MAINTENANCE 192
IV.1. Introduction 192
IV.2. Analyse du Programme de maintenance 192
IV.2.1. Sélection des heuristiques potentielles 192
IV.2.2. Proposition du programme de maintenance 193
IV.2.3. Mise en place du programme de maintenance 198
V. BILAN DE L'ETUDE : VERS UN MODELE DE MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE DE L'EXPLOITATION 198

Chapitre VII :
Application de la méthodologie pour la maîtrise de la disponibilité d'une flotte d'hélicoptères

---

« L'expérience est une observation provoquée dans le but de faire naître une idée ».

Claude BERNARD[5]

Dans ce chapitre, nous présentons une application des concepts proposés dans cette thèse. Le choix du domaine d'étude s'est tourné vers des exploitants d'hélicoptères : Ce travail de thèse a en effet été effectué, sous forme de contrat CIFRE, avec la société EUROCOPTER, leader mondial dans la construction d'hélicoptères.

Depuis quelques années, les constructeurs d'hélicoptères et en particulier EUROCOPTER s'intéressent de plus en plus à la proposition de prestations de service « en disponibilité ». Ces prestations de service peuvent être de niveaux d'engagement différents allant de la livraison des pièces en temps garanti au succès de réalisation d'une mission en passant par le maintien en condition opérationnelle d'une flotte avec un niveau de disponibilité garanti.

La proposition de ce type de prestations de service nécessite une grande connaissance de l'organisation d'un exploitant et par extension d'une capacité de maîtrise de la disponibilité d'une flotte de systèmes.

Les exploitants de flotte d'hélicoptères sont les principaux « clients » de notre étude, puisqu'ils ont un intérêt vital à **maîtriser la disponibilité de leur flotte** qui est un vecteur prépondérant de la rentabilité de leur exploitation.

Cette démarche de maîtrise de la disponibilité est présentée dans ce chapitre à travers cinq paragraphes.
Le premier paragraphe précise le **contexte d'étude** dans lequel sera présentée l'exploitation.

[5] Extrait d'*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*

Le deuxième paragraphe met en œuvre la **méthode de modélisation de l'exploitation** permettant d'aboutir à une évaluation de la disponibilité.
Le troisième paragraphe présente une **analyse des leviers d'amélioration de la disponibilité**.
Le quatrième paragraphe présente un levier d'amélioration de la disponibilité en utilisant la **méthode de réordonnancement d'un programme de maintenance** d'une flotte d'hélicoptères.
Le dernier paragraphe présente **un bilan de l'étude** réalisée sur l'exploitation. Cette synthèse permettra de caractériser ce que nous appellerons un **modèle de maîtrise de la disponibilité**.

I. CONTEXTE

I.1. Confidentialité des résultats

Dans l'aéronautique comme dans de nombreux domaines, certaines données sont jugées confidentielles. Ces données (fiabilité, disponibilité, coût de maintenance, etc..) font l'objet de risque concurrentiel et impliquent des sous-traitants, équipementiers et clients à qui nous devons un respect de discrétion.

Dans ce cadre, l'exploitation étudiée et les résultats présentés dans ce document sont fictifs. Toutefois, pour garder un aspect pertinent, nous nous sommes attachés à élaborer un cas d'étude vraisemblable, dans la définition comme dans l'exécution.

I.2. Exploitation étudiée

Les propositions expérimentales de nos modèles sont réalisées sur une exploitation d'hélicoptères militaires choisie pour les raisons suivantes : sa simplicité globale (afin de limiter l'exemple) et son intérêt potentiel en termes de disponibilité.

Notons qu'à ce jour, Eurocopter utilise les méthodes proposées ici pour des analyses de disponibilité réalisées dans le cadre d'offres de prestations de service en disponibilité, d'amélioration de la maintenance et de maîtrise de la disponibilité. L'entreprise dispose d'un retour d'expérience sur des exploitations représentatives des différents environnements opérationnels, ce qui a donc permis de valider nos modèles sur des cas réels.

Dans ce paragraphe, nous présentons les caractéristiques organisationnelles et d'exploitation. Cette étude (Figure 58) s'appuie sur une exploitation d'aéronefs

destinés à la surveillance territoriale. Nous pouvons retrouver ce type d'activité dans les organisations douanières, de gardes frontières, de sécurité civile,…

I.2.1. Description des caractéristiques organisationnelles

- **Flotte**. Cette exploitation est constituée de 4 aéronefs de même type et équipés de manière identique.

- **Maintenance**. Dans cette exploitation, les niveaux de maintenance[12] O et I sont réalisés par l'intermédiaire des ressources présentées dans la cartographie de l'exploitation (Figure 58). La maintenance de ces aéronefs suit le programme de maintenance de chaque appareil.

- **Logistique**. L'exploitation est constituée d'un entrepôt de stockage permettant la gestion des pièces de rechange et des outillages utilisés au cours d'une opération de maintenance.
  Un entrepôt régional est implanté à proximité de l'exploitation permettant de réguler le niveau de stock de pièces de rechange fourni par le constructeur. Cet entrepôt permet l'acheminement des pièces de rechange et des outillages vers l'exploitation en 15 jours ouvrés. Dans le cas d'une commande de pièces de rechange ou d'outillage auprès du constructeur, 45 jours ouvrés d'acheminement seront nécessaires pour fournir l'élément demandé à l'exploitant.

I.2.2. Description de la demande

- **Caractéristique de demande à court terme**. L'exploitation de cette flotte a pour objectif de réaliser des missions de surveillance territoriale. Elle consiste à survoler les points P1 à P6, situés à une distance moyenne d'1 heure de vol de l'exploitation.
  La durée maximale de mission est définie pour 2 heures.

- **Caractéristique de demande à long terme**. L'exploitation est opérationnelle 24 h/24, 300 jours par an. L'exploitation repose sur une demande déterministe constituée de 4 périodes d'activités au cours de l'année.

[12] Dans l'industrie aéronautique, les activités de maintenance sont classées selon 3 niveaux de maintenance O, I, D. Le niveau O représente l'ensemble des opérations de réparation ou d'échange standard d'un équipement au pied de l'appareil. Le niveau I regroupe les opérations de maintenance effectuée sur des équipements précis au pied de l'appareil ou en atelier. Le niveau D correspond aux opérations de maintenance effectuées par exemple sur des cartes électroniques. Ces opérations nécessitent en général des bancs de test et sont en général réalisées par l'équipementier en charge de l'équipement.

Nous présentons dans la figure 58 le détail des infrastructures de cette exploitation concernant la typologie des missions, le nombre d'ateliers de maintenance, gestion de stock, etc... (Figure 58).

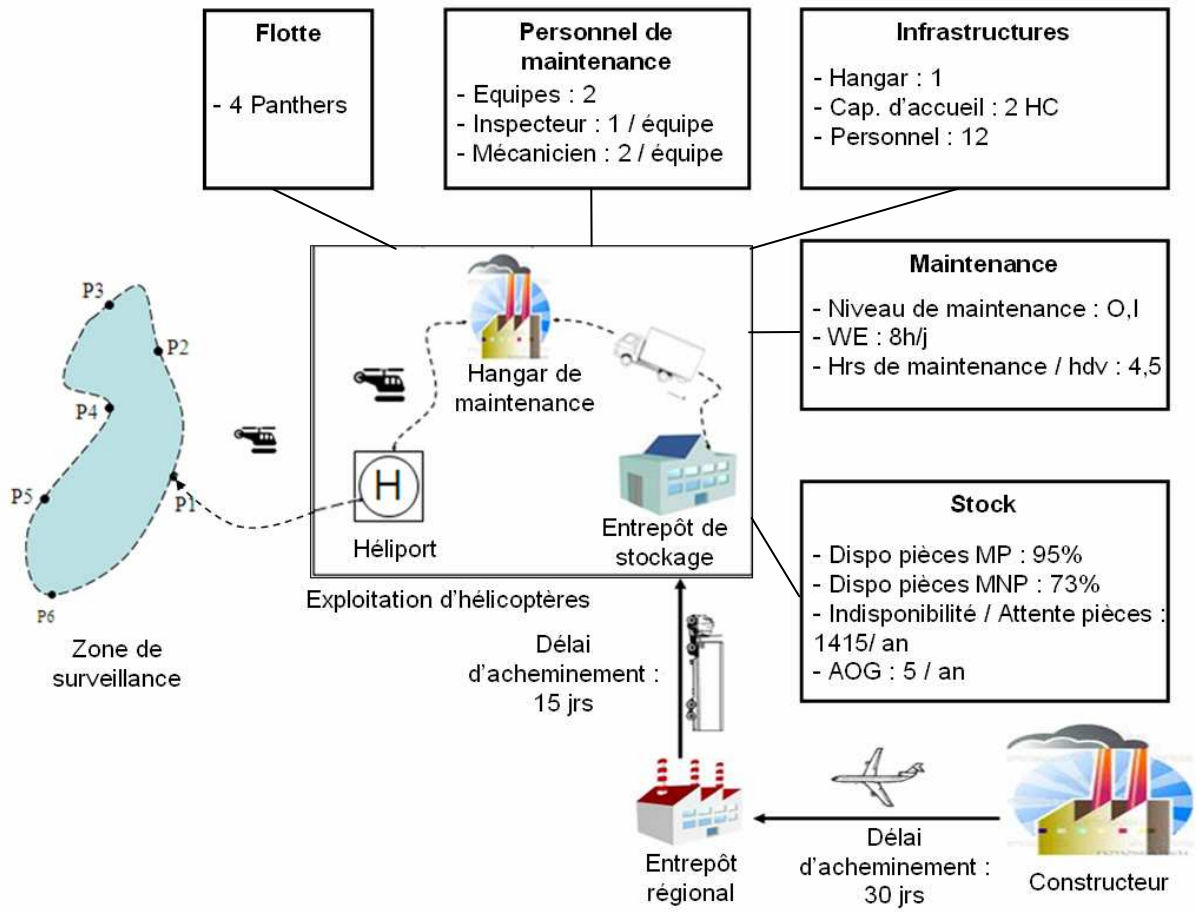


Figure 58. Cartographie de l'exploitation

A travers cette étude de cas, nous proposons de **modéliser l'exploitation en vue d'évaluer la disponibilité** sur une période d'un an et de **proposer des éléments d'amélioration de la disponibilité** permettant une disponibilité opérationnelle annuelle de 75% et une disponibilité de service annuelle de 100%.

II. MODELISATION DE L'EXPLOITATION ET EVALUATION DE LA DISPONIBILITE

II.1. Introduction

Dans ce paragraphe, nous présentons la démarche de modélisation de l'exploitation présentée sous une approche déterministe dans un premier temps

et sous une approche stochastique dans un second temps. Ces deux approches permettront de comparer les résultats issus de ces deux analyses.

II.2. Modélisation déterministe de l'exploitation

Dans ce paragraphe, nous présenterons les différentes étapes de modélisation en proposant une analyse de la demande, de l'affectation, de la maintenance et enfin de l'évaluation de la disponibilité.

II.2.1. Modélisation de la demande

Cette exploitation traite deux types de missions : la surveillance et la formation au pilotage. La première activité représente 700 heures de vol (hdv) pour les 4 aéronefs alors que la deuxième activité ne représente que 400 hdv (Tableau 17).

Type de mission	Surveillance	Formation
Temps de fonctionnement [hdv]	700	400
Durée de mission [hdv]	2	
Créneau requis [hrs/hrs – j/7j]	8hrs/24hrs (7hrs → 17hrs) 7j/7j	
jours ouvrés [j/an]	235	65

Tableau 17. Caractéristique de la demande

Les caractéristiques de la demande décrites dans le Tableau 17, permettent de proposer le modèle de demande dans la table ci-dessous (Tableau 18). Ce tableau présente les périodes d'activités, les dates de début et de fin de chaque période et le nombre d'appareils requis.

Période d'activités	Date de Début	Date de Fin	Nb Systèmes Requis
P1	15 Sept. 09	15 Nov. 09	2
P2	15 Déc. 09	15 Janv. 10	1
P3	15 Févr. 10	15 Mars 10	1
P4	30 Avril. 10	15 Sept 10	4

Tableau 18. Description du modèle de demande

II.2.2. Modélisation de l'affectation

Dans cette exploitation, l'affectation de ces aéronefs se fait par groupe de 2 aéronefs. Nous admettrons que le groupe 1 sera constitué des aéronefs HC1 et HC2 et le groupe 2, des aéronefs HC3 et HC4. Chaque sous groupe présentera son propre taux d'affectation. Nous avons représenté ci-dessous le temps de fonctionnement prévisionnel de chaque aéronef (Tableau 19).

Groupe	**Aéronefs (HC)**	**Affectation Niveau Groupe**	**Affectation Niveau système**	**Temps de fonctionnement après affectation (TF) [hdv]**
G1	HC1	50%	50% (G1)	274
	HC2		50% (G1)	274
G2	HC3	50%	50% (G2)	274
	HC4		50% (G2)	274

Tableau 19. Temps de fonctionnement après affectations des aéronefs

II.2.3. Modélisation de la maintenance

II.2.3.1. Modélisation de la maintenance programmée

Dans ce paragraphe, nous ferons une analyse descriptive des paramètres pris en compte dans la maintenance programmée comme : l'état initial de chaque aéronef, les différents types de visites de maintenance par aéronef et les durées associées à chaque visite.

L'état initial de chaque aéronef décrit le point de départ de l'étude. L'état initial d'un aéronef est ici quantifié par le nombre d'heures de vol capitalisé. Dans notre étude, les états initiaux des aéronefs sont estimés dans la table suivante (Tableau 20):

Aéronefs	**Etat calendaire Initial [hdv]**
HC1	100
HC2	500
HC3	3000
HC4	2000

Tableau 20. Etat initial de chaque aéronef

L'état initial d'un aéronef va conditionner l'atteinte d'une échéance de maintenance. En effet, une visite qui devra être faite toutes les 6000hrs de fonctionnement pour un aéronef avec un état calendaire initial de 100hrs et un temps de fonctionnement annuel de 600 hrs, surviendra au bout de 10 ans et donc n'impactera pas sa disponibilité annuelle pendant les 9 premières années.

Pour ce qui concerne, les différents types de visites de maintenance programmée, nous considérons : les ***visites Supplémentaires*** (S), les ***visites Techniques*** (T) et les ***Grandes Visites*** (GV) explicités dans [Djeridi et al., 10].
D'un aéronef à un autre, les échéances des différentes visites de maintenance peuvent varier de par sa fiabilité, sa maintenabilité ou encore par son architecture. Nous présentons dans le tableau ci-dessous les échéances des aéronefs (Tableau 21).

HC	Echéances de visites Supplémentaires (S)		Echéances de visites Techniques (T)		Echéances de Grande Visite (GV)	
	Ech.S [Hdv]	Durée nom. [Hrs /1pers]	Ech.T [Hdv]	Durée nom. [Hrs / 1 pers]	Ech.GV [Hdv]	Durée nom. [Hrs/1pers]
HC1	50	30	500	120	5000	300
HC2	75	35	750	150	6000	350
HC3	100	40	800	170	7000	400
HC4	200	45	900	190	8000	450

Tableau 21. Description des échéances et des durées de visites de maintenance par aéronef

Pour chaque échéance de visite représentée dans le Tableau 21, il est nécessaire de prendre en compte la durée nominale de chaque visite fournie par le programme de maintenance du constructeur.

A partir de ce tableau, nous allons évaluer puis représenter la disponibilité opérationnelle de la flotte dans un **premier cas** à **ressources infinies** et dans un **deuxième cas** à **ressources finies**.

- Analyse du temps de maintenance programmée (Ressources infinies)

Dans ce premier cas, nous ne prendrons pas en compte les indisponibilités liées aux ressources (main d'œuvre, pièces de rechange et outillages). De l'équation (8) présentée dans le chapitre précédent et des données du Tableau 22, nous

avons estimé le temps moyen de maintenance programmée pour chaque appareil UT_SM_{HC1}, $UT_SM_{HC2,}$ $UT_SM_{HC3,}$ UT_SM_{HC4}. Nous présentons ci-dessous l'estimation de UT_SM_{HC1} et par extension UT_SM_{Flotte} :

$$UT_SM_{HC1} = \begin{pmatrix} ENT\left(\frac{TF_{HC1}}{Ech.S._{HC1}}\right) * durée_nom.S._{HC1} \\ ENT\left(\frac{TF_{HC1}}{Ech.T._{HC1}}\right) * durée_nom.T._{HC1} \\ ENT\left(\frac{TF_{HC1}}{Ech.GV._{HC1}}\right) * durée_nom.GV._{HC1} \end{pmatrix}$$

$$UT_SM_{HC1} = 150\,\text{hrs}$$

$$UT_SM_{Flotte} = UT_SM_{HC1} + UT_SM_{HC2} + UT_SM_{HC3} + UT_SM_{HC4}$$

$$UT_SM_{Flotte} = 735\,\text{hrs}$$

- Analyse du temps de maintenance programmée (Ressources finies)

Dans le cas où nous devons prendre en compte les ressources liées à la maintenance, les paramètres présentés dans le Tableau 21 ne sont pas suffisants. Nous utiliserons en plus de ces paramètres, le **besoin maximal en personnel (MO max)** pour chaque échéance de maintenance (Tableau 22).

	HC1		HC2		HC3		HC4	
	Durée nom.	MO max	Durée nom.	MO max	Durée nom.	MO max	Durée nom.	MO max
S	30	2	35	2	40	2	45	2
T	120	3	150	3	170	3	190	3
GV	300	4	350	4	400	4	450	4

Tableau 22. Description des durées nominales et du besoin en Main d'œuvre maximal par échéance de maintenance

La gestion des Pièces de rechange est estimée à partir des données recueillies sur le terrain pour l'année antérieure. La disponibilité des pièces de rechange dédiée à la Maintenance Programmée est estimée à 95 %. Cette estimation signifie que 95% des pièces nécessaires sont présents et ce, sur le temps de référence. Pour les 5% d'indisponibilité de pièces, nous utiliserons un délai de mise à disposition moyen de 48h calendaires permettant l'acheminement des pièces manquantes.

Nous avons évalué à nouveau le temps moyen de maintenance programmée pour chaque appareil UT_SM_{HC1}, $UT_SM_{HC2,}$ $UT_SM_{HC3,}$ UT_SM_{HC4} et présenté ci-dessous l'évaluation de UT_SM_{HC1} et de UT_SM_{Flotte} :

$$UT_SM_{HC1} = 165\,\text{hrs}$$

$$UT_SM_{Flotte} = 810\,\text{hrs}$$

Des évaluations d'UT_SM, nous proposons un planning d'exploitation sous forme d'un diagramme de Gantt (Figure 59) construit autour d'un planning de demande, d'un planning de missions et d'un planning de maintenance de la flotte.

Ce tableau met en évidence les éléments suivants:

- Le temps de référence défini du 15 septembre 2009 au 30 août 2010,
- Le planning de demande présentant les 4 périodes d'activités (P1, P2, P3, P4) avec le nombre d'appareils,
- Le planning de missions présentant les objectifs en hdv à réaliser par chaque appareil,
- Le décompte des hdv à partir de l'état initial en hdv de chaque appareil jusqu'à la fin de la période de référence.
- Le planning de maintenance mettant en évidence les échéances de maintenance pour chaque appareil.

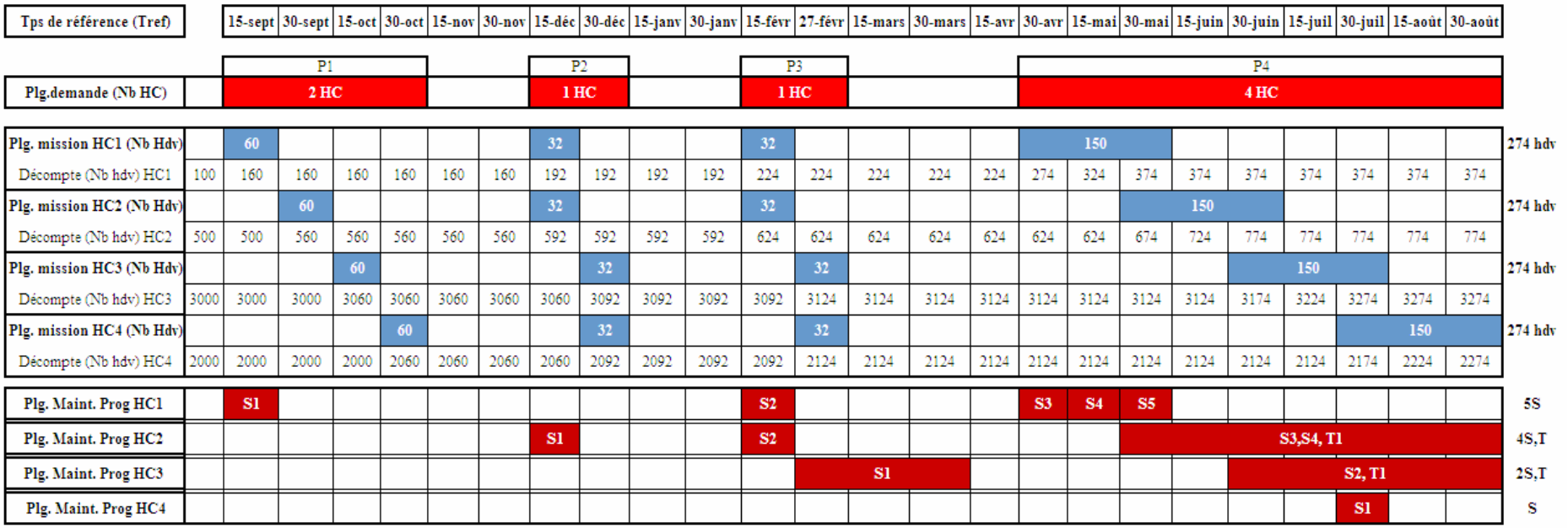


Figure 59. Diagramme de Gantt présentant l'exploitation de la flotte (Planning de demande et Planning de maintenance)

La planification des échéances de maintenance est définie par les 4 paramètres suivants :

- La date début de l'échéance de maintenance,
- La charge de travail associée à l'échéance,
- La durée calendaire résultant de la charge de travail,
- La date d'achèvement de l'échéance de maintenance.

Nous rappelons que l'exploitation mobilise 2 équipes d'opérateurs de maintenance pour une journée de travail de 8h (Figure 59). La capacité de travail est de 32 hrs/ jour.

Nous avons présenté à partir de cette figure, la synthèse de ces échéances de maintenance par période d'activité et par appareil. Les durées calendaires des opérations de maintenance sont estimées pour une disponibilité des ressources infinies (Tableau 23).

Période	Échéance	HC	Date début	Charge	Durée	Date fin
P1	S1	HC1	26-sept	15h/ 2H	1 j	27-sept
P2	S1	HC2	19-déc.	18h/2H	2 j	21-déc.
P3	**S2**	**HC1**	**17-févr.**	**15h/ 2H**	**1 j**	**18-févr.**
	S2	**HC2**	**17-févr.**	**18h/2H**	**2 j**	**19-févr.**
	S1	HC3	1-mars	20h/2H	2 j	03-mars
P4	S3	HC1	07-mai	15h/ 2H	1 j	08-mai
	S4	HC1	21-mai	15h/ 2H	1 j	22-mai
	S5	HC1	05-juin	15h/ 2H	1 j	06-juin
	S3	HC2	12-juin	18h/2H	2 j	14-juin
	S4	**HC2**	**02-juil.**	**18h/2H**	**2 j**	**04-juil.**
	T1	**HC2**	**02-juil.**	**50h/3H**	**2 j**	**04-juil.**
	S2	**HC3**	**18-juil.**	**20h/2H**	**2 j**	**20-juil.**
	T1	**HC3**	**18-juil.**	**57h/3H**	**3 j**	**21-juil**
	S1	HC4	18-août	22h/2H	2 j	20-août

Tableau 23. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil (Planification initiale)

A l'issue de cette synthèse, nous pouvons remarquer des échéances de maintenance planifiées sur le même instant entrainant un déficit de charge dans les périodes P3 et P4 surlignées en gris.

Nous présentons dans le tableau ci-dessous (Tableau 24) la synthèse des échéances de maintenance avec des durées opératoires consolidées adaptées à la charge en main d'œuvre de l'exploitation.

Période	Échéance	HC	Date début	Charge	Durée	Date fin initiale	Délai d'opération	Date fin consolidée
P1	S1	HC1	26-sept	15h/ 2H	1 j	27-sept		
P2	S1	HC2	19-déc.	18h/2H	2 j	21-déc.		
P3	**S2**	**HC1**	**17-févr.**	**15h/ 2H**	**1 j**	**18-févr.**		
	S2	**HC2**	**17-févr.**	**18h/2H**	**2 j**	**19-févr.**	**1 j**	**20-févr.**
	S1	HC3	1-mars	20h/2H	2 j	03-mars		
P4	S3	HC1	07-mai	15h/ 2H	1 j	08-mai		
	S4	HC1	21-mai	15h/ 2H	1 j	22-mai		
	S5	HC1	05-juin	15h/ 2H	1 j	06-juin		
	S3	HC2	12-juin	18h/2H	2 j	14-juin		
	S4	**HC2**	**02-juil.**	**18h/2H**	**2 j**	**04-juil.**		
	T1	**HC2**	**02-juil.**	**50h/3H**	**2 j**	**04-juil.**	**2 j**	**06-juil.**
	S2	**HC3**	**18-juil.**	**20h/2H**	**2 j**	**20-juil.**		
	T1	**HC3**	**18-juil.**	**57h/3H**	**3 j**	**21-juil.**	**2 j**	**23-juil.**
	S1	HC4	18-août	22h/2H	2 j	20-août		

Tableau 24. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil (Planification consolidée)

Ce paragraphe a permis d'établir une synthèse des échéances de maintenance programmée de la flotte avec l'ensemble des ressources associées. Nous allons par la suite analyser la maintenance non programmée.

II.2.3.2. Modélisation de la maintenance non programmée

Dans ce paragraphe, nous allons décrire les paramètres pris en compte dans la maintenance non programmée comme : la fiabilité des aéronefs, les temps de diagnostic et les temps de réparation. La fiabilité des aéronefs dépend en partie de la manière dont la maintenance programmée est opérée. Dans notre étude, nous utiliserons une fiabilité globale de l'aéronef obtenue à partir d'un historique dans lequel nous avons mesuré le temps moyen entre 2 défaillances. Ce temps sera présenté par la fiabilité en hdv dans le tableau ci-dessous (Tableau 25).

Aéronefs	Fiabilité (hdv)	Nb de pannes	Délai de rétablissement (hrs)
HC1	15	18	3
HC2	18	15	
HC3	15	18	
HC4	20	14	

Tableau 25. Etat de la fiabilité des aéronefs et du nombre de pannes potentielles

Dans le cadre de la modélisation déterministe, nous proposons une durée moyenne du temps de rétablissement d'un système après une défaillance comprenant le temps de diagnostic et le temps de réparation. Le positionnement des défaillances sur le planning d'exploitation est effectué de manière cyclique. Nous admettrons que le cycle est utilisé comme le temps moyen de bon fonctionnement et par extension comme la fiabilité en hdv d'un aéronef. Nous présentons ci-dessous à titre d'exemple, une synthèse des dates des différentes défaillances pour l'appareil HC1 (Tableau 26).

Période	Défaillance	Date début	Durée
P1	D1	17-sept	3 hrs
	D2	19-sept	
	D3	22-sept	
	D4	24-sept	
	D5	27-sept	
P2	D6	19-déc.	
	D7	24-déc.	
	D8	29-déc.	
P3	D9	19-fév.	
	D10	24-fév.	
P4	D11	04-mai	
	D12	06-mai	
	D13	11-mai	
	D14	15-mai	
	D15	18-mai	
	D16	20-mai	
	D17	25-mai	
	D18	29-mai	

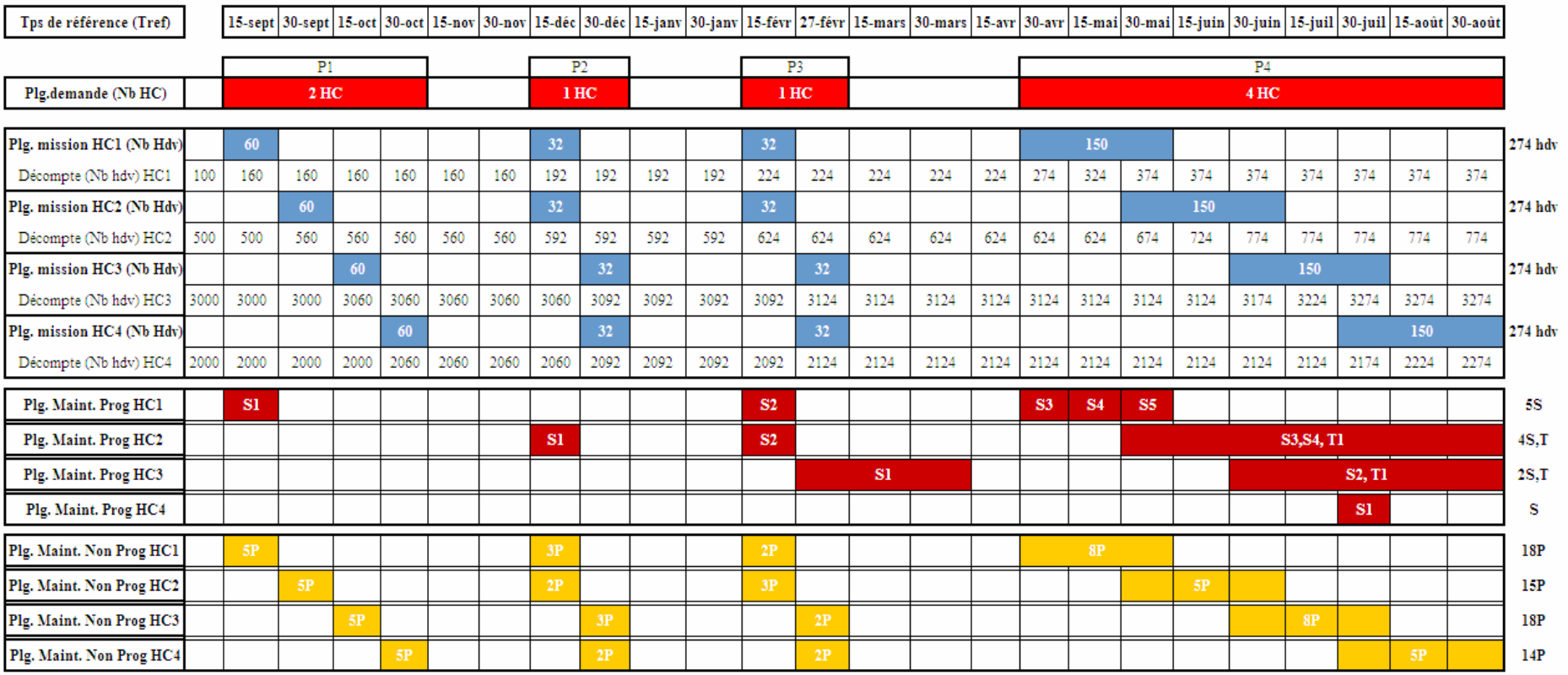
Tableau 26. Description des dates de défaillances prévisionnelles de l'appareil HC1 pour les quatre périodes d'activité

A partir de cette table, nous évaluons le temps de maintenance non programmée de l'appareil HC1 UT_UM_{HC1} et de la flotte UT_UM_{flotte} :

$$UT_UM_{HC1} = 54hrs$$

$$UT_UM_{Flotte} = 216\ hrs$$

Nous complétons alors le planning d'exploitation de la Figure 59 par le planning de maintenance non programmée pour chaque appareil. Nous avons ainsi représenté le nouveau planning d'exploitation dans la figure ci-dessous (Figure 60). Ce planning d'exploitation sera évalué en termes de disponibilité dans le paragraphe suivant.



Tps de référence (Tref)		15-sept	30-sept	15-oct	30-oct	15-nov	30-nov	15-déc	30-déc	15-janv	30-janv	15-févr	27-févr	15-mars	30-mars	15-avr	30-avr	15-mai	30-mai	15-juin	30-juin	15-juil	30-juil	15-août	30-août	
		P1						P2				P3					P4									
Plg.demande (Nb HC)		2 HC						1 HC				1 HC					4 HC									
Plg. mission HC1 (Nb Hdv)		60						32				32					150									274 hdv
Décompte (Nb hdv) HC1	100	160	160	160	160	160	160	192	192	192	192	224	224	224	224	224	274	324	374	374	374	374	374	374	374	
Plg. mission HC2 (Nb Hdv)			60					32				32							150							274 hdv
Décompte (Nb hdv) HC2	500	500	560	560	560	560	560	592	592	592	592	624	624	624	624	624	624	624	674	724	774	774	774	774	774	
Plg. mission HC3 (Nb Hdv)				60					32				32								150					274 hdv
Décompte (Nb hdv) HC3	3000	3000	3000	3060	3060	3060	3060	3060	3092	3092	3092	3092	3124	3124	3124	3124	3124	3124	3124	3124	3174	3224	3274	3274	3274	
Plg. mission HC4 (Nb Hdv)					60				32				32											150		274 hdv
Décompte (Nb hdv) HC4	2000	2000	2000	2000	2060	2060	2060	2060	2092	2092	2092	2092	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2124	2174	2224	2274	
Plg. Maint. Prog HC1		S1										S2					S3	S4	S5							5S
Plg. Maint. Prog HC2								S1				S2							S3,S4, T1							4S,T
Plg. Maint. Prog HC3													S1								S2, T1					2S,T
Plg. Maint. Prog HC4																							S1			S
Plg. Maint. Non Prog HC1		5P						3P				2P					8P									18P
Plg. Maint. Non Prog HC2			5P					2P				3P								5P						15P
Plg. Maint. Non Prog HC3				5P					3P				2P									8P				18P
Plg. Maint. Non Prog HC4					5P				2P				2P											5P		14P

Figure 60. Diagramme de Gantt présentant l'exploitation de la flotte (Planning de demande et Planning de maintenance programmée et non programmée)

II.2.4. Evaluation de la disponibilité

Dans l'analyse déterministe proposée, nous évaluerons la disponibilité de manière instantanée. L'ensemble des disponibilités instantanées seront moyennées sur la période de référence.

A partir de la figure 60, nous avons mesuré les indicateurs que nous présentons ci-dessous. Nous représentons les 3 principaux indicateurs que nous avons retenus dans le chapitre V, à savoir la disponibilité de la flotte, le taux de réussite de mission et le taux de redondance. Ces 3 indicateurs seront présentés en 3 temps ; en prenant uniquement en compte la maintenance programmée dans un premier temps, en prenant en compte la maintenance non programmée dans un deuxième temps et ces deux dernières combinées (Figure 61).

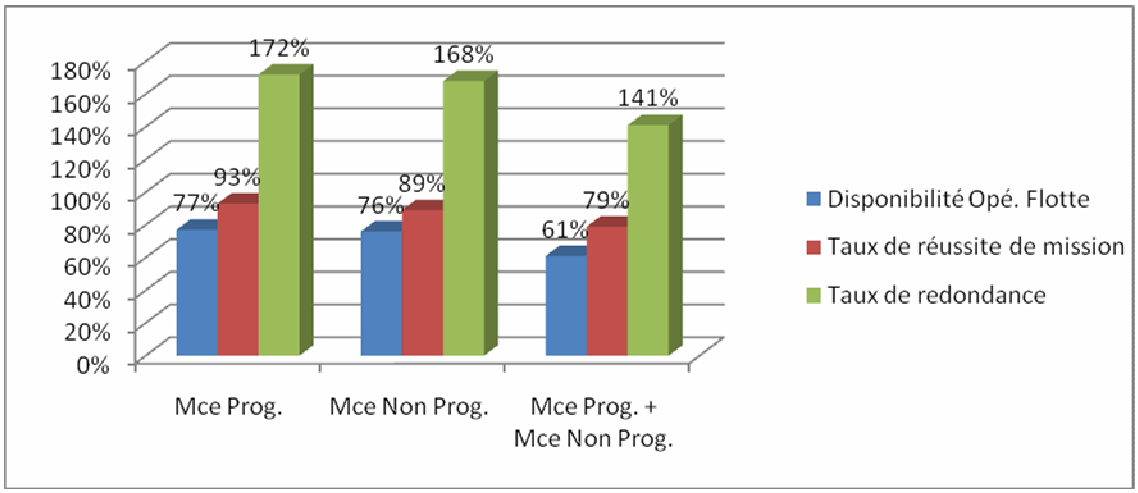


Figure 61. Distribution des trois indicateurs définis dans le chapitre V pour la flotte

Nous constatons un taux de disponibilité opérationnelle de la flotte (61%) ne répondant pas à l'objectif de l'exploitation qui est de 75%. Nous remarquons un excès de 2% dû à la maintenance programmée et 1% pour la maintenance non programmée. Les deux contributeurs de maintenance forment un déficit de 14%.

Concernant le taux de réussite de mission, l'exploitant s'attend à une réussite totale de ses missions proche de (100%). Dans les résultats, on voit que 7% de ces missions sont affectées par la maintenance programmée alors que 11 % le sont par la maintenance non programmée. Les deux contributeurs entrainent un défaut de service de 21%.

Enfin, le taux de redondance reste élevé dans ce résultat. Idéalement, le taux de redondance doit être de 100%, mettant en évidence une utilisation optimale

d’une flotte aéronefs. Or, dans ce résultat, nous remarquons un fort taux de redondance pour un faible taux de disponibilité opérationnelle. Ceci met en avant des problèmes de réordonnancement de la maintenance.

II.3. Modélisation stochastique de l’exploitation

Dans ce paragraphe, nous avons limité la présentation de la modélisation stochastique à la modélisation de la maintenance. Nous nous baserons donc sur les modèles de demande et de l’affectation présentés pour la modélisation de la demande déterministe.

II.3.1. Modélisation de la maintenance

II.3.1.1. Modélisation de la maintenance programmée

Dans ce paragraphe, nous avons repris les éléments fondamentaux de la modélisation de la maintenance programmée dans le cas d’une modélisation de l’exploitation déterministe comme la durée nominale associée à l’échéance de maintenance. En revanche, nous avons cette fois-ci défini l’échéance de maintenance sur un intervalle centrée autour de la valeur d’échéance présentée dans le Tableau 21(Tableau 27).

HC	Echéances de visites Supplémentaires (S)		Echéances de visites Techniques (T)		Echéances de Grande Visite (GV)	
	Ech. [Hdv]	Durée nom. [Hrs /1 pers]	Ech. [Hdv]	Durée nom. [Hrs / 1 pers]	Ech. [Hdv]	Durée nom. [Hrs/ 1pers]
HC1	45-55	30	450-550	120	4500-5500	300
HC2	68-82	35	675-825	150	5400-6600	350
HC3	90-110	40	720-880	170	6300-7700	400
HC4	180-220	45	810-980	190	7200-8800	450

Tableau 27. Description des échéances et des durées de visites de maintenance par aéronef

La plage de valeurs d'échéance va permettre d'entreprendre une série de simulation permettant d'évaluer dans les paragraphes suivants la disponibilité de la flotte.

Concernant la gestion des ressources, nous avons proposé une prise en compte des indisponibilités liées à la pénurie de main d'œuvre, d'outillages et de pièces de rechange en définissant des distributions de valeurs comme nous l'avons défini dans l'équation 23 du chapitre V.

Dans cette équation, il est nécessaire de définir dans un premier temps les paramètres μ (Disponibilité de la main d'œuvre), σ (Disponibilité des pièces de rechange), τ (Disponibilité des outillages) et dans un deuxième temps les délais de mise à disposition de la ressource en cas de pénurie.

- Disponibilité de la main d'œuvre

En vue d'évaluer la disponibilité de la main d'œuvre, il est nécessaire de définir la capacité et la charge de la main d'œuvre. Dans le cadre de cette exploitation, le personnel de maintenance est constitué d'une équipe de 3 opérateurs de maintenance. Par souci de simplification, nous avons considéré que ces 3 opérateurs sont multi-compétents et que chacun d'eux peut répondre à tous types de tâches de maintenance. Ces opérateurs de maintenance ont un temps de travail de 8h/j et ce, tous les jours ouvrés pour chaque période d'activité P1, P2, P3, P4. La capacité de main d'œuvre de l'exploitation constante est de 24hrs/j.
Concernant la charge de la main d'œuvre, celle-ci a été estimée pour chaque échéance de maintenance dans la table 6 du paragraphe précédent.

La confrontation de ces paramètres a permis de représenter l'évolution de la charge et de la capacité en main d'œuvre ainsi que leur éventuel croisement permettant d'identifier les excès de charge (Figure 62).

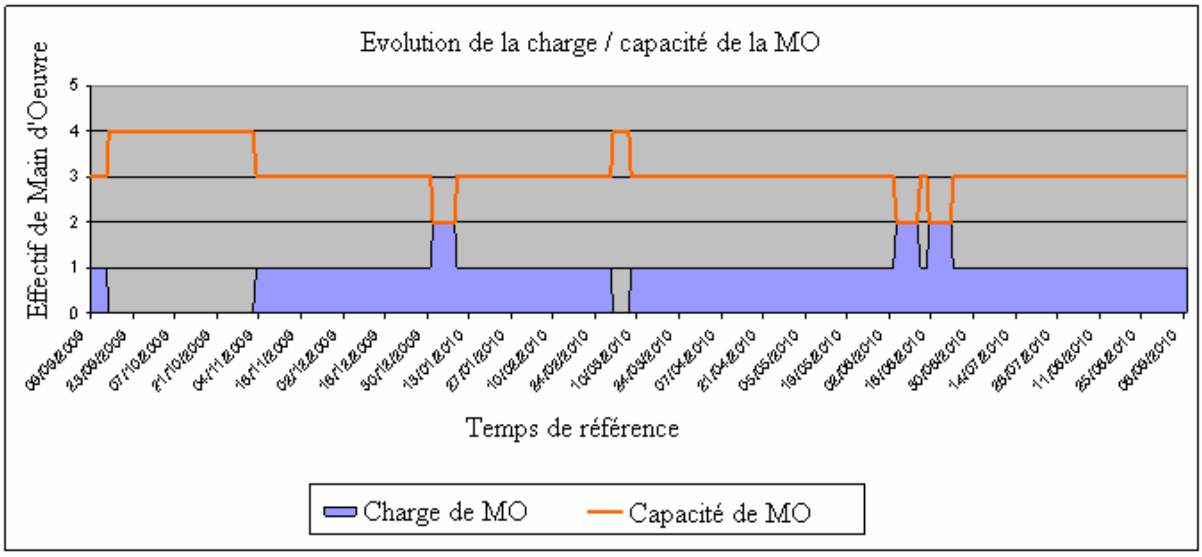


Figure 62. Evolution de la capacité et charge de main d'œuvre au cours du temps de référence

- Disponibilité des pièces de rechange

Dans ce cadre, nous nous intéressons à deux types de paramètres : l'occurrence d'une pénurie de pièces et le délai de mise à disposition lors d'une pénurie.
L'occurrence d'une pénurie de pièce est estimée par la **probabilité de non rupture de stock** (PNRS) valeur à laquelle s'engage le prestataire auprès du client. A partir de cette valeur, il est possible d'évaluer la probabilité de rupture de stock (PRS).
Cette méthode présente un intérêt dans le cas où l'on ne dispose pas de suffisamment d'information sur le stock existant chez l'exploitant. La probabilité de non rupture de stock est une donnée qui peut être déduite en analysant les contrats de soutien logistique. Dans ces contrats de soutien logistique, l'industriel (prestataire de service de maintenance) offre généralement un engagement en disponibilité des ressources à fournir.

Cette probabilité de rupture de stock signifie que « **pendant une visite de maintenance, il existe un risque de PRS% que la pièce ne soit pas en stock** ».
Dans notre cas, la probabilité de rupture de stock des pièces de rechange dédiées à la maintenance programmée est de 25%.

- Disponibilité des outillages

Concernant la gestion des outillages, nous avons suivi le même raisonnement que pour la disponibilité des pièces de rechange. Nous avons considéré que la probabilité de rupture de stock des outillages dédiés à la maintenance programmée est de 5%.

Les délais de mise à disposition des ressources sont représentés dans la table suivante à travers des lois de probabilité triangulaires construites sur des données mesurées (Tableau 28).

	Min (hrs)	Mode (hrs)	Max (hrs)
Main d'œuvre	0,3	1	48
Pièces de rech.	0,5	3	45
Outillage	0,5	3	45

Tableau 28. Description des délais de mise à disposition des ressources selon 3 paramètres d'une loi triangulaire (min, mode, max)

Après avoir présenté les éléments nécessaires à la modélisation de la maintenance programmée, nous présentons dans la table suivante, le planning de maintenance. Ce tableau reprend les principaux paramètres du tableau du paragraphe précédent (Tableau 24) pour représenter la synthèse des échéances de maintenance par période de demande et par appareil. Nous avons ajouté les dates de début au plus tôt, de début au plus tard, de fin au plus tôt et les dates de fin au plus tard des opérations de maintenance à réaliser (Tableau 29).

Période	Échéance	HC	Date début au plus tôt	Date début au plus tard	Charge	Durée	Date fin plus tôt	Date fin Au plus tard
P1	S1	HC1	24-sept	28-sept	15h/ 2H	1 j	25-sept	29-sept
P2	S1	HC2	16-déc.	20-déc.	18h/2H	2 j	18-déc.	22-déc.
P3	S2	HC1	15-févr.	18-févr.	15h/ 2H	1 j	16-févr.	19-févr.
	S2	HC2	16-févr.	20-févr.	18h/2H	2 j	18-févr.	22-févr.
	S1	HC3	28-févr.	03-mars	20h/2H	4 j	04-mars	07-mars
P4	S3	HC1	05-mai	08-mai	15h/ 2H	1 j	06-mai	09-mai
	S4	HC1	20-mai	22-mai	15h/ 2H	1 j	21-mai	23-mai
	S5	HC1	03-juin	07-juin	15h/ 2H	1 j	04-juin	06-juin
	S3	HC2	10-juin	14-juin	18h/2H	2 j	12-juin	16-juin
	S4	**HC2**	**29-juin**	**04-juil.**	**18h/2H**	**8 j**	**07-juil.**	**12-juil.**
	T1	HC2	01-juil.	04-juil.	50h/3H	2 j	03-juil.	06-juil.
	S2	HC3	15-juil.	19-juil.	20h/2H	2 j	17-juil.	21-juil.
	T1	**HC3**	**17-juil.**	**20-juil.**	**57h/3H**	**25 j**	**12-août**	**15-août**
	S1	HC4	15-août	20-août	22h/2H	2 j	17-août	22-août

Tableau 29. Classement des échéances de maintenance par période d'activité et par appareil

Nous pouvons remarquer dans cette table, 2 échéances de maintenance présentant un cas de pénurie de stocks entrainant des durées calendaires plus longues. Cet extrait de scénario est à prendre en compte dans la gestion des stocks en amont de cette période en vue d'éviter ce cas de pénurie.

Cette synthèse (Tableau 29) permet d'évaluer le temps de maintenance programmée minimum et maximum de la flotte à travers UT_SM_{flotte}.

$$UT_SM_{flotte} = [1296 \text{ hrs} – 1500\text{hrs}]$$

Ce paragraphe a permis d'établir une synthèse des échéances de maintenance programmée sous un aspect stochastique. Nous allons par la suite, analyser la maintenance non programmée.

II.3.1.2. Modélisation de la maintenance non programmée

Dans le cadre de la modélisation stochastique, nous avons repris la table 8 présentée dans la modélisation déterministe dans laquelle nous avons défini une loi de probabilité décrivant une plage de valeur comprenant la durée de rétablissement d'un système après une défaillance.

L’évaluation du temps de maintenance non programmée est réalisée avec l’équation 23 (Chapitre V), prenant en compte le temps de diagnostic et le temps de réparation. Dans le cadre de la modélisation, nous avons défini des lois de probabilité permettant d’effectuer des simulations sur le temps de diagnostic ainsi que sur le temps de réparation.

- Evaluation du temps de diagnostic

Nous avons évalué le temps de diagnostic en élaborant une loi de probabilité triangulaire reprenant les valeurs les plus rencontrées pour la réalisation du diagnostic qui sont au minimum de 1hrs dans le cas d’une localisation rapide d’une source de panne, 60hrs dans le cas où l’exploitant fera appel à un expert du constructeur et le cas le plus courant qui est de 3h. Dans ces valeurs, nous prenons en compte la charge de main d’œuvre et la disponibilité des outillages.

- Evaluation du temps de réparation

Le temps de réparation effectué sur chaque défaillance reprend les relations que nous avons présentées dans le cadre de la maintenance programmée. En effet, il s’agit dans le cas de la maintenance non programmée d’évaluer la durée calendaire de réparation en prenant en compte la disponibilité de la main d’œuvre, des pièces de rechange et des outillages.
Pour ces trois paramètres nous utilisons la même démarche que l’évaluation de ces paramètres dans le cas de la maintenance programmée.
La disponibilité de la main d’œuvre est évaluée par l’intermédiaire du paramètre δ qui met en fonction la charge associée à cette réparation et la capacité de main d’œuvre de l’exploitation. Concernant, la disponibilité des pièces de rechange, la probabilité de rupture de stock des pièces de rechange est de 35%. Enfin pour ce qui est de la disponibilité des outillages, la probabilité de rupture des stocks d’outillage est de 15%.

Les délais de mise à disposition des ressources sont représentés dans la table suivante à travers des lois de probabilité triangulaires construites sur des données mesurées (Tableau 30).

	Min (hrs)	Mode (hrs)	Max (hrs)
Main d’œuvre	1	3	60
Pièces de rech.	2	3	100
Outillage	2	3	45

Tableau 30. Description des délais de mise à disposition des ressources selon 3 paramètres d'une loi triangulaire (min, mode, max)

Les éléments décrits précédemment ainsi que les simulations réalisées ont permis d'évaluer le temps de maintenance non programmée de la flotte minimum et maximum à travers UT_UM_{flotte}.

$$UT_UM_{flotte} = [989 \text{ hrs} – 1300\text{hrs}]$$

II.3.2. Evaluation de la disponibilité

Les résultats que nous avons présentés au dessus ont permis de proposer une évaluation stochastique de la disponibilité. Nous représentons dans la table suivante les plages de valeurs dans lesquelles est comprise l'évaluation de chaque indicateur (Tableau 31). Ces indicateurs ont été évalués en prenant en compte la maintenance programmée et non programmée.

Indicateurs de disponibilité	Maintenance prog. + maintenance non prog.
Disponibilité Opé flotte	[58% ; 80 %]
Taux de réussite de mission	[70% ; 90 %]
Taux de redondance	[165% ; 115%]

Tableau 31. Synthèse de l'évaluation des indicateurs de disponibilité

Dans le cadre de cette modélisation stochastique, nous pouvons remarquer dans les résultats obtenus une grande dispersion de valeurs dans les 3 indicateurs évalués. Cependant, aucune simulation n'a permis d'évaluer un taux de réussite de mission de 100% montrant qu'il est nécessaire d'apporter des améliorations dans l'exploitation. Avant de présenter les différents leviers nous permettant d'améliorer l'exploitation nous allons comparer les résultats des indicateurs obtenus à partir des modélisations déterministe et stochastique.

II.4. Conclusions

Dans notre étude, la modélisation déterministe avait pour objectif d'obtenir un ordre de grandeur de la disponibilité à partir de données moyennées, et ceci à travers les 3 indicateurs que nous avons évalués.
La modélisation stochastique se base non pas sur des valeurs moyennées mais sur des valeurs stochastiques établies à l'aide de données « terrain ». Cette modélisation permet d'obtenir en sortie de l'étude une plage de valeurs de disponibilité dans le but de voir la disponibilité la plus favorable et la disponibilité la plus défavorable (Tableau 32).

Indicateurs de disponibilité	Modélisation déterministe	Modélisation stochastique
	Maint. Prog. + Maint. non Prog.	
Disponibilité Opérationnelle flotte	61 %	[58% ; 80 %] (moy : 69%)
Taux de réussite de mission	79 %	[70% ; 90 %] (moy : 80%)
Taux de redondance	141%	[165% ; 115%] (moy : 140%)

Tableau 32. Synthèse de l'évaluation des indicateurs de disponibilité

Les conclusions que l'on peut apporter à cette étude concerne la **dispersion de valeurs issues des indicateurs**, **la confirmation des hypothèses de l'analyse déterministe** et **la confirmation de la nécessité d'améliorer l'exploitation**.

La dispersion des valeurs de chaque indicateur permet de déduire un large panel de solutions d'amélioration.

Le fait que les valeurs moyennes estimées de l'analyse stochastique soient proches des valeurs de l'analyse déterministe montre que les paramètres pris en compte comme données d'entrées dans l'analyse déterministe sont approximatifs voire non pertinents. Il faut noter que dans l'analyse stochastique, nous n'avons pas apporté de modification dans la modélisation de la demande et de l'affectation.

Enfin, cette comparaison des résultats met en évidence le besoin d'identifier les leviers d'amélioration de l'exploitation permettant d'atteindre un taux de réussite de mission de 100%.

III. ANALYSE DES LEVIERS D'AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE

III.1. Introduction

Cette partie consiste à analyser les paramètres compromettant la disponibilité de l'exploitation. Cette analyse prendra la forme d'une **analyse de sensibilité** permettant de mesurer la variation de la disponibilité par rapport aux

paramètres d'entrées et d'ajuster les paramètres qui peuvent satisfaire l'objectif de disponibilité.

III.2. Analyse des gains en disponibilité

III.2.1. Analyse de sensibilité

Généralement, une analyse de sensibilité s'effectue en faisant varier certains paramètres d'un modèle autour d'une valeur connue déterminée en laboratoire ou sur le terrain, tout en gardant fixes les autres facteurs au cours de la simulation. Le but de ce processus est d'arriver à identifier les paramètres d'entrée du modèle les plus sensibles, c'est-à-dire ceux pour lesquels une simple variation peut entraîner des changements significatifs dans les sorties du modèle [Saltelli et al., 00] [Deloux 08]. Dans notre étude, l'analyse de sensibilité s'appuie sur une décomposition des paramètres de l'organisation influant sur la disponibilité (Figure 63).

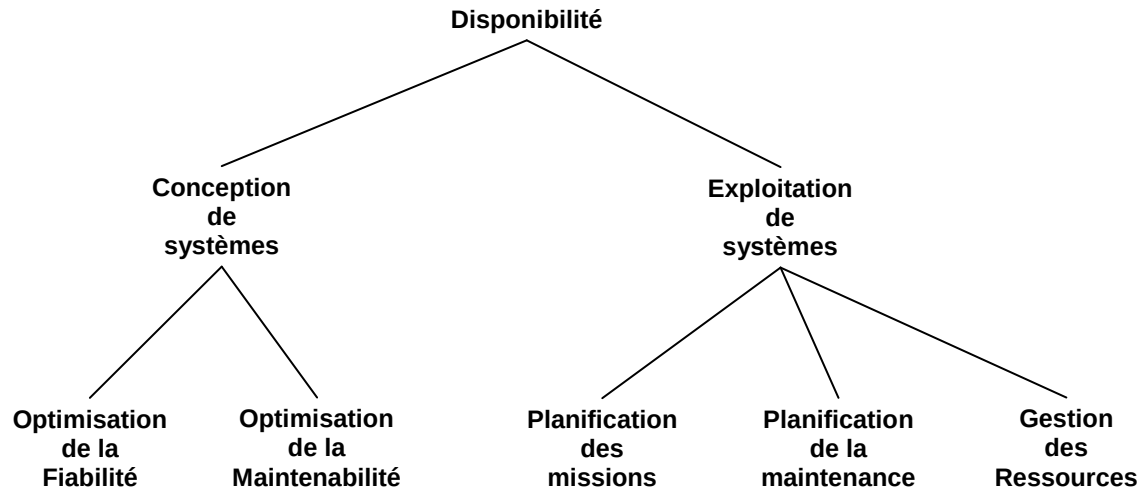


Figure 63. Décomposition des paramètres influant sur la disponibilité

Il s'agit ici de construire plusieurs scénarios d'exploitation suivant les indicateurs que nous avons mesurés comme sensibles. Le mode opératoire de cette analyse suit le procédé essais/erreur qui met en valeur :

- des exigences de disponibilité,
- un processus de modélisation de l'exploitation,
- un ensemble d'indicateurs (Disponibilité opérationnelle, Taux de réussite de mission et Taux de redondance) permettant de mesurer la performance,
- trois processus de redimensionnement concernant les 3 leviers d'optimisation (Planification des missions/ système, Planification de la maintenance et Gestion des ressources).

Cette description sera détaillée en synthèse de ce chapitre pour la chaîne de traitement de la maîtrise de la disponibilité.

Cette analyse de sensibilité consiste à identifier les leviers les plus adaptés qu'il est nécessaire d'actionner pour optimiser la disponibilité. Par exemple, au cours de l'optimisation de ces paramètres, nous avons réalisé des simulations permettant de voir l'évolution et la dispersion de la disponibilité en fonction du taux d'affectation (Figure 64).

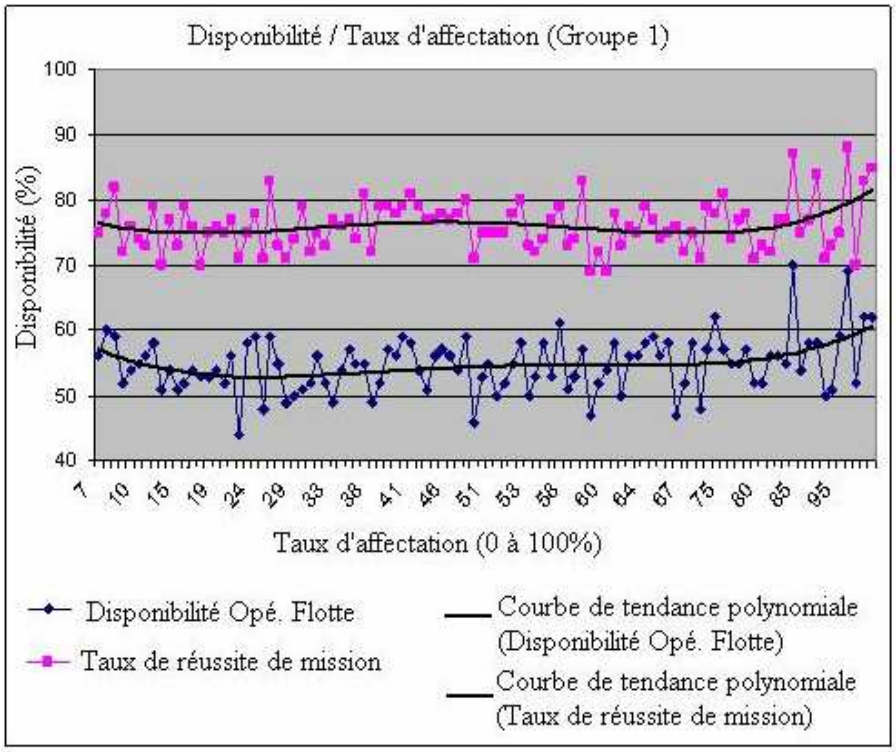


Figure 64. Evolution de la disponibilité / Affectation des deux systèmes

Dans cette étude, des simulations sont réalisées jusqu'à obtenir une configuration de l'affectation permettant d'obtenir 60% de disponibilité flotte et 90 % du taux de réussite de mission. Cette analyse montre une évolution de la disponibilité (disponibilité flotte et taux de réussite de mission) en « baignoire » indiquant une diminution de la disponibilité à partir d'une affectation de 25%, une évolution constante de la disponibilité de 25% à 75% d'affectation et une progression à partir de 75% d'affectation des missions pour le groupe 1. Ce résultat montre qu'une disponibilité peut être obtenue lorsqu'un système est faiblement ou fortement exploité. Une affectation identique de chaque appareil atténuera les performances en disponibilité de l'exploitation de près de 10%.

III.2.2. Bilan et Recommandations

Les résultats de cet état des lieux ont permis de réaliser une pré-évaluation du gain potentiel en disponibilité présenté dans la table suivante (Tableau 33). Nous constatons une amélioration de la planification de la maintenance de 15%, de la planification des missions / système de 10% et de la gestion des ressources de 20%.

Leviers d'Optimisation	Planification des missions / système	Planification de la maintenance	Gestion des ressources	Objectif de réussite de mission
Taux de réussite de mission mesurée	**79%**			**100%**
Gain potentiel en taux de réussite de mission	**10%**	**15%**	**20%**	
Taux de réussite de mission potentiel (après optimisation)	**89%**	**94%**	**99%**	

Tableau 33. Gains potentiels en disponibilité en fonction des leviers d'optimisation

III.3. Conclusions

A l'issue de cette synthèse, nous proposons de nous concentrer sur le réordonnancement de la maintenance programmée pour les raisons suivantes :

- Nous avons développé dans cette thèse des méthodes permettant d'agir sur les deux premiers leviers concernant l'exploitation de système présentés à la figure 65 (Planification des missions/ système et Planification de la maintenance). La méthode de réordonnancement proposée dans le chapitre VI permettrait d'analyser ce levier et d'améliorer le taux de réussite de mission de 15%. Ce levier d'optimisation propose un gain potentiel plus significatif par rapport au levier de planification des missions / système.

- Comme nous l'avons dit précédemment, nous n'avons pas pour objectif dans cette thèse de développer une méthode de gestion des pièces de rechange. Néanmoins, la planification de la maintenance est une activité

qui est en amont de la gestion des pièces. En effet, il est nécessaire d'avoir connaissance des opérations de maintenance à réaliser dans le futur pour déclencher les opérations d'approvisionnement des consommables et des outillages. En considérant la proposition d'un planning de maintenance réordonnancé, nous pouvons dans des travaux futurs développer les éléments permettant d'optimiser la gestion des pièces de rechange.

- Le processus d'amélioration du taux de réussite de mission peut combiner l'ensemble des leviers d'optimisation et donc le gain potentiel calculé pour chacun d'eux. Cette combinaison permettrait d'atteindre l'objectif de taux de réussite mission en se basant sur plusieurs scénarios.

IV. AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE PAR L'OPTIMISATION DU PROGRAMME DE MAINTENANCE

IV.1. Introduction

Dans ce paragraphe, nous présentons la démarche de réordonnancement que nous avons détaillée dans le chapitre VI en vue d'améliorer le programme de maintenance de l'exploitation présentée précédemment.

IV.2. Analyse du Programme de maintenance

L'étude que nous proposons suit le processus défini dans la Figure 39 (Chapitre VI). Pour ce faire, nous procèderons en trois étapes : La **première étape** consiste à effectuer une **sélection des heuristiques potentielles** réalisées hors ligne (sans la prise en compte des ressources). La **deuxième étape** consistera à réaliser une **proposition de programme de maintenance** robuste. Enfin, la troisième étape consistera à **mettre en place ce programme de maintenance** au sein de l'organisation.

IV.2.1. Sélection des heuristiques potentielles

Dans cette phase de traitement hors-ligne, nous avons dressé une synthèse partielle des solutions de réordonnancement en fonction du gain potentiel en taux de réussite de mission qu'elles peuvent apporter. Dans cet arbre, nous avons présenté dans chaque branche l'heuristique et l'ordre des heuristiques

utilisées pour aboutir à une solution du réordonnancement (Figure 65). Dans cette étude, nous avons choisi la solution 2 apportant le plus grand gain potentiel global.

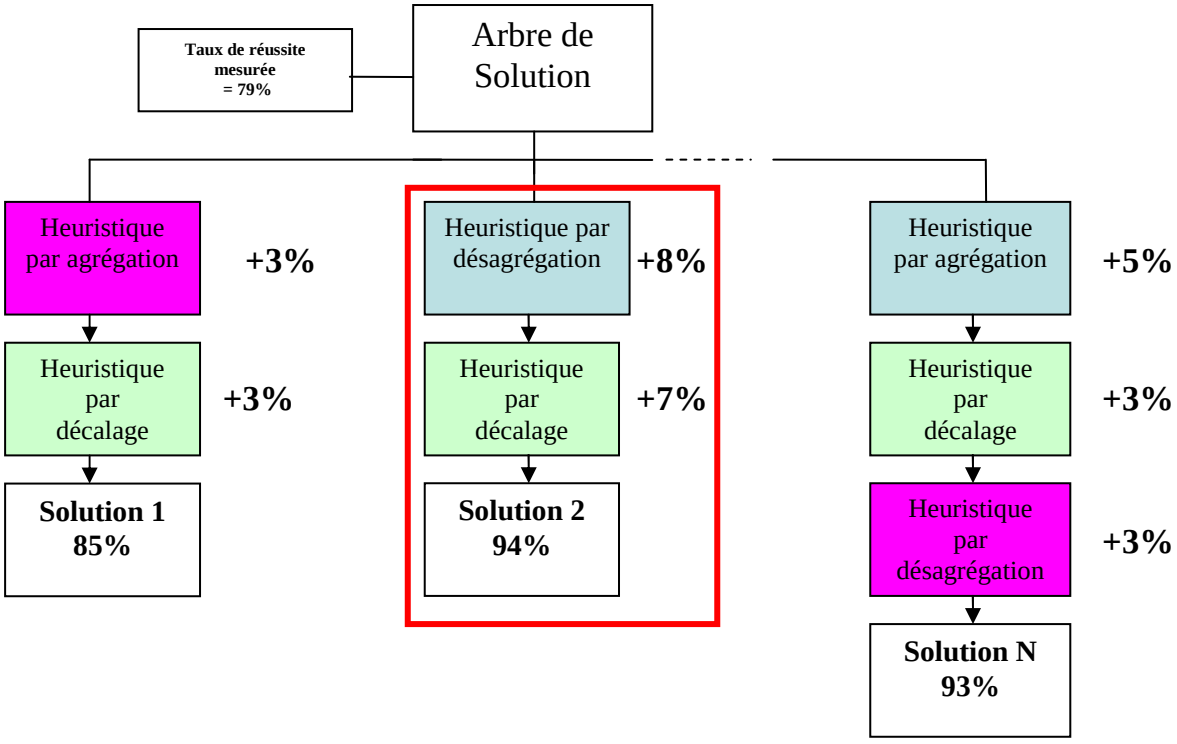


Figure 65. Arbre de solution de réordonnancement hors ligne

IV.2.2. Proposition du programme de maintenance

Dans cette phase de traitement en ligne, nous avons exploité et mis en œuvre l'heuristique sélectionnée. Le programme de maintenance réordonnancé, par désagrégation, permet de présenter l'asymptote de la disponibilité dans la figure ci-dessous. (Figure 66).

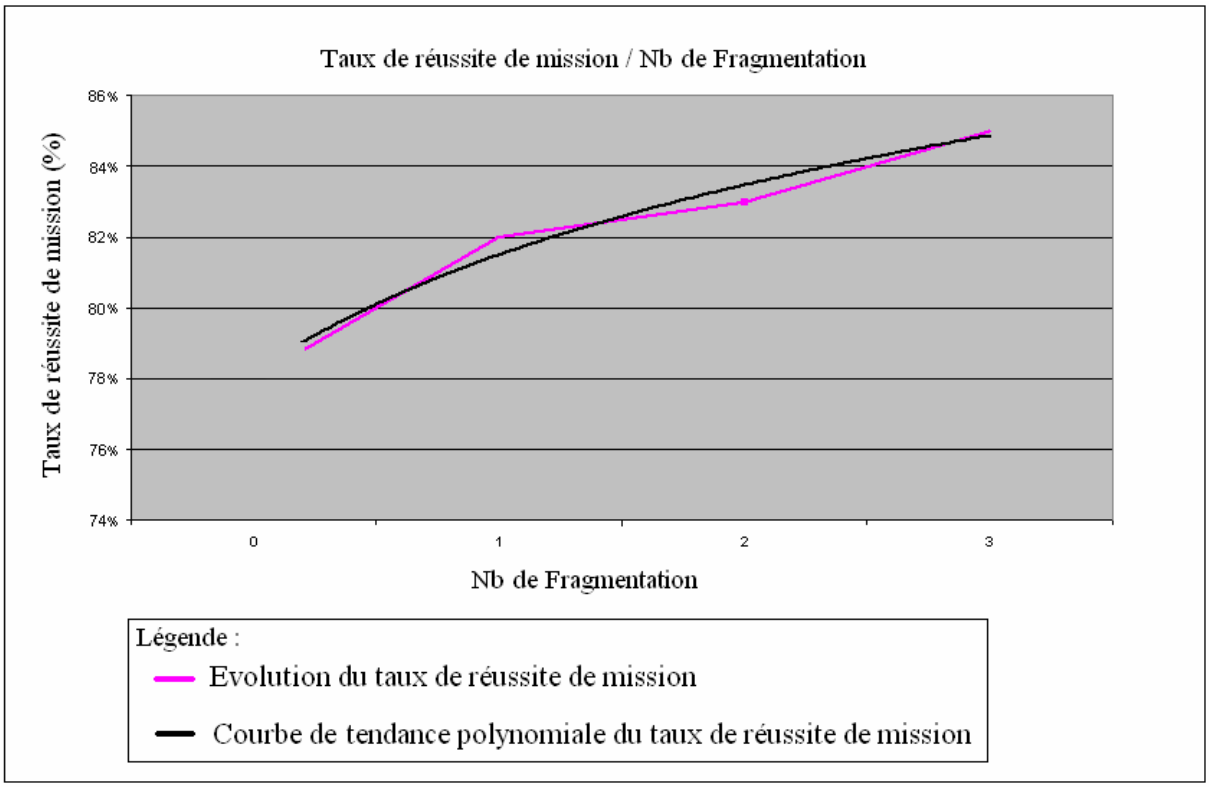


Figure 66. Evolution du taux de réussite / nb de fragmentation moyen par visite

Dans cette figure, nous mettons en exergue l'évolution la tendance de la disponibilité de service en fonction du nombre de fragmentations réalisées. Cette figure permet de mesurer l'asymptote liée à l'optimisation par désagrégation. A partir de ce résultat, il est nécessaire de mettre en œuvre une autre heuristique sur la base du scénario offrant le meilleur résultat du taux de réussite de mission (85%). Nous présentons ci-dessous le planning d'exploitation résultant de cette étape d'optimisation (Figure 67).

Cette figure représente une fragmentation des visites de maintenance S, T, GV pour les 4 systèmes (S1, S2, S3, S4 qui sont respectivement HC1, HC2, HC3, HC4). Nous rappelons que l'intitulé des visites de maintenance ci-dessous :
Visite S : Visite Supplémentaire ;
Visite T : Visite Technique ;
Visite GV : Grande visite.

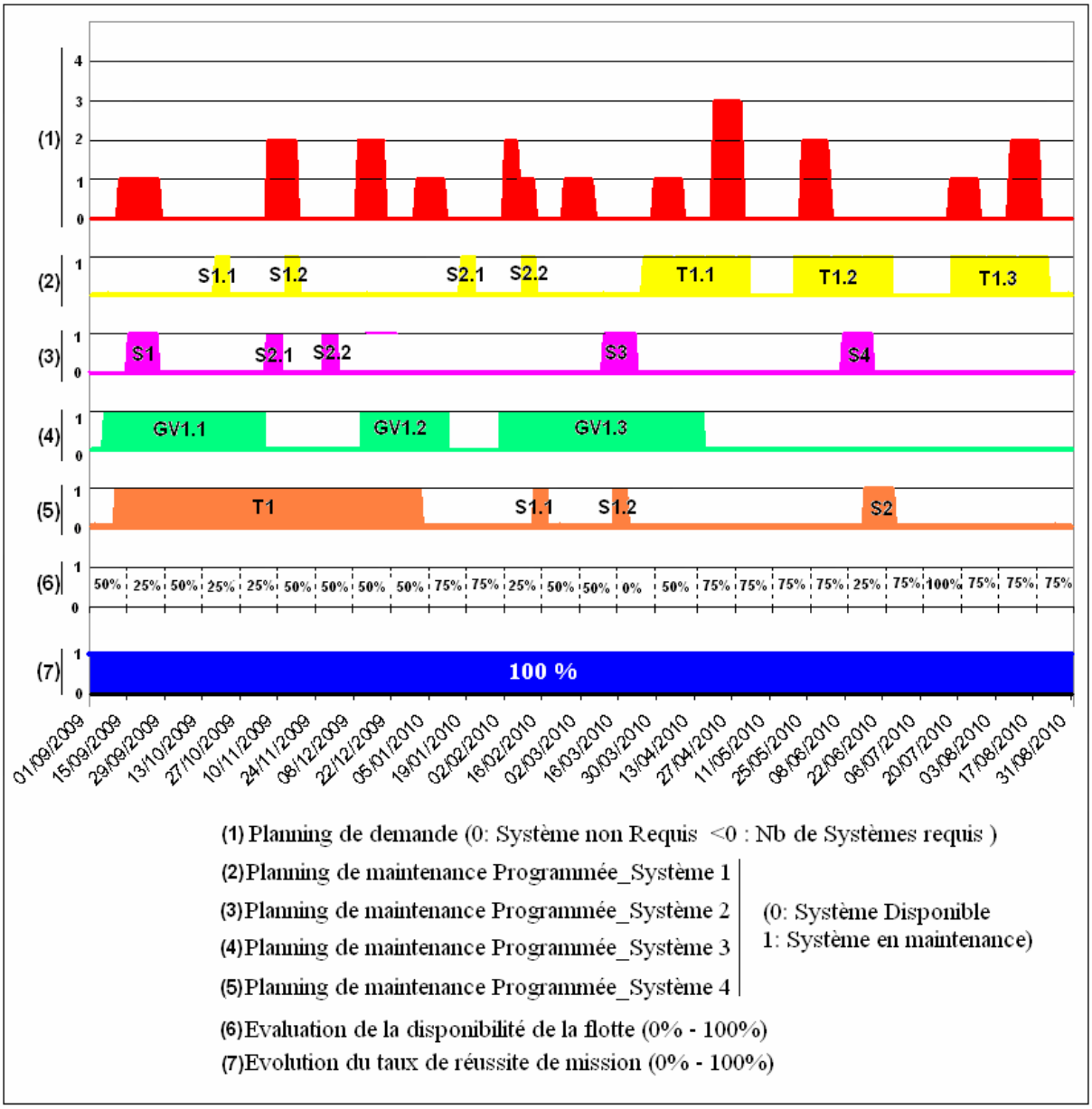


Figure 67. Représentation des plannings de maintenance des systèmes S1 (HC1), S2 (HC2), S3(HC3), S4(HC4) après fragmentation des visites S, T, GV

Dans ce cadre, un autre niveau d'optimisation va être mis en œuvre sur des tâches de maintenance ciblées pouvant faire l'objet d'amélioration (Figure 68). Après une évaluation des gains potentiels en disponibilité, la seconde étape d'optimisation pourrait être réalisée avec une heuristique par décalage.

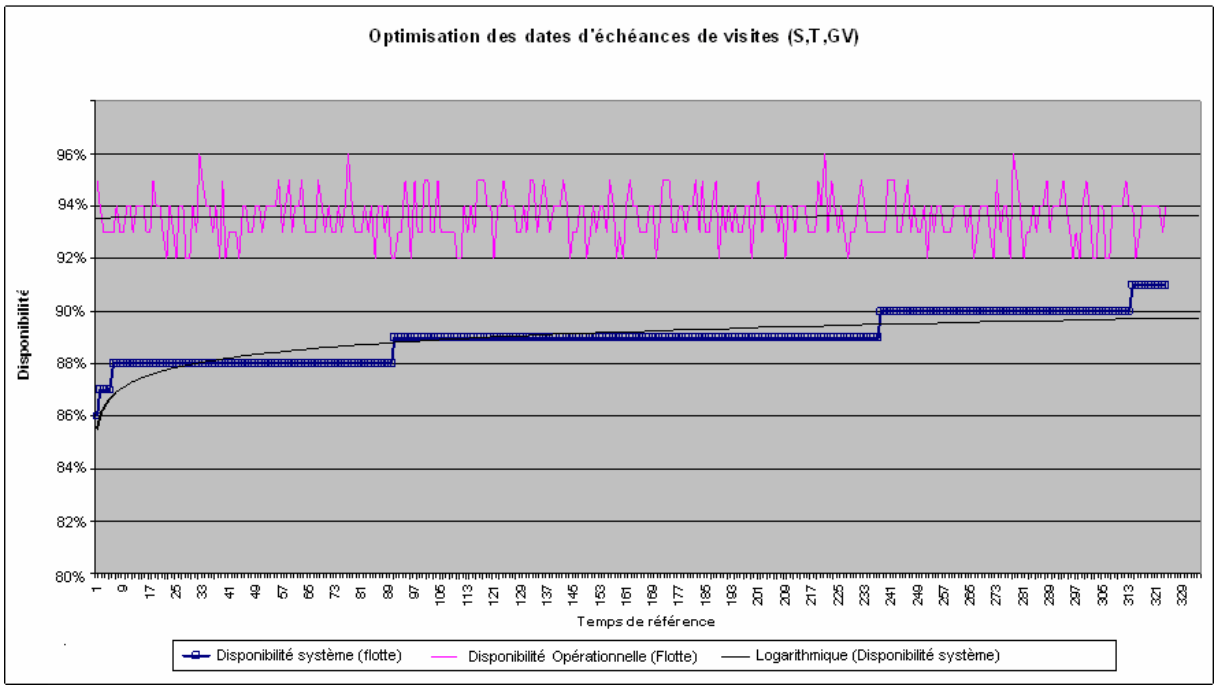


Figure 68. Evolution de la disponibilité opérationnelle et du taux de réussite de mission /nombres de simulation

Dans la figure ci-dessus, nous avons représenté plusieurs séries de simulation permettant de voir 330 configurations du programme de maintenance possibles. Ces simulations ont été réalisées en prenant en compte les principales visites de maintenance.

Le traitement de cette heuristique permet d'obtenir une asymptote de solution à 94 % correspondant aux gains potentiels en disponibilité présentés dans la Tableau 33. De cette série de configurations, nous avons retenu les scénarios offrant le meilleur compromis entre le taux de réussite de mission et la disponibilité opérationnelle (Tableau 34). Ces scénarios seront présentés ci-après :

Scénario/ Indicateurs de disponibilité	Disponibilité opérationnelle de la flotte	Taux de réussite de mission	Taux de redondance
Scénario A	**54%**	**96%**	**105%**
Scénario B	60%	96%	109%
Scénario C	59%	96%	106%
Scénario D	57%	94%	110%

Tableau 34. Synthèse des scénarios d'optimisation par décalage des tâches de maintenance

Dans cette table, nous avons retenu le scénario offrant le taux de réussite de mission maximal pour une disponibilité opérationnelle moindre, en l'occurrence le scenario A. Ce traitement permet d'aboutir au planning d'exploitation suivant (Figure 69)

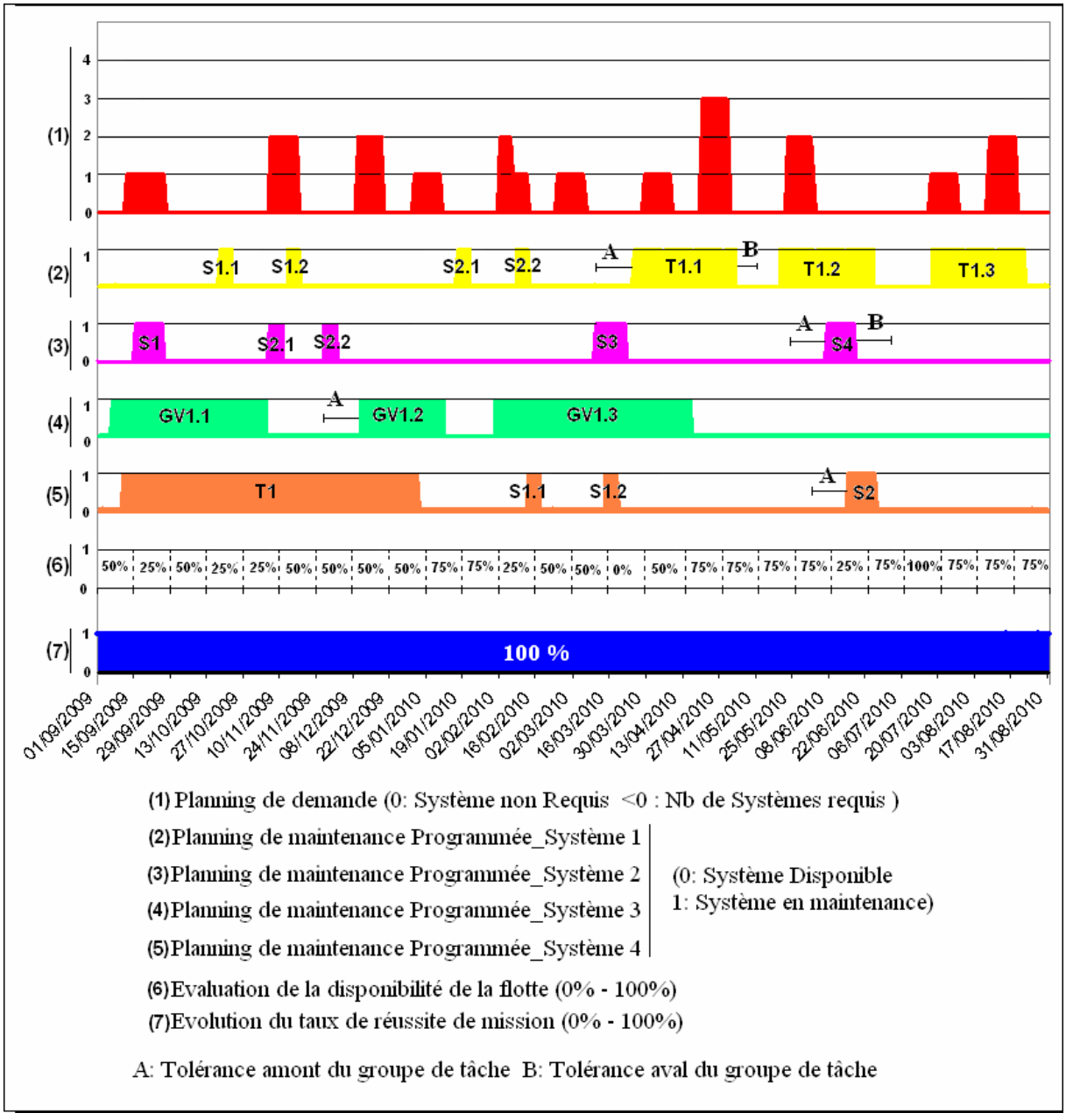


Figure 69. Représentation des plannings de maintenance des systèmes S1 (HC1), S2(HC2), S3(HC3), S4(HC4) après fragmentation et analyse des plages de décalage (A-B)

IV.2.3. Mise en place du programme de maintenance

Cette phase consiste à établir un lien entre la proposition du programme de maintenance attendu par un client et son organisation existante (client). En effet, la performance en termes de disponibilité attendue par le client peut entraîner une évolution de l'organisation du client concernant la gestion de ses ressources et de ses aéronefs.
Dans ce cadre, les études d'amélioration de la disponibilité doivent s'appuyer non pas sur une seule proposition mais sur des scénarios d'amélioration définis sur des critères tels qu'une organisation de la main d'œuvre figée, une disponibilité des pièces de rechange améliorée.

Ces études de proposition et de négociation avec le client font partie des axes de recherche dans lesquels nous travaillerons à l'issue de cette thèse.

V. BILAN DE L'ETUDE : VERS UN MODELE DE MAÎTRISE DE LA DISPONIBILITE DE L'EXPLOITATION

Dans ce chapitre, nous avons appliqué les méthodes proposées dans les chapitres V et VI sur un cas inspiré de l'industrie.
Nous avons montré dans un premier temps, la démarche permettant d'évaluer la disponibilité d'une flotte d'aéronefs en prenant en compte les contraintes associées (mission, maintenance et logistique).
Dans un deuxième temps, nous avons analysé par le biais d'une analyse de sensibilité les paramètres sur lesquels l'optimisation pourra porter pour améliorer la disponibilité.
Dans un dernier temps, nous nous sommes focalisés sur le réordonnancement du programme de maintenance de cette flotte. Ce levier d'amélioration constitue le problème le plus récurrent chez les exploitants d'aéronefs. Le réordonnancement de la maintenance est l'étape initiale de toute l'organisation logistique de l'exploitation.

A l'issue de cette étude, toute amélioration apportée à l'organisation nécessite une étape d'évaluation de la disponibilité. Nous retrouvons bien le principe d'essais – erreurs que nous avons utilisé pour améliorer la disponibilité.

Dans ce cadre, l'ensemble de l'étude que nous venons de présenter s'insère dans un procédé de maîtrise de la disponibilité dans lequel nous trouvons les exigences de l'exploitant qui seront identifiées et analysées, la modélisation de l'exploitation permettant d'évaluer les indicateurs et les leviers d'optimisation permettant d'améliorer cette disponibilité (Figure 70).

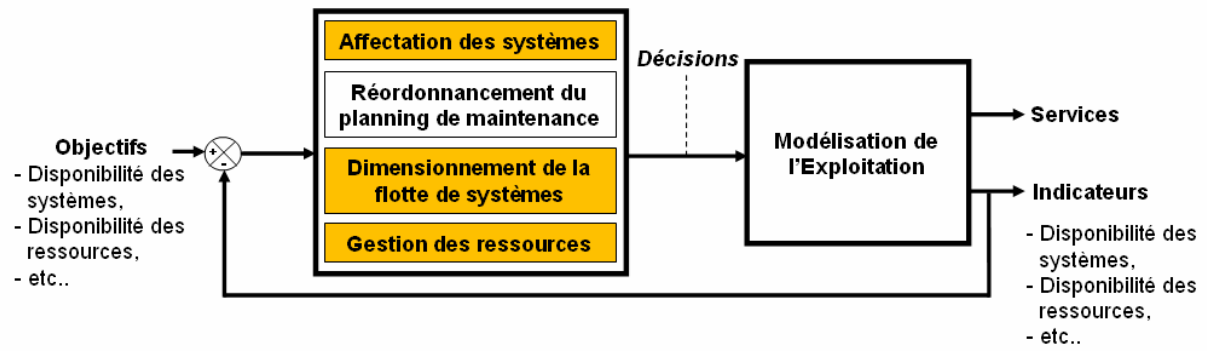


Figure 70. Procédé de maîtrise de la disponibilité de l'exploitation

Synthèse (Chapitre VII)

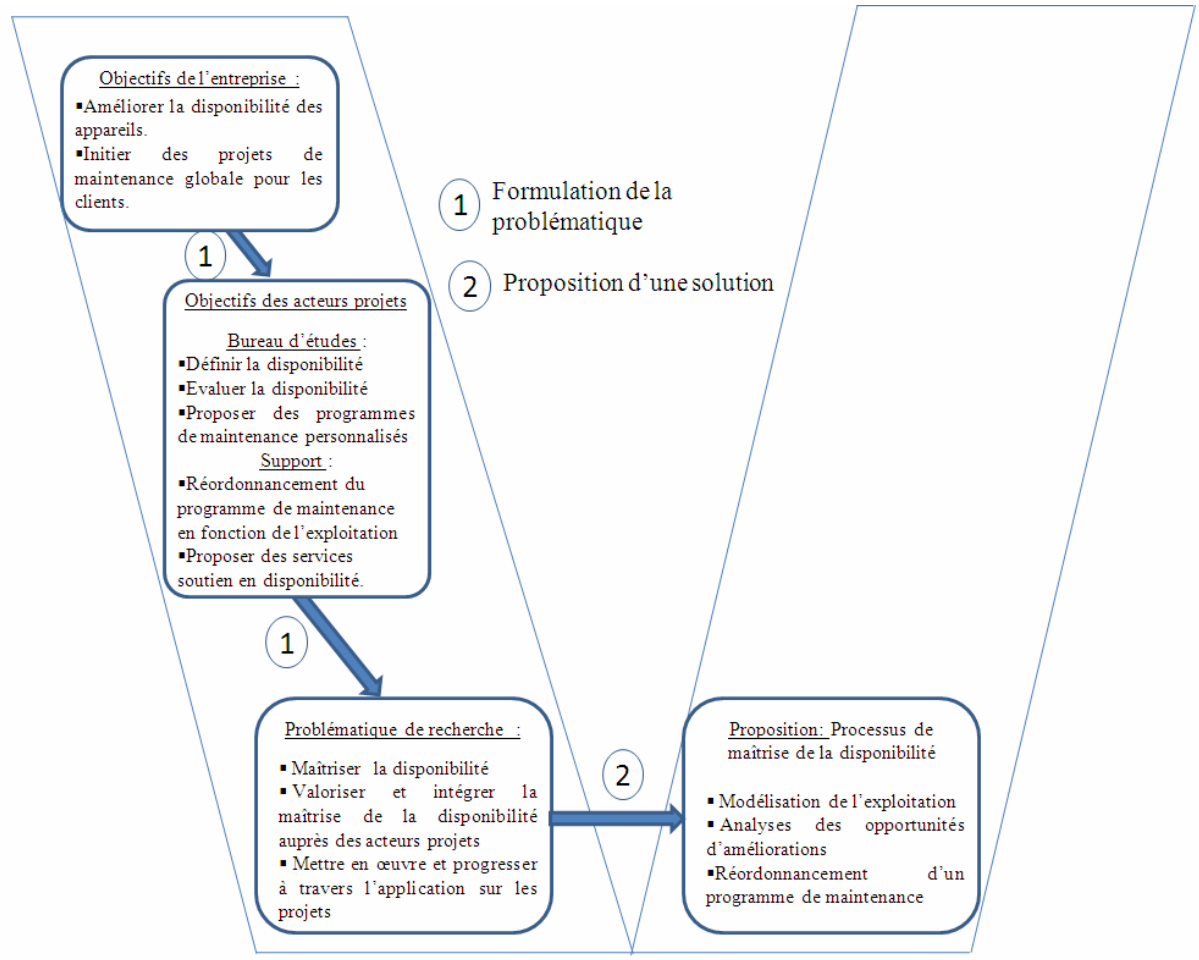


Figure 71. Place de la proposition de solution dans notre démarche d'étude

CHAPITRE VIII :

Evaluation des propositions

Résumé

Nous présentons dans ce chapitre la démarche adoptée pour valider nos propositions. Nous nous concentrons ici sur la validation des propositions liées à la maîtrise de la disponibilité, c'est-à-dire à la méthode d'évaluation de la disponibilité, à l'analyse des leviers d'optimisation et à l'amélioration du programme de maintenance. Nous définissons pour chaque proposition des protocoles d'évaluation et les résultats de l'évaluation.

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE VIII : EVALUATION DES PROPOSITIONS

I. DEMARCHE DE VALIDATION 202
I.1. Double évaluation 202
I.2. Méthode de validation 203
II. EVALUATION DE LA PROPOSITION 204
II.1. Evaluation de la méthode de maîtrise de la disponibilité 204
II.2. Description des applications industrielles réalisées dans le cadre des analyses de disponibilité 206
II.3. Evaluation de l'impact de nos propositions aux niveaux des acteurs projets 207
III. EVALUATION DE L'APPLICABILITE DE LA DEMARCHE SUR D'AUTRES SYSTEMES INDUSTRIELS 209
III.1. Contraintes opérationnelles et hypothèses d'applicabilité 209
III.2. Eléments de réflexion sur l'application de la méthode sur d'autres secteurs étudiés 210
IV. BILAN DE VALIDATION 211

Chapitre VIII :

Evaluation des propositions

« *Nous devons procéder à notre propre examen avant de passer à celui des tâches que nous allons entreprendre.* »

Sénèque[13]

I. DEMARCHE DE VALIDATION

Dans ce paragraphe, la démarche de validation présentée est construite autour d'une première évaluation de notre travail de recherche positionné selon un cycle en V et d'une méthode de validation expérimentale.

I.1. Double évaluation

La figure ci-dessous synthétise notre démarche de recherche (Figure 72). La flèche 1 représente la formulation de la problématique de recherche, la flèche 2 représente le processus de maîtrise de la disponibilité proposé dans le chapitre VII.

L'évaluation de nos propositions est articulée en 2 temps :

Premier temps - La validation de nos propositions concerne d'une part la mise en place des méthodes d'évaluation et d'amélioration de la disponibilité permettant d'améliorer les 3 points identifiés dans la problématique. D'autre part, cette validation concerne l'intégration de nos propositions en vérifiant que nos propositions permettent effectivement de répondre aux problématiques des acteurs projets, ainsi qu'aux problèmes de l'entreprise (Flèches 3 et 4).

Deuxième temps – La validation de nos propositions porte également sur une évaluation de l'applicabilité de la méthode sur d'autres secteurs industriels. Cette validation devra mettre en évidence l'évolution des hypothèses ainsi que des conditions d'utilisation de la méthode pour le secteur aéronautique et leur l'application sur d'autres secteurs.

[13] Philosophe latin, né en -4 à Cordoue. Défenseur acharné de la liberté politique et de la justice sociale, Sénèque envisage la sagesse comme le but ultime de tout homme.

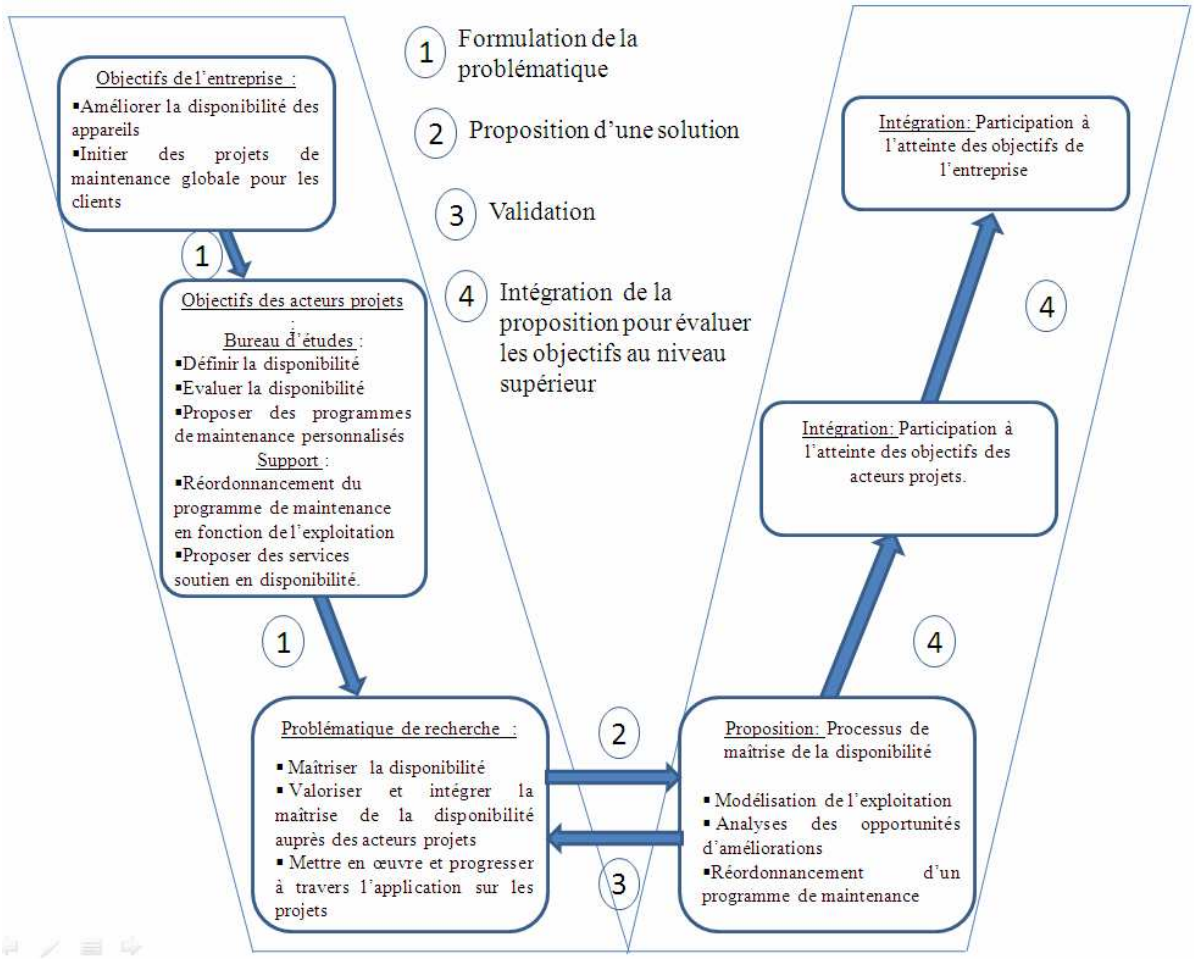


Figure 72. Validation et intégration de nos propositions au sein de notre démarche de recherche

I.2. Méthode de validation

Nous avons utilisé deux types d'évaluation : les tests en collaboration avec des utilisateurs basés sur une évaluation de prototype et les entretiens. Nous avons mené 40 heures d'entretiens et d'évaluation de prototype (Tableau 35).

N°	Entretiens et Evaluations de prototype	Nombre de décideurs rencontrés	Durée de chaque entretien et évaluation	Objectifs des entretiens
1	Entretiens	6	1h	Evaluer la pertinence de la méthode
2	Entretiens et évaluation de prototype	8	2h	Evaluation des limites de la méthode
3	Entretiens et évaluation de prototype	8	2h	Application de la méthode pour des analyses industrielles
4	Entretiens	3	3h	Evaluation de l'impact des propositions au niveau des acteurs projets
5	Entretiens	7	3h	Evaluation de l'applicabilité de la méthode

Tableau 35. Synthèse de la méthode de validation de nos propositions

II. EVALUATION DES PROPOSITIONS DANS LE CADRE DU DOMAINE AERONAUTIQUE

Dans cette partie, nous allons présenter une évaluation de la méthode de maîtrise de la disponibilité en mettant en évidence sa pertinence ainsi que ses limites dans un premier temps. Dans un deuxième temps nous ferons une description des applications industrielles réalisées dans le cadre des analyses de disponibilité. Dans un dernier temps, nous évaluerons l'impact des propositions au niveau des acteurs projets.

II.1. Evaluation de la méthode de maîtrise de la disponibilité

En vue d'évaluer la méthode de maîtrise de la disponibilité, nous allons présenter **une synthèse** de celle–ci en vue de **justifier sa pertinence** et nous terminerons par l'exposé des **limites de cette méthode**.

Dans cette thèse, nous avons proposé une méthode constituée de :

- une méthode de modélisation de l'exploitation pour une évaluation de la disponibilité, ce qui consiste à quantifier les temps d'arrêts pénalisant l'exploitation et à proposer des leviers permettant d'améliorer cette exploitation.
- une méthode de réordonnancement permettant d'aménager les activités de maintenance en fonction des opportunités de l'exploitant en vue d'optimiser la disponibilité.

Nous présentons dans la figure ci-dessous une synthèse de nos propositions à travers une chaîne de traitement de l'information pour maîtriser la disponibilité. Cette chaîne commence par l'identification de données « terrain » (les caractéristiques de demande, le programme de maintenance, les contraintes de disponibilité et la disponibilité existante).
Cette première étape aboutit à une modélisation de l'exploitation (Chapitre V).
A la suite de cette étape de modélisation, si l'évaluation des indicateurs de disponibilité est insuffisante, un processus propose un programme de maintenance réordonnancé en sélectionnant dans un premier temps, les heuristiques permettant un gain potentiel en disponibilité significatif et dans un second temps en proposant le programme de maintenance résultant (Chapitre VI).
A la suite de cette étape, la disponibilité est réévaluée pour vérifier la pertinence de la proposition du programme de maintenance par rapport aux contraintes du client (Figure 73).

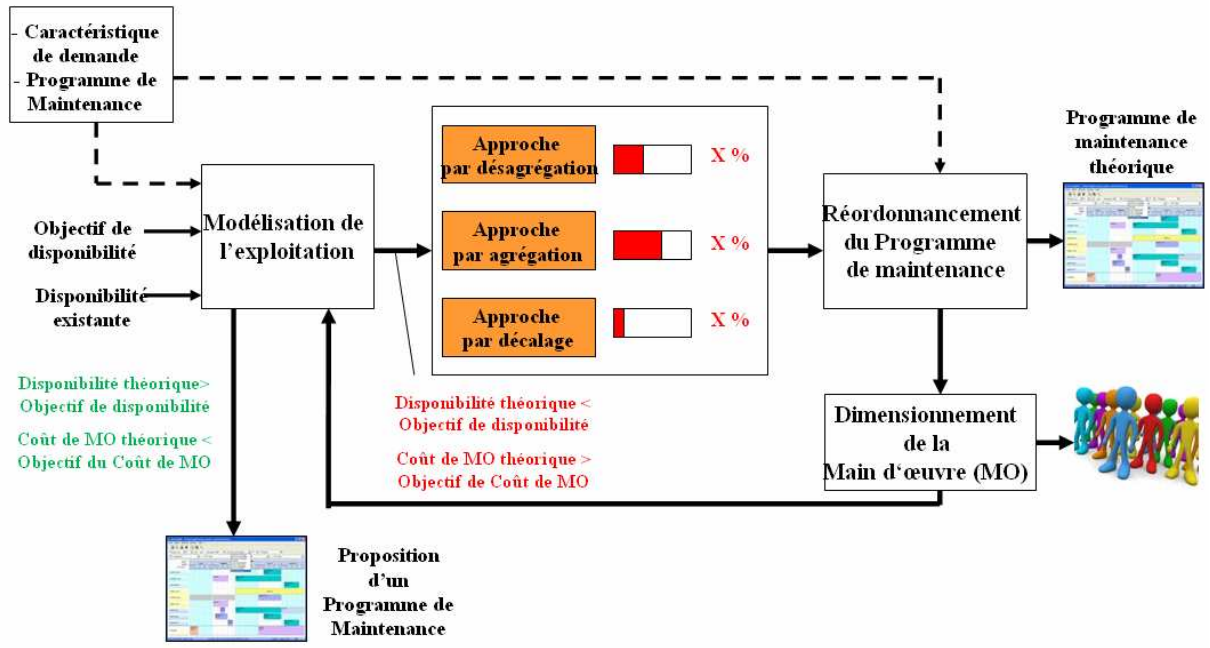


Figure 73. Processus de traitement pour la maîtrise de la disponibilité

L’évaluation de la pertinence d’une méthode nécessite une réflexion construite autour de plusieurs experts intervenant dans le processus de maîtrise de la disponibilité d’un client. Nous présentons des éléments permettant de justifier de la pertinence de la méthode à savoir des **propositions méthodologiques concertées avec les experts métiers** et des clients, des **propositions méthodologiques reposant sur des principes opérationnels** et enfin **nos propositions** sont présentées par **le biais de scénarios**.

Les propositions présentées dans cette thèse ont été appliquées et ont régulièrement fait l’objet d’analyses permettant de valider les apports au fur et à mesure.

L’ensemble de nos **propositions est issu de principes industriels** pour l’élaboration de la méthode d’évaluation de la disponibilité. Nous avons utilisé les 5 concepts de base permettant l’analyse d’une exploitation : la demande, l’affectation, la maintenance programmée, la maintenance non programmée ainsi que les indicateurs de disponibilité. Ces étapes sont suivies par les exploitants de systèmes qui ont entre autres pour objectif de maîtriser la disponibilité.

Dans le cadre de cette méthode nous avons repris les principes de planification pour prévoir et évaluer la disponibilité. Concernant les hypothèses et paramètres nécessaires à la modélisation, nous avons utilisé la simulation pour finalement **élaborer des scénarios d’exploitation** utilisables pour les exploitants dans leurs prises de décisions.
Enfin, dans le cadre de nos propositions, nous pouvons émettre **des réserves concernant la précision des données** collectées. En effet, le fait que ces données soient approximatives conduit à l’utilisation d’une approche de simulation Monte-Carlo permettant de générer un nombre de tirages sur une distribution de valeur. Ces processus de simulation impliquent une erreur qu’il est nécessaire d’évaluer dans la contribution sur le résultat final.

Dans notre cas, les propositions qui ont été présentées dans ce mémoire concernent l’évaluation de la disponibilité établie à partir d’une planification successive de la demande puis de l’affectation des systèmes et de la maintenance entrainant une erreur sur les dates de planification énumérées et au final sur une erreur résiduelle de la valeur de disponibilité.

II.2. Description des applications industrielles réalisées dans le cadre des analyses de disponibilité

Dans le cadre de nos travaux chez l’industriel, nous avons été amenés à élaborer des analyses de disponibilité sous plusieurs points de vue :

- Réponse à des appels d’offres pour la conception de nouveaux systèmes.
- Amélioration du programme de maintenance.

- Etude de qualification d'un nouveau système.
- Modélisation et dimensionnement d'offres de soutien logistique.

Nous allons reprendre chacun des points de vue et résumer l'apport de l'analyse de la disponibilité, sachant que l'ensemble de ces études sera détaillé en annexe.

- Réponse à des appels d'offres pour la conception de nouveau système.

Ces activités ont eu pour objectif d'identifier la disponibilité opérationnelle d'un ensemble de systèmes sur la base d'un cahier des charges mettant en évidence les caractéristiques de demande et une organisation logistique identifiés.

- Amélioration du programme de maintenance.

Ces activités ont pour objectif d'identifier les améliorations potentielles du programme de maintenance fourni par le constructeur au client.

- Etude de qualification d'un nouveau système.

Ces activités ont pour objectif d'évaluer les performances opérationnelles d'un ensemble de systèmes, dont la disponibilité, et de certifier les performances proposées par le constructeur.

- Modélisation et dimensionnement d'offres de soutien logistique.

Ces derniers types d'activité consistent à modéliser une exploitation de système et à dimensionner la politique de soutien logistique permettant d'atteindre les objectifs opérationnels.

II.3. Evaluation de l'impact de nos propositions au niveau des acteurs projets

Dans le cadre de notre travail de recherche, les expérimentations que nous avons réalisées sur la méthode de maîtrise de la disponibilité ont conduit à la réalisation d'un prototype permettant de collecter les informations et de traiter plus aisément les calculs liés à la modélisation.

Dans ce cadre, nous avons utilisé une première approche qui consiste à recueillir auprès des exploitants des données d'exploitation en vue de les traiter en interne. Cette première approche s'avère intéressante dans notre modélisation pour l'identification des données strictement nécessaires.

La seconde approche encore à l'étude consiste à se connecter directement aux bases de données des exploitants pour récupérer les données d'exploitation en temps réel et permettant une mise à jour en continu de l'évaluation de la disponibilité et du planning de maintenance (Figure 74).

Dans la figure ci-dessous nous proposons une architecture organisée en quatre systèmes : Le système de GMAO du client et du procédé de maîtrise de la disponibilité qui est supporté par un procédé de diagnostic organisationnel, un procédé de personnalisation du programme de maintenance et un procédé de dimensionnement du support.

Cette architecture est en cours d'élaboration. Elle vise à mettre en commun les données d'exploitation issues de système de GMAO des clients en vue d'être traitées par les experts responsables de chacune des étapes de maîtrise de la disponibilité.

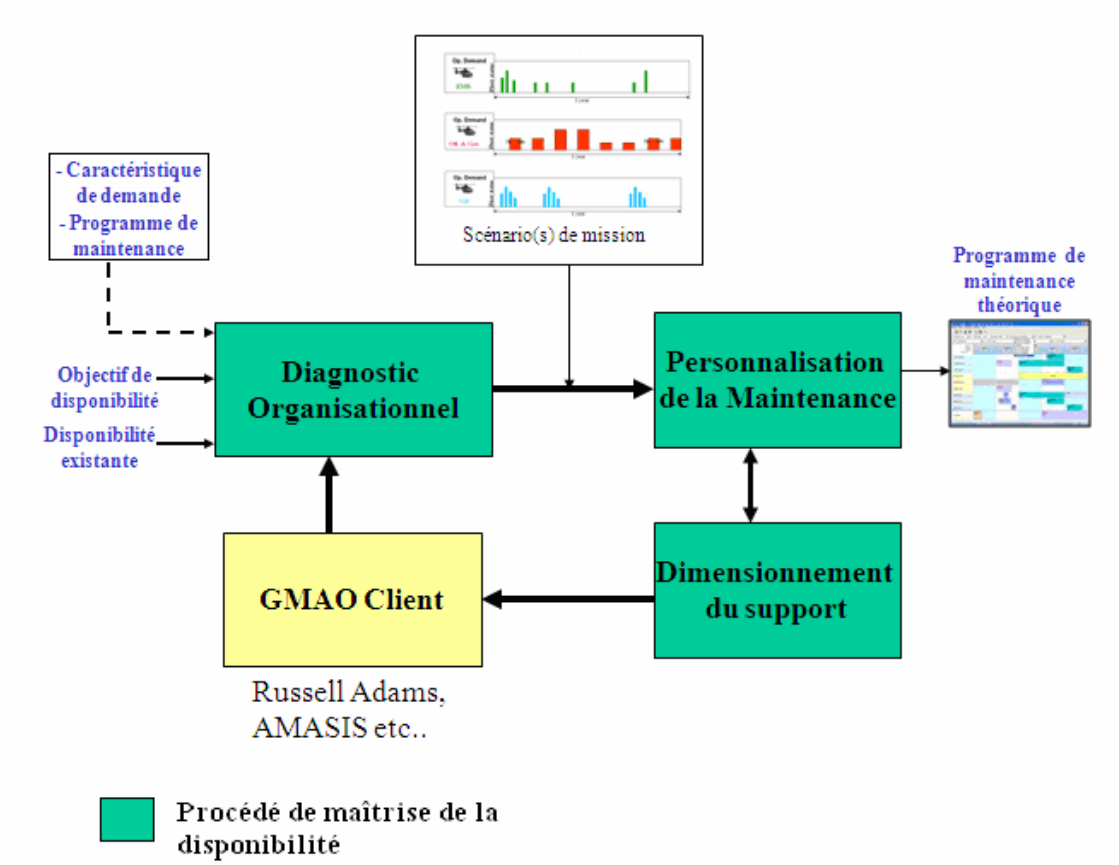


Figure 74. Processus de traitement des données nécessaires à la maîtrise de la disponibilité

Ce processus de traitement (Figure 74) peut apporter des avantages dans la capitalisation des données. En effet, les données d'exploitation que l'on va utiliser dans le traitement permettront de constituer un historique des données mais également des analyses qui pourront aboutir sur la proposition de services.

III. EVALUATION DE L'APPLICABILITE DE LA DEMARCHE SUR D'AUTRES SYSTEMES INDUSTRIELS

Dans cette partie, nous allons décrire des éléments de réflexion portant sur l'aptitude de nos propositions à être appliquées à des secteurs autres que l'aéronautique.

Nous pouvons remarquer à travers le chapitre précédent que ce secteur d'activités est l'un des plus complexes de par ses horizons de planification et par les contraintes de sécurité. Nous allons présenter dans le premier paragraphe les contraintes opérationnelles ainsi que les hypothèses d'applicabilité nécessaires à une application de nos propositions dans d'autres secteurs industriels. Dans un second temps, nous présenterons des éléments de réflexion d'études réalisées de l'application sur d'autres secteurs.

III.1. Contraintes opérationnelles et hypothèses d'applicabilité

Sur le plan économique, les exploitations de systèmes aériens sont aujourd'hui habituées à évoluer dans un environnement très concurrentiel et nécessitant de grandes facultés d'adaptation.
Par ailleurs, le secteur aéronautique est caractérisé par : l'utilisation de produits, matériaux et équipements de très haute technologie ; la recherche d'un niveau de qualité élevé tendant vers la recherche du « zéro défaut », la recherche d'un niveau de fiabilité proche de 100% ; le souci de garantir la sécurité des personnes dans le cas de transport de passagers.

L'ensemble de ces caractéristiques fait du secteur aéronautique l'un des secteurs moteur du développement des technologies et des contraintes associées à ce développement.

Nous pouvons remarquer que le secteur aéronautique regroupe un certain nombre de contraintes (sécurité, horizon de planification relativement court, etc...) qui peuvent être caractéristiques des « process discontinus ».

Néanmoins, la modélisation de l'exploitation proposée dans ce mémoire est applicable à un large éventail de systèmes de production en raison de la généralisation des étapes de modélisation :

- Modélisation de la demande,
- Modélisation de l'affectation,
- Modélisation de la maintenance,
- Evaluation de la disponibilité.

En ce qui concerne les entrées de ces processus, il est nécessaire d'effectuer une adaptation en fonction du secteur industriel en se posant les questions suivantes :

- Qu'est qu'une mission ?
- Qu'est-ce que le temps requis ?
- Comment peut-on définir un temps d'arrêt ?
- Comment est constitué le programme de maintenance ?
- Etc..

III.2. Eléments de réflexion sur l'application de la méthode sur d'autres secteurs étudiés

Les méthodes présentées dans cette thèse ont été analysées et expérimentées dans le cadre de systèmes aéronautiques. Ces méthodes reposent sur des hypothèses de travail qui ont permis la modélisation de l'exploitation d'un aéronef voire de plusieurs aéronefs. Ces hypothèses interviennent dans le cadre de l'analyse des concepts suivants:

- Les indicateurs de disponibilité qui sont identifiés à partir des besoins opérationnels de l'exploitant.
- Les conditions d'exploitation concernant l'environnement dans lequel vont évoluer les systèmes en exploitation.
- Les contraintes d'exploitation concernant la planification des missions, la gestion de la chaîne logistique permettant de supporter les activités de maintenance.

A partir de ce constat, nous avons mené une réflexion qui consiste à proposer une analogie entre la maîtrise de la disponibilité dans le cadre du secteur aéronautique et d'autre secteurs et en particulier le secteur minier.

En effet, nous avons réalisé une étude portant sur les engins de chantier qui évoluent dans le cadre des industries minières [Djeridi et al., 2010].

Une industrie minière est opérationnelle 24 h/24, 365 jours dans l'année en vue de capitaliser les investissements réalisés au départ. Dans ce cadre, il est important que les engins d'acheminement de matière soient disponibles. La maintenance de ces engins présente de lourdes indisponibilités générant donc des coûts d'exploitation importants.

Une exploitation d'engins miniers peut travailler sur plusieurs gisements miniers. Dans chaque gisement se trouve une unité d'extraction constituée d'une excavatrice, d'une flotte d'engins de chantier et d'un centre de retraitement.

Cette étude, présentée en annexe, a permis de montrer la complexité de ces systèmes et l'enjeu des analyses de disponibilité pour améliorer leur exploitation.

Ces systèmes montrent des caractéristiques de maintenance proche de celles des hélicoptères concernant les exigences de maintien en condition opérationnelle pour des temps d'activités quasi-permanents.

IV. BILAN DE VALIDATION

Nous venons de voir à travers les paragraphes précédents que nos propositions demanderaient des niveaux d'adaptation faibles. En effet, l'analyse de la disponibilité à partir de nos méthodes de modélisation nécessite principalement une adaptation des données d'entrées (caractéristiques d'exploitation, maintenance, fiabilité, organisation des ressources,..).

Nous avons montré à travers ce chapitre que nos propositions correspondent aux besoins de l'industriel. Cette réponse est justifiée d'une part, par le fait que les apports ont fait l'objet de concertations avec les experts et clients demandeurs, d'autre part, par le fait que les concepts reposent sur des principes robustes et compréhensibles par les expert métiers.

Finalement, nous apportons dans ce chapitre des éléments de validation qui permettent de justifier l'intérêt et la pertinence de l'apport scientifique de la méthode tout en soulignant les perspectives de travail concernant le traitement des données, la mise en place de la méthode et la généralisation de la méthode à tous les secteurs industriels.

CONCLUSION

GENERALE

CHAPITRE IX :

Bilan des travaux de recherches et Perspectives

PLAN DU CHAPITRE

CHAPITRE IX : BILAN DES TRAVAUX DE RECHERCHES ET PERSPECTIVES

I. BILAN GENERAL 214
II. RESULTATS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELS..... 214
II.1. Etude de l'existant..... 215
II.2. Proposition méthodologique de maîtrise de la disponibilité..... 215
II.3. Expérimentation et évaluation 216
III. PERSPECTIVES DE RECHERCHE 217
III.1. Perspectives à court terme 217
III.2. Perspectives à long terme 218

Chapitre IX : Bilan des travaux de recherches et Perspectives

I. BILAN GENERAL

Ce travail de thèse a été réalisé dans un cadre industriel en réponse à des besoins précis, à savoir caractériser la disponibilité pour en assurer la maîtrise dans le cadre de l'exploitation d'un ensemble d'aéronefs.

Dans cette optique, notre mission a consisté à proposer des méthodes de modélisation d'une exploitation en vue d'évaluer les performances en termes de disponibilité. Il s'agissait aussi pour nous d'identifier les leviers d'amélioration permettant d'optimiser les performances de l'exploitation.

Enfin, nous avons tenté de développer dans cette thèse un des leviers, à savoir le réordonnancement de la maintenance programmée.

Nous allons revenir dans un premier temps, sur les résultats de ce travail de recherche tant sur les fondements scientifiques qu'industriels. Dans un deuxième temps, nous proposons des éléments de réflexion sur les perspectives que nous inspirent les résultats obtenus.

II. RESULTATS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELS

En vue de répondre à la problématique énoncée dans le Chapitre II, nous avons commencé par redéfinir les concepts fondamentaux de la disponibilité et des méthodes permettant de l'évaluer. Nous avons ainsi pu témoigner des carences méthodologiques vues dans le domaine aéronautique.

De là, nous avons proposé une démarche structurée en 3 temps :

- Etude de l'existant
- Proposition méthodologique de maîtrise de la disponibilité
- Expérimentation et évaluation de notre proposition

II.1. Etude de l'existant

Apports scientifiques :

Cette phase s'inspire d'une revue de la littérature sur les méthodes de maîtrise de la disponibilité. Nous avons construit un référentiel articulé autour des principales fonctions de l'évaluation de la disponibilité.

Apports industriels :

Chez le constructeur Eurocopter, la mise en œuvre d'une analyse de l'existant a permis de recenser l'ensemble des méthodes d'évaluation étudiées dans le cadre d'analyses de maintenabilité ou pour le dimensionnement d'offres de soutien logistique.

De plus, l'analyse de l'existant a permis d'identifier les départements de l'entreprise intervenant dans le calcul de la disponibilité dans le but d'élaborer une cartographie des besoins en termes de disponibilité. En effet, ces besoins sont différents, le service logistique s'intéressera par exemple à la disponibilité des pièces de rechange alors que le support technique s'intéressera à la disponibilité des données et à l'exploitation de la flotte de systèmes.

> L'apport de cette synthèse des méthodes d'évaluation de la disponibilité permet de mettre en avant le choix de la méthode d'évaluation de la disponibilité en collaboration avec le constructeur.
>
> La cartographie ainsi établie des besoins en termes de disponibilité a permis d'identifier les intervenants dans le processus d'analyse des données nécessaires au traitement de la disponibilité.

II.2. Proposition méthodologique de maîtrise de la disponibilité

Apports scientifiques :

Cette phase consiste en la proposition d'une méthode d'analyse déterministe ou stochastique. Il ne s'agit pas de définir des notions fondamentales ou un nouvel outil. L'objet concerne plus la proposition d'une méthode voire d'une combinaison de méthodes exploitable et compréhensible par les experts métiers en vue de récupérer des données nécessaires à l'évaluation de la disponibilité.

Apports industriels :

Ces apports ont été avérés par l'expérimentation faite chez le constructeur

Eurocopter. Dans le cadre industriel, l'évaluation de la disponibilité a consisté à mesurer l'impact d'un paramètre tel que la fiabilité sur la disponibilité.

Les principaux apports de cette approche concernent :

- L'intégration de l'ensemble de bonnes pratiques utilisées dans l'industrie.
- L'adjonction de règles et pratiques complémentaires construites à partir des résultats de l'analyse de l'existant.

II.3. Expérimentation et évaluation

Apports scientifiques :

Sur le plan académique, l'utilisation de plusieurs cas d'étude permet d'élaborer des analogies entre les cas et de faire progresser la méthodologie sur la prise en compte des contraintes d'utilisation des ressources et du traitement des paramètres d'entrées.

Apports industriels :

Dans le cadre industriel, l'expérimentation sur plusieurs types d'analyse permet d'apporter plusieurs angles de vue sur la méthode à proposer. En effet, cette méthode doit pouvoir être utilisée pour des analyses de disponibilité dans le cadre d'étude de maintenabilité, dimensionnement d'offres de soutien logistique et réponse aux appels d'offres. Le cœur de la démarche doit être suffisamment général pour réaliser ces études.

Les principaux apports dans le cadre de cette phase concernent les points suivants :

- L'étude concrète met en évidence les objectifs et résultats chiffrés concernant la modélisation de l'exploitation et le gain potentiel en disponibilité en améliorant le réordonnancement de la maintenance programmée.
- L'élaboration d'un périmètre de la méthode tant pour le recueil des données, les hypothèses et l'impact des résultats sur la réalité.
- La comparaison de la méthode d'analyse conventionnelle et la méthode proposée dans le cadre des données d'entrées et du traitement des données.

III. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Nous envisageons deux catégories de perspectives à nos travaux de recherche, sur un horizon court terme et moyen/long terme :

- Dans un délai court terme, le déploiement de la méthode chez le constructeur Eurocopter, et sa pérennisation dans le temps.
- Dans un délai moyen/long terme, une réflexion pourrait être conduite pour amener des compléments à la méthodologie et affiner la robustesse de celle-ci.

III.1. Perspectives à court terme

Pour ce qui concerne, la finalisation du déploiement des méthodes et outils élaborés chez le constructeur Eurocopter, nous proposons les axes de travail suivants :

Dans le cadre de nos études, nous avons élaboré le recueil des données par le biais de questionnaires avec une actualisation bi-annuelle. Nous avons constaté que le niveau d'actualisation n'est pas suffisant dans la mesure où nous devons fournir des analyses de disponibilité précises en vue d'améliorer la planification de la maintenance. Des propositions sont en cours d'étude sur la possibilité de se connecter directement sur le système de gestion de données du client. Ce principe de « télé-récupération » des données est proche du principe de « e-maintenance » développé par le laboratoire Femto-St, à Besançon.

→ *Une réflexion est à mener avec l'industriel sur les modalités de recueil des données.*

Au cours de cette thèse nous avons proposé un prototype de maîtrise de la disponibilité et des maquettes permettant d'appliquer les concepts proposés. Ce prototype doit être développé au sein de la société et prendre en compte différents points de vue de traitement de l'information. Cet outil d'évaluation de la disponibilité doit s'appuyer sur une vue partagée entre les experts-métiers, exploitants de flotte, support technique avec, à chaque niveau, les informations essentielles pour les activités de chacun.

→ *Le développement d'un outil de support à la méthode permettrait d'appliquer la méthode sur la base du prototype développé dans cette thèse.*

Concernant les axes de recherche pouvant être conduits dans le cadre de nos travaux, nous envisageons le traitement des thèmes suivants : la robustesse de la méthode et les extensions envisageables.

Nous avons proposée les bases d'une méthode de modélisation « modulaire » dans l'objectif est de pouvoir la faire évoluer dans la prise en compte de la demande, l'affectation et la maintenance.

Dans cette optique, nous proposons des améliorations concernant la modélisation de la maintenance. En effet, la maintenance est analysée en prenant l'hypothèse qu'un système repose sur deux modes : soit il est disponible en attente d'une mission ou en train de réaliser une mission, soit il est indisponible à cause d'une immobilisation due à une maintenance programmée ou non programmée.

Nous proposons d'insérer un état intermédiaire, le mode dégradé. En d'autres termes, ce mode peut être justifié par la question suivante : « jusqu'à quel niveau de dégradation peut on considérer qu'un système est disponible ? ».

→ *La prise en compte du mode dégradé permettrait d'affiner la définition du taux de réussite de mission et préciser l'évaluation de la disponibilité.*

Dans le même champ de réflexion, la modélisation de la maintenance peut être améliorée par la prise en compte des tâches de maintenance conditionnelle. Ces types de tâches de maintenance sont devenues de plus en plus importantes dans un programme de maintenance.

→ *La prise en compte des tâches de maintenance conditionnelle permettrait d'optimiser le coût de maintenance puisqu'il s'agit d'identifier le moment adéquat de réaliser la tâche de maintenance en fonction de l'usage d'un système.*

III.2. Perspectives à moyen/long terme

En parallèle de ces propositions qui auront pour objectif de rendre la méthode plus robuste, nous pouvons également proposer les extensions méthodologiques suivantes :

Dans un cadre de réflexion plus large, nous envisageons de développer les autres leviers d'amélioration que nous n'avons pas traités dans cette thèse, à savoir l'optimisation de la gestion des ressources (pièces de rechange, outillages et main d'œuvre) et l'optimisation de la gestion de file d'attente.

→ *Le développement d'autres leviers d'amélioration permettrait d'aboutir à une opérationnalisation de la maîtrise de la disponibilité.*

Une autre perspective consisterait à finaliser le concept de « Design For Availability » qui peut se traduire par « la conception pour la disponibilité ». En effet, nous avons constaté dans ces travaux que le concept de disponibilité est la résultante de nombreux paramètres tels que la fiabilité, la maintenabilité, le soutien logistique. De ce fait, une des finalités de ces travaux serait d'exploiter cette réflexion pour concevoir de nouveaux systèmes intégrant déjà les conditions opérationnelles dans lesquelles il va devoir évoluer. L'intégration de ces conditions permettrait de définir la politique de maintenance adaptée aux besoins de l'exploitation cliente.

→ *La proposition d'approche telle que le « Design For Availability », au même titre que le « Design For Supportability » ou « Design For X » permet de définir un ensemble de travaux qui ont pour objectif d'améliorer la conception de système par des paramètres tels que la disponibilité ou le support. L'intérêt que peut représenter ces approches se trouve dans leur niveau de généricité. Ces méthodes sont formalisées pour une multitude d'applications industrielles. Les travaux que nous avons développés dans cette thèse contribuent à la formalisation d'une telle approche que nous projetons de développer dans les prochaines étapes de notre travail de recherche.*

ANNEXES

PLAN DES ANNEXES

I. GLOSSAIRE 221

II. PUBLICATIONS PERSONNELLES..... 226

III. REFERENCES..... 228

I. GLOSSAIRE

Aléas :

Risque d'incidents défavorables (Larousse). Un aléa devient une perturbation quand le contexte conduit le système de décision à le percevoir comme un trouble pour le fonctionnement du système opérant

Connaissance :

Représentation immatérielle d'une partie du monde (physique, de la conscience ou mathématique) structurée pour un objectif précis.

Design For Reliability :

Le Design For Reliability (DFR) est un ensemble de méthodes et d'outils permettant la prise en compte de la fiabilité d'un système dès le stade de conception [Poncelin 09].

Modèle déterministe :

Un modèle est déterministe dans le sens où ils prédisent les résultats (les valeurs pour les variables de sortie) pour un jeu de variables explicatives donné [Husson 01].

Disponibilité asymptotique :

La disponibilité asymptotique est la limite, si elle existe, de la disponibilité lorsqu'on fait tendre l'instant considéré vers l'infini.

Disponibilité instantanée :

La disponibilité instantanée est la probabilité pour qu'un système puisse accomplir la fonction requise de ce système, dans des conditions données et à un instant donné.

Disponibilité intrinsèque :

La disponibilité intrinsèque est, de par sa conception et sa réalisation, l'aptitude théorique d'un bien à accomplir un service. Cette notion est particulièrement intéressante dans la mesure où elle ne fait intervenir que les aspects de l'indisponibilité qui trouvent leurs origines dans la conception d'un système. Cet indicateur permet ainsi de mesurer et comparer les performances d'un ou plusieurs systèmes en termes de disponibilité (figée par la conception, la

fiabilité), mettant en évidence les principaux facteurs d'indisponibilité imputables au constructeur [Lyonnet 02].

Disponibilité moyenne :

Par extension, la disponibilité moyenne est la moyenne de la disponibilité instantanée sur un intervalle de temps donné. Ces dernières formes de disponibilité seront celles que nous exploiterons dans notre étude [AFN86].

Disponibilité opérationnelle :

La disponibilité opérationnelle est la seule qui peut être évaluée ou mesurée à partir des données d'activités. Elle constitue l'aptitude d'un système – sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de la logistique de maintenance – à remplir ou être en état de remplir une fonction à un instant donné ou dans un intervalle de temps donné [AFN86].

Disponibilité réalisable :

La disponibilité théorique est en quelque sorte la disponibilité prenant en compte les conditions environnementales et de fonctionnement théoriques. Cette disponibilité que l'on appellera dans le cadre de travail de recherche, la disponibilité réalisable, prendra en compte l'ensemble des indisponibilités liées à la maintenance (Programmée, non Programmée) et cela dans un environnement idéal d'utilisation (ressources logistiques infinies) [Septier 05].

Employabilité :

L'employabilité est l'un des indicateurs de disponibilité les plus « parlants » pour la gestion d'un aéronef, avant son départ pour la réalisation d'une mission [Septier 05].

Exploitation :

L'exploitation d'un système complexe peut être définie comme l'ensemble des moyens mis en œuvre pour l'utilisation et la maintenance d'un système.

Heuristique :

L'heuristique (du grec *heuriskêin*, « trouver ») est l'utilisation de règles empiriques :

- pratiques, simples et rapides,
- facilitant la recherche des faits et l'analyse de situations,
- dans un objectif de résolution de problèmes et de prise de décision,

- dans un domaine particulier.

Les heuristiques sont souvent, à la différence des algorithmes, tirées de l'expérience ou d'analogies, plutôt que d'une analyse scientifique trop complexe car recensant le maximum d'éléments, et donc difficile, voire impossible à mener et exploiter.

Les heuristiques trouvent leur place dans les algorithmes qui nécessitent l'exploration d'un grand nombre de cas, car elles permettent de réduire leur complexité moyenne en examinant d'abord les cas qui ont le plus de chances de donner la réponse.

Incertitude :

Evènements futurs qui ne peuvent être prévus quantitativement dans des limites utiles. Il en est ainsi d'une destruction accidentelle d'équipements, d'une grève majeur ou d'une obsolescence causée par une innovation [APICS 05].

Indicateur :

Un indicateur est un instrument de mesure qui permet d'observer périodiquement les évolutions d'un phénomène, en le positionnant par rapport à des objectifs fixés.

Maintenance :

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». [AFN01]

Mission :

Charge ou tâche particulière confiée à un système. Pour des missions de type aérienne, nous définirons celle-ci comme un vol au cours duquel l'équipage d'un avion effectue une opération prescrite par le commandement (mission d'interception, de reconnaissance, de bombardement, de transport, etc.) [APICS 05].

Perturbation :

Trouble, désordre, dérangement (Larousse).
Evénement imprévu dont l'occurrence gêne la réalisation des objectifs du système qui le subit.

Proactivité :

Aptitude d'un système à pouvoir anticiper les évènements perturbants et prendre

des décisions concernant une situation avant que celle-ci ne perturbe le système.

Programme de maintenance :

Ensemble de documents dont l'objectif est de définir les moyens à mettre en œuvre (Main d'œuvre, Outillage, Pièces de rechange) lors d'une opération de maintenance.

Robustesse :

Qualité d'un système qui reste relativement stable avec un minimum de variation même lorsque les facteurs qui influencent le fonctionnement ou l'utilisation, comme l'environnement et l'usure changent constamment [APICS].

SADT :

SADT (Structured - Analysis - Design – Technique) est une marque déposée de SofTech (USA) et d'IGL Technologie (France).) développés aux USA par Doug Ross en 1977 et introduits en Europe à partir de 1982 par Michel Galiner.

SADT permet non seulement de décrire les tâches du projet et leurs interactions, mais aussi de décrire le système que le projet vise à étudier, créer ou modifier, en mettant notamment en évidence les parties qui constituent le système, la finalité.

Scénario d'exploitation :

Ensemble de caractéristiques relatif à la gestion des missions et à la gestion de maintenance d'une exploitation de système permettant de représenter l'état (disponibilité) d'un ensemble de système sur un temps de référence.

Simulation :

Procédé reproduisant le comportement d'un système en vue d'étudier les réactions de celui-ci, d'enseigner son utilisation, etc.

Soutien logistique Intégré :

Le **Soutien Logistique Intégré** (*SLI*, ou *Integrated Logistic Support*) est un ensemble de techniques visant à définir le système de soutien qui sera associé au système principal et à influencer la définition du système principal pour une meilleure disponibilité opérationnelle future, tout en en maîtrisant le coût global de possession. Le but du système de soutien est d'assurer au système principal sa disponibilité opérationnelle.

Modèle stochastique :

Un modèle est dit stochastique s'il repose sur l'étude des phénomènes aléatoires dépendant du temps.

Taux de redondance :

Le taux de redondance permet de mesurer la capacité à mobiliser des ressources de l'exploitation. Il permet ainsi d'identifier les excès de charge et de mieux ajuster la mobilisation des systèmes

Taux de réussite de mission :

Le taux de Réussite de mission permet de mesurer le taux de service de la flotte. Il caractérise ainsi le principal indicateur pour l'exploitant de la flotte. Cette indicateur sera mesuré pour chaque mission planifié et ce sur le temps de référence

Temps d'exploitation :

Le temps d'exploitation peut également appelé temps de référence ou temps total. Il représente la période de référence choisie pour l'analyse des temps d'utilisation et de maintenance.

Temps de fonctionnement :

Le temps de fonctionnement est la partie du temps effectif de disponibilité correspondant à un état de fonctionnement de l'entité.

Temps requis :

Le temps requis est généralement le temps qui intéresse les industriels puisqu'il représente le temps dans lequel l'exploitant réalise son activité. Dans cette plage temporelle (temps requis), l'exploitant doit mettre en œuvre l'ensemble de ses infrastructures et ressources pour remplir les missions qui lui seront assignées.

UML :

Unified Modeling Language est un langage unifié de modélisation objets.

Zonage :

Découpage d'un espace en zones. Dans le cadre de la maintenance aéronautique, c'est une technique permettant de trier les opérations de maintenance par zones et de répartir les activités de maintenance en fonction, au cours du temps.

II. PUBLICATIONS PERSONNELLES

[Djeridi et al., 06] Djeridi, R., Cauvin A. et Poncelin G., "**Modélisation des processus d'une chaîne logistique – cas des entreprises manufacturières**", in: CONFERE 2006, Conception et Innovation, Marrakech, Maroc, juillet 2006.

[Djeridi et al., 06] Djeridi, R., Cauvin A. et Poncelin G., "**Modelling and performance evaluation of the decision-making processes in the product life cycle in extended environment**", in: Virtual Concept : International Meeting on Interactive Design and Manufacturing Methodologies, Tools and Processes, vol. 2, Cancun, Mexique, novembre 2006.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Intégration de la disponibilité en conception pour l'amélioration de la maintenance aéronautique : Formulation de la problématique du Design For Availability**", in: 2ème Congrès International sur la Conception et la Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM'2007), Monastir, Tunisie, mars 2007.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Démarche de modélisation et de diagnostic pour l'évaluation des performances des entreprises en environnement étendu**", in: 2ème Congrès International sur la Conception et la Modélisation des Systèmes Mécaniques (CMSM'2007), Monastir, Tunisie, mars 2007.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Modélisation des processus de décision en environnement étendu avec les multi grilles GRAI**", in: workshop du Groupe de Travail ECI (Entreprise Communicante et Interopérabilité) du GDR-MACS, Paris, mai 2007.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Démarche de modélisation et de diagnostic pour l'évaluation des performances des entreprises en environnement étendu**", in: 7ème Congrès International de Génie Industriel, Trois Rivières, Québec, juin 2007.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Modelling of decision processes in extended environment using GRAI multigrids – Implementation in supply chains**", in: 19th International Conference on Production Research (ICPR19), Valparaiso, Chili, juillet 2007.

[Djeridi et Cauvin., 07] Djeridi, R., Cauvin A., "**Gestion et évaluation de la disponibilité pour le maintien en condition opérationnelle des réseaux d'organisations industrielles**", in: IEEE-SMC workshop international Logistique et Transport (LT'2007), Sousse, Tunisie, novembre 2007.

[Djeridi et Cauvin, 08] Djeridi, R., Cauvin, A., Glade, M., Ghelam, S., Matheron, F., **Availability Modelling for optimizing the complex systems maintenance**, Industrial Simulation Conference – European Multidisciplinary Society for Modelling and Simulation Technology (ISC 2008 – Eurosis), Lyon, France.

[Djeridi et Cauvin., 08] Djeridi, R., Cauvin A., "**Planification optimisée de la production au regard de la maintenance programmée : Modélisation de la disponibilité des systèmes complexes"**, in: 1er Congrès des Innovations Mécaniques (CIM'2008), Sousse, Tunisie, avril 2008.

[Djeridi et Cauvin., 08] Djeridi, R., Cauvin A., "**Integration of a modelling method in the design of supply chains: proposals of an approach in the framework of Design For Logistics**", in: 5th International Conference JTEA'2008, Hammamet, Tunisie, mai 2008.

[Djeridi et al., 09] Djeridi, R., Cauvin, A. et Glade M., (2009), "**Modélisation de la disponibilité opérationnelle des systèmes complexes**", in: 8ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI 2009), Tarbes, France, juin 2009.

[Djeridi et Cauvin, 09] Djeridi, R., Cauvin, A., (2009), "**Operational availability assessment for improving the maintenance of complex systems**", in: 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2009), Moscou, Russie, juin 2009.

[Djeridi et Cauvin, 09] Djeridi, R., Cauvin, A., (2009), **Availability assessment of complex systems using Monte-Carlo Method : Application to aeronautical maintenance processes**, IEEE-SMC workshop international Logistique et Transport (LT'2009), Sousse, Tunisie.

[Djeridi et al., 10] R. Djeridi, A. Cauvin, D. Dufrène et F. Matheron, « **Proposal of a model for operations of complex systems to support the evaluation of their availability – example of the mining industry** », International Journal of engineering, Elsevier, 2010.

III. REFERENCES

[Afnor 86] X 60-502, « **Fiabilité en exploitation et après vente »**, AFNOR 1986.

[Afnor 95] X 60-020, « **Indicateurs de maintenance »**, AFNOR, août 1995.

[Afnor 98] AFNOR, « **Recueil des normes françaises X06, X50, X60 »**, AFNOR 1998.

[Afnor 01] X 60-319, « **Norme européenne ICS : Terminologie de la maintenance »**, AFNOR, Juin 2001.

[Afnor 02] NF X60-000, « **Maintenance industrielle - Fonction maintenance »**, AFNOR, 3ème Tirage, Mai 2002.

[Ait-kadi et al., 01] D. Ait-Kadi, J. Gao et M-C. Portmann, « **Minimisation des coûts de détection de pannes à partir des coupes minimales du diagramme de fiabilité** », Actes MOSIM 2001 : Troisième conférence Francophone de Modélisation et Simulation, Troyes, France, 2001.

[Andrews et al., 08] J-D. Andrews, D. Prescott, R. Remenyte-Prescott, (2008). « **A Systems Reliability Approach to Decision Making in Autonomous Multi-Platform Systems Operating a Phased Mission »**, Proceedings of the 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2008), Las Vegas, Nevada.

[APICS 05] J.F. Cox III, J.H. Blackstone Jr., « **Apics dictionnary - eleventh edition - Traduction française (lexique français -Anglais)** », MGCM, 2005.

[Auge 98] JC. AUGE, « **Utilisation d'un modèle à hasard proportionnel pour évaluer la fiabilité des composants mécaniques »**, Thèse de l'école centrale de Lyon : 1998. 163 pages.

[Bebel et Bertsche, 08] S. Bebel, B. Bertsche, « **Modeling and Simulation Methodology of the Operational Availability and Logistics using Extended Stochastic Petri Nets »**, Proceedings of the 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2008), Las Vegas, Nevada, 2008.

[Belmann et Dreyfus 74] R. Belmann and S.E Dreyfus. « **Applied dynamic programming »**. Princeton Universty Press, 1974.

[Benbouzid-Sitayeb et al., 2006] F. Benbouzid-Sitayeb, C. Varnier et N. Zerhouni, « **Résolution de problème de l'ordonnancement conjoint Production / Maintenance par colonies de fourmis** », 6ème Conférence Francophone de modélisation et Simulation MOSIM06, Rabat, Maroc, 2006.

[Bonnel 2001] P. Bonnel, « **Prévision de la demande de transport**», Thèse pour l'Habilitation à diriger les recherches de l'Université Lumière Lyon 2, 2001.

[Berrah 02] L. BERRAH, « **L'indicateur de performance : concepts et applications »**. Toulouse: Cépadues-Editions, 171 pages, 2002.

[Billaut et al., 05] J-C. Billaut, A. Moukrim et E. Sanlaville. **« Flexibilité et robustesse en ordonnancement** », Hermes, chapter 1, pp. 13_32, 2005.

[Cauvin 05] A. Cauvin, « **Analyse, Modélisation et Amélioration de la réactivité des systèmes de décision dans les organisations industrielles : Vers une aide à la conduite des processus d'entreprise dans un contexte perturbé** », Habilitation à Diriger les Recherches, Université Paul Cézanne Aix Marseille III, 2005.

[Chong et al. 03] C.S. Chong, A.I. Sivakuma et R. Gay. **« Simulation-based scheduling for dynamic discrete manufacturing** ». In: Winter Simulation Conference, pages 1465_1473, New Orleans, USA, 2003.

[Dascau 01] D. Dascau, « **Méthodes probabilistes pour la modélisation de la maintenance préventive »**. UT de Compiègne.
www.dma.utc.fr/PgePerso/Dascalu.htm. 2001

[Davenport et al., 00] A-J. Davenport et C-J. Beck. **« A survey of techniques for scheduling with uncertainty** », Technical report, IBM and Ilog, 2000.

[Deloux 08] E. Deloux, « **Politique de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant** », Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2008.

[Dib et al., 08] M. DIB, A Caminada, H. Mabed, « **Propagation de contraintes et listes Tabou pour le CSP** », JSP 2008, Quatrième Journées francophones de programmation par contraintes, Nantes, France, 2008.

[Esquirol et al., 99] P. Esquirol et P. Lopez. **« L'ordonnancement** », Economica, 1999.

[Esswein 03] C. Esswein. « **Un apport de flexibilité séquentielle pour l'ordonnancement robuste** », PhD thesis, Université de François Rabelais de Tours, 2003.
[Girardin et al., 2000] P. Girardin, et C. Bockstaller, « **It is possible to validate an indicator** ». International Conference Index 99, St Petersburg. 14 p., 2000.

[Glade 05] M. Glade, « **Modélisation des coûts de cycle de vie : prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité** ». Application à l'aéronautique, Thèse de l'école centrale de Lyon : 2005.

[Gotha 02] Gotha. « **Flexibilité et Robustesse en Ordonnancement** ». Le bulletin de la ROADEF, vol. 8, pages 10_12, 2002.

[Hall et al., 04] N.G. Hall et M.E. Posner. « **Sensitivity analysis for scheduling problems**», Journal of Scheduling, vol. 7, pages 49_83, 2004.

[Herroelen et al., 02] W. Herroelen et R. Leus. « **Project scheduling under uncertainty. Survey and Research Potentials** ». In: Eighth International Workshop on Project Management and Scheduling (PMS'2002), Valencia, Spain, 2002.

[Herroelen et al., 04] W. Herroelen et R. Leus. « **Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures** ». International Journal of Production Research, vol. 42, no. 8, pages 1599_1620, 2004.

[Husson, 01] F. Husson, « **Construire un modèle stochastique à partir d'un modèle déterministe** », Revue de statistique appliquée, 2001

[ISO 9241-11 98] ISO 9241-11, « **Exigences ergonomiques pour travail de bureau avec terminaux à écrans de visualisation (TEV) – Partie 11 : Lignes directrices relatives à l'utilisabilité**», 1998.

[Kaabi 05] J. Kaabi, « **Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance dans les systèmes de production** », Thèse de doctorat, Université de Franche Comté, France, 2004.

[Knotts 99] R.M.H. Knotts, « **Civil aircraft maintenance and support: Fault diagnosis from a business perspective** », Journal of quality in maintenance Engineering, Vol 5 No 1999.

[Kouvelis et al. 00] P. Kouvelis, R.L. Daniels et G. Vairaktarakis. « **Robust scheduling of a two-machine flow shop with uncertain processing times** ». IIE Transactions, vol. 32, pages 421_432, 2000.

[Lawler et al. 66] E.L. Lawler et D.E. Wood. «**A Branch and bound methods: A survey** », Operations Research, 14: 699_719, 1966.

[Lee et al., 1997] H-L. Lee, V. Padmanabhan et S. Whang, **« The Bullwhip effect in supply chains** », Sloan Management Review, Volume 38, Issue 3, pp. 93-102, 1997.

[Lefebvre 2009] A. Lefebvre, « **Contribution à l'amélioration de la testabilité et du diagnostic de systèmes complexes : Application aux systèmes avioniques »**, Thèse de l'université Joseph Fourier : 2009.

[Levasseur et al., 07] N. Levasseur, P. Boizumault, et S. Loudni. « **Une heuristique de sélection de valeur dirigée par l'impact pour les WCSP** ». Rapport technique, 2007.

[Levasseur et al., 08] N. Levasseur, P. Boizumault, S. Loudni, « **Heuristiques de choix de voisinage pour les recherches `a voisinage variable dans les WCSP** », Actes JFPC 2008 : Quatrièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes, Nantes, France, 2008

[Marmier 07] F. Marmier, « **Contribution à l'ordonnancement des activités de maintenance sous contrainte de compétence : une approche dynamique, proactive et multicritère** », Thèse de Doctorat l'Université de Franche-Comté, 2007.

[Marquez et al. 95] A. C. Marquez, A. S. Heguedas, B. Iong, (2005). **Monte Carlo based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants**, Reliability engineering and system Safety, Vol. 88, pp. 273-289.

[MIL STD 1388, 93] US DoD requirements for a logistic support analysis record, 1993. http://www.navy.mi.th/logis/ils/data_files/MIL-STD.pdf

[Moura et al., 08] M. Moura, P.R. Firmino, E. Droguett, C. Magno, C. Jacinto, (2008). **Optical Monitoring System Availability Optimization via Semi-Markov Processes and Genetic Algorithms**, Proceedings of the 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS 2008), Las Vegas, Nevada.

[Paris et al., 07] L. Paris, D. Habet, et B. Benhamou, « **Voisinage consistant pour le problème de satisfaisabilité** », Actes JFPC 2007 : Troisièmes Journées Francophones de Programmation par contraintes, Yvelines, France, 2007.

[Poncelin 09] G. Poncelin, « **Construction et mise en place d'une méthode de maîtrise de la fiabilité sur le cycle de vie des systèmes complexes** », 2009, thèse de doctorat, ENSAM Aix en Provence.
[Sabuncuoglu et al., 00] I. Sabuncuoglu et M. Bayiz. **« Analyse of reactive scheduling problems in a job shop environment** ». European Journal of Operational Research, vol. 126, pages 567_586, 2000.

[Saltelli et al., 00] A. Saltelli, K. Chan et M. Scott, « **Sensitivity Analysis** », John Wiley& Sons publishers New York, 2000.

[Septier, 06] P. Septier, « **Modélisation de la disponibilité : un support de partage efficace entre expert et décideurs pour influencer sur le soutien de demain** », Thèse professionnelle, 2008.

[Sevaux et al., 04] M. Sevaux et K. Sörensen. « **A genetic algorithm for robust schedules in a just-in-time environment** ». 4OR - Quaterly journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, vol. 2, no. 2, pages 129_147, 2004.

[Trilling 06] L. Trilling, « **Aide à la décision pour le dimensionnement et le pilotage de ressources humaines mutualisées en milieu hospitalier** », Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, 2006

[Trung 2005] L.H. Trung, « **Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement** », Thèse de Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.

[Yates et al., 07] S.W. Yates, (2007). **A Practical Approach to Bayesian Reliability Demonstration**; Proceedings 2007 Annual Reliability and Maintainability Symposium; Paper 13A2.

[Zwingmann 05] X. Zwingmann, « **Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception** », Thèse de Doctorat de l'université de Laval, Québec, 2005.

[Zille, 09] V. Zille, « **Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants** », 2009.

CONTRIBUTION A LA MAITRISE DE LA DISPONIBILITE DE SYSTEMES COMPLEXES : PROPOSITION D'UNE METHODE DE REORDONNANCEMENT PROACTIF DE LA MAINTENANCE

RESUME : Une des préoccupations majeures du monde industriel est d'avoir une exploitation performante permettant de garantir au mieux la qualité des missions réalisées, le respect des délais demandés et la minimisation des coûts d'exploitation. Toutefois, aujourd'hui la concurrence accrue et la complexité des systèmes conduit les industriels à développer des approches qui permettent la maîtrise de la disponibilité et en particulier à prendre en compte ce paramètre pour l'élaboration de la politique de maintenance.
L'objectif de ce manuscrit est de proposer des éléments méthodologiques permettant de caractériser le concept de disponibilité pour en assurer la maîtrise.

Nous proposons une méthode de modélisation d'une exploitation en vue d'évaluer les performances en termes de disponibilité. Les résultats de cette évaluation permettent entre autres d'identifier les leviers d'amélioration pouvant agir sur les performances de l'exploitation. Ensuite, nous nous sommes focalisés, dans cette thèse, sur un de ces leviers, à savoir le réordonnancement de la maintenance programmée permettant de répondre au besoin du partenaire industriel. Dans cette optique, nous avons proposé une méthode permettant d'améliorer le réordonnancement d'un programme de maintenance en vue d'optimiser la disponibilité d'un système voire d'un ensemble de systèmes. Dans le cadre de cette méthode, nous avons proposé des heuristiques permettant de réordonnancer les opérations de maintenance en fonction des opportunités d'un exploitant de système.

Nous chercherons dans ce manuscrit à apporter des éléments méthodologiques expérimentées chez la société Eurocopter, reposant sur des principes opérationnels et basés sur des approches par scénario.

Mots clés : Disponibilité ; Modélisation ; Exploitation ; Maintenance ; Réordonnancement ; Optimisation.

CONTRIBUTION TO THE AVAILABILITY CONTROL OF COMPLEX SYSTEMS: PROPOSAL OF PROACTIVE RESCHEDULING METHOD OF THE MAINTENANCE

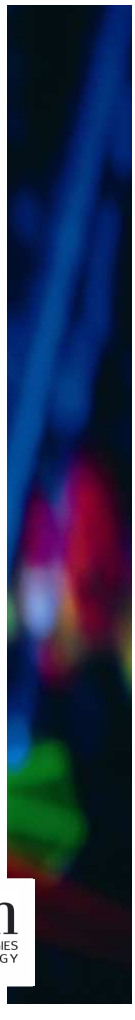
ABSTRACT : One of industrial strength is to lead a performing exploitation to ensure the quality of missions, time mission respect, operating costs minimization. However, the competitiveness and the complexity of system lead industrials to develop an approach in order to control the availability taking into account this parameter in the processes of maintenance design.

The main objective of this manuscript is to propose methodological elements in order to characterize availability to controlling it.

First, we propose an operating modeling method in order to assess performances in terms of availability. The results of the assessment can identify levers that impact the exploitation performance. Second, we focus on one of the levers: the maintenance rescheduling that meets the industrial need. In this way, we propose a method that can improve the maintenance rescheduling in order to optimize the availability of the system or of the fleet of systems. In the framework of this method, we propose heuristics that can reschedule maintenance activities in relation to industrial opportunities.

We will try throughout in this manuscript to propose method implemented in the Eurocopter Company, based on operational practices and scenarios proposition.

Keywords : Availability; Modeling; Exploitation; Maintenance; Rescheduling; Optimization.



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY