



**HAL**  
open science

# Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe

Kim Anh Nguyen

► **To cite this version:**

Kim Anh Nguyen. Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université de Technologie de Troyes, 2015. Français. NNT : 2015TROY0027 . tel-03361209

**HAL Id: tel-03361209**

**<https://theses.hal.science/tel-03361209>**

Submitted on 1 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse  
de doctorat  
de l'UTT

**Kim Anh NGUYEN**

**Développement de stratégies  
de maintenance prévisionnelle  
de systèmes multi-composants  
avec structure complexe**

**Spécialité :**  
**Optimisation et Sécurité des Systèmes**

2015TROY0027

Année 2015

---

---

# THESE

*pour l'obtention du grade de*

**DOCTEUR de l'UNIVERSITE  
DE TECHNOLOGIE DE TROYES  
Spécialité : OPTIMISATION ET SURETE DES SYSTEMES**

*présentée et soutenue par*

**Kim Anh NGUYEN**

*le 16 octobre 2015*

---

---

**Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de  
systèmes multi-composants avec structure complexe**

---

---

## JURY

|                   |                             |                        |
|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| M. C. BÉRENGUER   | PROFESSEUR DES UNIVERSITES  | Président (Rapporteur) |
| M. P. DEHOMBREUX  | PROFESSEUR ORDINAIRE        | Rapporteur             |
| M. V. P. DO       | MAITRE DE CONFERENCES       | Directeur de thèse     |
| Mme M. FOULADIRAD | MAITRE DE CONFERENCES - HDR | Examinatrice           |
| M. A. GRALL       | PROFESSEUR DES UNIVERSITES  | Directeur de thèse     |
| M. É. ZAMAÏ       | MAITRE DE CONFERENCES - HDR | Examineur              |



## Remerciements

Au terme de mes études doctorales, je voudrais dire un grand merci à tous ceux et celles qui m'ont soutenu d'une manière ou d'une autre, et sans qui je n'aurais pu réaliser mon parcours académique.

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de recherche, M. Phuc Do et M. Antoine Grall qui pour m'avoir encadré durant ma thèse, et tout au long des années passées de thèse. Leurs grandes disponibilités, leurs générosités et savoirs ont énormément contribué à la réalisation de cette thèse. Je leur exprime ici toute ma reconnaissance et mon admiration.

M. Christophe Bérenguer et M. Pierre Dehombreux, qui ont accepté d'être rapporteurs de ma thèse et je tiens à leur exprimer ma gratitude pour l'attention qu'ils y ont portée et les observations pertinentes qu'ils ont faites sur ce travail. Je tiens également spécialement à remercier M. Eric Zamaï et Mme. Mitra Fouladirad pour avoir accepté d'évaluer cette thèse.

Je remercie M. Pierre Beauseroy, directeur du laboratoire de Modélisation et Sécurité des Systèmes (LM2S), pour m'avoir accueilli dans le laboratoire. J'étends ces remerciements au directeur de l'École Doctorale M. Régis Lengellé, à mesdames secrétaires de l'École Doctorale, à mesdames secrétaires du pôle ROSAS et aux membres du laboratoire LM2S/ Institut Charles Delaunay (ICD).

À ma femme Khanh Ha Nguyen Thi, mon fils Hoang Bach Nguyen, qui m'ont supporté durant toutes ces années et qui ont tant sacrifié pour moi : je vous aime beaucoup. Un gros merci à mes pères, à mes mères, à mon professeur M. Quang Vinh Doan, à mes frères et soeurs, qui m'ont soutenu et encouragé de loin.

Mes remerciements vont également à M. Khac Tuan Huynh, M. Hai Canh Vu et M. Danh Ngoc Nguyen pour leur soutien de spécialité. Je ne peux également manquer l'occasion d'adresser un remerciement à mes amis pour leur amitié sincère et hors pair.

Cette thèse de doctorat est effectuée au sein du laboratoire LM2S - Pôle Recherche Opérationnelle, Statistiques Appliquées et Simulation (ROSAS) - ICD, UMR 6281, CNRS - Université de technologie de Troyes. Les travaux de thèse sont réalisés avec le soutien financier du département de Développement International de l'Éducation (VIED)- Ministère de l'Éducation et de la Formation du Vietnam (MEF) et du laboratoire LM2S.

*Kim Anh NGUYEN*



## Résumé

Aujourd'hui, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes. Cette complexité est due d'une part à la structure du système qui ne se résume pas à des structures classiques en fiabilité (structures séries, structures parallèles, structures séries-parallèles, etc.), d'autre part à la prise en compte de composants présentant des phénomènes de dégradation graduelle que des systèmes de monitoring permettent de surveiller. Ceci mène à l'objectif principal de cette thèse portant sur le développement des stratégies de maintenance prévisionnelle pour des systèmes multi-composants complexes. Les politiques envisagées proposent notamment des stratégies de regroupement de composants permettant de tirer partie des dépendances économiques identifiées. Des facteurs d'importance permettant de prendre en compte la structure du système et la dépendance économique sont développés et combinés avec les évaluations de fiabilité prévisionnelle des composants pour l'élaboration de règles de décision de regroupement de composants. De plus, un couplage des règles de décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange est également étudié.

L'ensemble des études menées montrent l'intérêt de la prise en compte de la fiabilité prévisionnelle des composants, des dépendances économiques et de la structure complexe du système dans l'aide à la décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange. L'avantage des stratégies développées est vérifié en les comparant à d'autres existantes dans la littérature.



## **Abstract**

Today, industrial systems become more and more complex. The complexity is partly due to the structure of the systems that cannot be reduced to classic structure reliability (series structures, parallel structures, series-parallel structures, etc) and partly to the consideration of components with gradual degradation phenomena that can be monitored. This leads to the main purpose of this thesis about the development of predictive maintenance strategies for complex multi-component systems. The proposed policies provide maintenance grouping strategies to take advantage of the economic dependencies between components. The predictive reliability of components and importance measures which allow to take into account the structure of the system and the economic dependencies are developed to construct grouping decision rules. Moreover, a joint decision rule for maintenance and spare parts provisioning is also studied.

All the conducted studies show the interest in the consideration of predictive reliability of components, economic dependencies as well as complex structure of the system in maintenance decisions and spare parts provisioning. The advantage of the developed strategies is confirmed by comparison with other strategies existing in the literature.



# Table des matières

|   |          |
|---|----------|
| Introduction générale   | xvii     |
| <b>I Cadre d'étude</b>  | <b>1</b> |
| <b>1</b>  |          |
| <b>Maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe : problématique</b>  |          |
| 1.1 Introduction . . . . .  | 3        |
| 1.2 Modélisation de systèmes multi-composants avec structure complexe . . .   | 4        |
| 1.2.1 Configuration/structure du système . . . . .  | 5        |
| 1.2.2 Modélisation de comportements propres des composants . . . . .  | 6        |
| 1.2.3 Modélisation de dépendances entre composants . . . . .  | 7        |
| 1.3 Stratégies de maintenance . . . . .   | 8        |
| 1.3.1 Divers types de maintenance . . . . .   | 8        |
| 1.3.2 Histoire des stratégies de maintenance . . . . .  | 10       |
| 1.3.3 Maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe . . . . .   | 11       |
| 1.3.4 Problème conjoint de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement de pièces de rechange pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe . . . . . | 13       |
| 1.4 Évaluation des stratégies de maintenance . . . . .  | 13       |
| 1.5 Conclusion . . . . .  | 14       |
| <b>2</b>  |          |
| <b>Étude bibliographique</b>  |          |
| 2.1 Introduction . . . . .  | 15       |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 2.2   | Modélisation de systèmes à composants multiples avec structure complexe  | 16 |
| 2.2.1 | Analyse de la structure du système . . . . .   | 16 |
| 2.2.2 | Analyse de rôles des composants par facteurs d'importance . . . . .  | 21 |
| 2.2.3 | Modélisation stochastique des composants . . . . .   | 22 |
| 2.2.4 | Modélisation des dépendances économiques entre composants . . . . .  | 27 |
| 2.3   | Stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes multi-composants  | 30 |
| 2.3.1 | Nature et caractéristiques des interventions . . . . .   | 30 |
| 2.3.2 | Indicateurs d'aide à la décision de maintenance conditionnelle . . . . .   | 33 |
| 2.3.3 | Stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes multi-composants . . . . .  | 34 |
| 2.4   | Méthodes d'évaluation . . . . .  | 45 |
| 2.4.1 | Critères économiques . . . . .   | 45 |
| 2.4.2 | Méthodes d'évaluation . . . . .  | 46 |
| 2.5   | Conclusion et problèmes d'études . . . . .   | 48 |
| 2.5.1 | Modélisation d'un système à composants multiples avec structure complexe . . . . .   | 48 |
| 2.5.2 | Développement des stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange pour des systèmes à composants multiple avec structure complexe . . . . . | 50 |
| 2.5.3 | Évaluation des performances économiques des stratégies proposées   | 52 |

## **II Stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe 53**

### **Introduction 55**

|   |
|---|
| <b>3</b><br><b>Modélisation de dégradation et structure de coûts de maintenance</b> |
|---|

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1   | Introduction . . . . .   | 57 |
| 3.2   | Modélisation de dégradation du système . . . . .                     | 58 |
| 3.2.1 | Description générale de dégradation . . . . .                        | 58 |
| 3.2.2 | Modélisation de dégradation par processus Gamma . . . . .            | 59 |
| 3.2.3 | Estimation de paramètres du processus de dégradation Gamma . . . . . | 61 |
| 3.2.4 | Dépendance d'états entre composants dans le système . . . . .        | 62 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3   | Prédiction de fiabilité/RUL des composants et du système . . . . . | 63 |
| 3.3.1 | Prédiction de fiabilité au niveau du composant . . . . .           | 63 |
| 3.3.2 | Prédiction de fiabilité au niveau du système . . . . .             | 65 |
| 3.4   | Interventions et structures des coûts . . . . .                    | 67 |
| 3.4.1 | Opération d'inspection . . . . .                                   | 67 |
| 3.4.2 | Opérations de maintenance . . . . .                                | 68 |
| 3.5   | Conclusion . . . . .   | 71 |

## **4**

### **Stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum et maintenance corrective groupée**

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1   | Introduction . . . . .  | 73 |
| 4.2   | Analyse de structure complexe par le facteur d'importance de Birnbaum . .   | 74 |
| 4.3   | Stratégie par l'utilisation de facteur de Birnbaum avec maintenance correc-<br>tive groupée . . . . .                   | 75 |
| 4.3.1 | Stratégie de maintenance corrective groupée basée sur les opportu-<br>nités de maintenance : sous-stratégie O . . . . . | 76 |
| 4.3.2 | Stratégie de maintenance préventive basée sur le facteur d'impor-<br>tance structurel : sous-stratégie IB . . . . .     | 77 |
| 4.4   | Optimisation de la stratégie de maintenance proposée . . . . .  | 78 |
| 4.4.1 | Critère de performance économique . . . . .   | 78 |
| 4.4.2 | Modèle mathématique d'évaluation de maintenance . . . . .   | 79 |
| 4.4.3 | Détermination des paramètres optimaux de la règle de décision de<br>maintenance optimaux . . . . .                      | 83 |
| 4.5   | Application numérique et analyse des performances de la stratégie proposée  | 83 |
| 4.5.1 | Optimisation de maintenance basée sur la stratégie proposée . . . .   | 86 |
| 4.5.2 | Analyses de performance de la stratégie proposée . . . . .  | 87 |
| 4.6   | Conclusion . . . . .  | 94 |

## **5**

### **Stratégie de maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples en utilisant le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût**

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.1 | Introduction . . . . .  | 97 |
| 5.2 | Extension d'un facteur d'importance probabiliste . . . . .                        | 98 |
| 5.3 | Stratégie de maintenance prévisionnelle proposée : stratégie $(T, R_p^S)$ . . . . | 99 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.4   | Optimisation de la stratégie de maintenance proposée . . . . .                              | 101 |
| 5.4.1 | Critère de performance économique . . . . .   | 101 |
| 5.4.2 | Modèle mathématique d'évaluation et l'optimisation de maintenance                           | 102 |
| 5.5   | Application numérique et analyse des performances de la stratégie proposée                  | 104 |
| 5.5.1 | Optimisation de la stratégie proposée et de la stratégie $(T, R_p, R_{op})$                 | 105 |
| 5.5.2 | Étude de sensibilité aux deux stratégies de maintenance . . . . .                           | 108 |
| 5.5.3 | Evaluation des performances des deux stratégies effectuée sur le système en série . . . . . | 111 |
| 5.6   | Conclusion . . . . .  | 114 |

**6**

**Comparaison de performance de deux stratégies de maintenance proposées**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | Introduction . . . . .   | 115 |
| 6.2   | Rappel des caractéristiques importantes et comparaison qualitative de deux stratégies de maintenance proposées . . . . . | 116 |
| 6.3   | Cas d'étude . . . . .  | 116 |
| 6.4   | Optimisation de maintenance de deux stratégies proposées . . . . .   | 118 |
| 6.5   | Études de sensibilité de deux stratégies de maintenance . . . . .  | 122 |
| 6.5.1 | Analyse de sensibilité au coût d'inspection . . . . .  | 122 |
| 6.5.2 | Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre de maintenance . . . . .   | 124 |
| 6.5.3 | Analyse de sensibilité au coût d'arrêt planifié du système . . . . .   | 125 |
| 6.5.4 | Analyse de sensibilité au taux de coût d'indisponibilité et coût de commande urgente . . . . .                           | 127 |
| 6.5.5 | Analyse de sensibilité au coût d'arrêt non-planifié du système . . . . .   | 130 |
| 6.6   | Conclusion et perspectives . . . . .   | 130 |

**III Stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange pour des systèmes multi-composants avec structure complexe 133**

|                     |            |
|---------------------|------------|
| <b>Introduction</b> | <b>135</b> |
|---------------------|------------|

---

**7****Stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum**

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.1   | Introduction . . . . .   | 137 |
| 7.2   | Interventions et structure des coûts . . . . .   | 138 |
| 7.2.1 | Opération d'inspection . . . . .   | 138 |
| 7.2.2 | Opérations de maintenance . . . . .  | 138 |
| 7.2.3 | Opération d'approvisionnement des pièces de rechange . . . . .                             | 140 |
| 7.3   | Stratégie conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange . . . . . | 143 |
| 7.3.1 | Règles de décision de maintenance . . . . .  | 144 |
| 7.3.2 | Règles de décision d'approvisionnement des pièces de rechange . . . . .                    | 146 |
| 7.4   | Optimisation de la stratégie conjointe proposée . . . . .                                  | 147 |
| 7.4.1 | Critère de performance économique . . . . .  | 147 |
| 7.4.2 | Modèle mathématique d'évaluation et l'optimisation conjointe . . . . .                     | 148 |
| 7.5   | Conclusion . . . . .   | 152 |

**8****Étude numérique**

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.1   | Introduction . . . . .  | 155 |
| 8.2   | Cas d'étude . . . . .   | 155 |
| 8.3   | Optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange . . . . .   | 157 |
| 8.4   | Études de sensibilité de stratégie conjointe proposée . . . . .                                 | 161 |
| 8.4.1 | Influence de paramètres liés à l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange . . . . . | 161 |
| 8.4.2 | Influence de paramètres liés à l'opération de maintenance . . . . .                             | 164 |
| 8.5   | Conclusion . . . . .  | 168 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Conclusion générale</b>   | <b>169</b> |
| <b>Perspectives</b>  | <b>173</b> |
| <b>Annexes</b>   | <b>177</b> |
| <b>A Stratégie de maintenance prévisionnelle existante : stratégie <math>(T, R_p, R_{op})</math></b> | <b>179</b> |
| A.1 Règles de décision de maintenance . . . . .  | 179        |
| A.2 Optimisation de maintenance . . . . .  | 180        |
| A.2.1 Modèle mathématique d'évaluation . . . . .   | 180        |
| A.2.2 Détermination des paramètres variables de décision optimaux . . . . .                          | 180        |
| <b>B Fonction de densité de probabilité et fiabilité prévisionnelle de la loi de Weibull</b>         | <b>181</b> |
| B.1 Fonction de densité de probabilité de la loi de Weibull . . . . .                                | 181        |
| B.2 Fiabilité prévisionnelle de la loi de Weibull . . . . .  | 181        |
| <b>Bibliographie</b>   | <b>183</b> |

# Glossaire des notations et abréviations

## Acronymes

|                  |  |
|------------------|--|
| CBM              | Maintenance conditionnelle   |
| CM ou CR         | maintenance corrective ou remplacement correctif                               |
| CMO              | maintenance corrective opportuniste  |
| i.i.d            | indépendantes, identiquement distribuées                                       |
| MCS              | coupe minimale   |
| MPS              | chemin minimal   |
| PED & NED        | dépendance économique positive et dépendance économique négative               |
| PHM              | pronostics et gestion de la santé  |
| PM ou PR         | maintenance préventive ou remplacement préventif                               |
| RBD              | diagramme de fiabilité   |
| RUL              | durée de vie utile résiduelle  |
| TBM              | maintenance basée sur l'âge  |
| Stratégie IB-O   | stratégie de maintenance avec la sous-stratégie IB et avec la sous-stratégie O |
| Stratégie NIB-O  | stratégie de maintenance sans la sous-stratégie IB et avec la sous-stratégie O |
| Stratégie IB-NO  | stratégie de maintenance avec la sous-stratégie IB et sans la sous-stratégie O |
| Stratégie NIB-NO | stratégie de maintenance sans la sous-stratégie IB et sans la sous-stratégie O |

## Notations

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $n$                       | nombre de composants du système  |
| $i$                       | indice de composants, avec $i = 1, 2, \dots, n$  |
| $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$ | processus stochastique décrivant comportement de dégradation du composant $i$ en temps |
| $X_t^{(i)}$               | variable scalaire observable de dégradation du composant $i$ en temps                  |
| $x_t^{(i)}$               | niveau de dégradation du composant $i$ mesurée à l'instant $t$                         |

## Glossaire des notations et abréviations

---

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $Z^{(i)}$                   | seuil de défaillance fixé du composant $i$   |
| $\alpha^{(i)}, \beta^{(i)}$ | paramètres de forme et de échelle de la distribution Gamma du composant $i$  |
| $A_t^{(i)}$                 | variable scalaire d'âge du composant $i$ en temps  |
| $a_t^{(i)}$                 | âge du composant $i$ à compter de l'instant $t$  |
| $\gamma^{(i)}, \eta^{(i)}$  | paramètres de forme et de échelle de la distribution Weibull du composant $i$  |
| $\tau^{(i)}$                | date de panne du composant $i$   |
| $\tau^S$                    | date de panne du système   |
| $T, T^*$                    | intervalle d'inter-inspection (ou cycle d'inspection) et intervalle d'inter-inspection optimal   |
| $T_k$                       | $k^{\text{ème}}$ date d'inspection, $k \in \mathbb{N}$   |
| $T_k^-, T_k^+$              | temps juste avant/après la date d'inspection $T_k$   |
| $M_k \in \mathbb{N}$        | nombre total de pannes du système pendant le $k^{\text{ème}}$ cycle d'inspection, c-à-d. l'intervalle de temps $(T_{k-1}, T_k]$ , $k \in \mathbb{N}^+$ |
| $\tau_{k,j}^S$              | $j^{\text{ème}}$ instant de panne du système dans le $k^{\text{ème}}$ cycle d'inspection si $M_k \neq 0$   |
| $i_{\tau_{k,j}^S}$          | l'indice du composant $i$ dont la panne cause à l'arrêt du système à l'instant $\tau_{k,j}^S$ , c-à-d. $\tau^{(i)} = \tau_{k,j}^S$                     |
| $c_{ins}$                   | coût d'inspection pour un composant du système   |
| $c_{ms}$                    | coût de mise en œuvre de maintenance   |
| $c_p^{(i)}$                 | coût spécifique de remplacement préventif du composant $i$   |
| $c_c^{(i)}$                 | coût spécifique de remplacement correctif du composant $i$ , avec $c_c^{(i)} \geq c_p^{(i)}$   |
| $c_e^{(i)}$                 | coût de commande d'urgence pour la pièce de rechange du composant $i$  |
| $c_{psd}$                   | coût d'arrêt planifié du système   |
| $c_{usd}$                   | coût d'arrêt non-planifié du système   |
| $c_d$                       | taux de coût d'indisponibilité encouru lorsque le système passé dans l'état de panne   |
| $G_l$                       | $l^{\text{ème}}$ groupe est l'un des $2^n - 1$ groupes possibles du système $n$ -composant, $l = 1, 2, \dots, 2^n - 1$                                 |
| $G_k$                       | groupe de composants survivants sélectionné pour le remplacement préventif à la date d'inspection $T_k$  |
| $S_D$                       | ensemble de composants pour lequel un suivi des niveaux de dégradation est disponible  |
| $S_A$                       | ensemble de composants pour lequel seulement l'âge des composants est disponible   |
| $\Omega$                    | ensemble de tous les composants du système, $S_D \cup S_A = \Omega$  |
| $ S $                       | nombre de cardinals de l'ensemble $S$  |
| $L$                         | délai d'approvisionnement d'une commande normale   |

---

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| $d_{k,1}, d_{k,2}$               | date « standard » et date « longue » de livraison de pièces de rechange à l'instant $T_{k-1}+L$ et $T_k$ , respectivement, pour le $k^{\text{ème}}$ cycle d'inspection                   |
| $G_{k,1}, G_{k,2}$               | groupes (ou emballages) de pièces de rechange sont respectivement livrés à $d_{k,1}$ et à $d_{k,2}$  |
| $n_{k,1}, n_{k,2}$               | nombre de pièces de rechange du groupe $G_{k,1}$ et du groupe $G_{k,2}$ , avec $1 \leq n_{k,1} \leq n$ , $1 \leq n_{k,2} \leq n$ et $1 \leq n_{k,1} + n_{k,2} \leq n$                    |
| $c_{os}$                         | coût de mise en œuvre de commande  |
| $c_{sp}^{(i)}$                   | coût de commande de la pièce de rechange $i$   |
| $n_0$                            | nombre minimal de pièces de rechange est livré en même temps   |
| $c_{ship}^0$                     | coût de transport minimal pour une fois livraison  |
| $c_{ship}^d$                     | taux de coût de transport par une pièce de rechange  |
| $k_e$                            | coefficient de commande d'urgence, avec $k_e > 1$  |
| $c_h^{(i)}$                      | coût de gestion des stocks par unité de temps pour la pièce de rechange $i$  |
| $R^{(i)}(T_k + T T_k)$           | fiabilité prévisionnelle qui représente la probabilité que le composant $i$ d'âge $T_k$ peut survivre une durée supplémentaire $T > 0$   |
| $R^{(i)}(T_k + T x_{T_k}^{(i)})$ | fiabilité prévisionnelle du composant $i$ à l'instant de la prochaine inspection $T_k + T$ étant donnée que niveau de dégradation $x_{T_k}^{(i)}$ mesuré à l'instant $T_k$               |
| $R^S(T_k + T T_k)$               | fiabilité prévisionnelle qui représente la probabilité que le système d'âge $T_k$ peut survivre une durée supplémentaire $T > 0$   |
| $R^S(T_k + T x_{T_k}^{(1:n)})$   | fiabilité prévisionnelle du système à l'instant de la prochaine inspection $T_k + T$ étant donnée que niveau de dégradation de $n$ composants $x_{T_k}^{(1:n)}$ mesuré à l'instant $T_k$ |
| $R^{S,G_l}(T_k + T T_k)$         | fiabilité prévisionnelle du système est calculée à l'instant $T_k + T$ quand tous les composants du groupe $G_l$ sont préventivement remplacés à l'instant $T_k$                         |
| $C_{G_l}^{GIF}$                  | facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût   |
| $I_B^{(i)}$                      | facteur d'importance structurel de Birnbaum  |
| $I_e^{(i)}$                      | facteur de commande d'urgence du composant $i$   |
| $R_p^{(i)}, R_p^{(i)*}$          | seuil et seuil optimal de remplacement préventif défini pour composant $i$   |
| $R_o^{(i)}, R_o^{(i)*}$          | seuil et seuil optimal de commande de pièce de rechange défini pour composant $i$  |
| $R_p, R_p^*$                     | seuil et seuil optimal de remplacement préventif défini pour les composants du système   |
| $R_{op}, R_{op}^*$               | seuil et seuil optimal de remplacement opportuniste défini pour les composants du système  |
| $R_p^S, R_p^{S*}$                | seuil et seuil optimal de maintenance préventive défini pour le système  |
| $\omega_p, \omega_p^*$           | coefficient et coefficient optimal de maintenance préventive défini pour le système  |
| $\omega_o, \omega_o^*$           | coefficient et coefficient optimal de commande de pièce de rechange défini pour le système   |

## Glossaire des notations et abréviations

---

|               |   |
|---------------|---|
| $T_{rem}$     | temps auquel le système est complètement remplacé   |
| $N_b$         | nombre d'inspections du système au sein d'intervalle de temps $[0, T_{rem}]$ , $T_{rem} = N_b T$              |
| $D(T_{rem})$  | temps total indisponible accumulé du système et rassemblé jusqu'à l'instant $T_{rem}$                         |
| $C_k$         | coût total du $k^{ème}$ cycle d'inspection (de l'intervalle de temps $(T_{k-1}, T_k]$ ), $k \in \mathbb{N}^+$ |
| $C(u_t)$      | coût accumulé du système entier jusqu'à l'usage $u_t$ à l'instant $t$   |
| $C_\infty$    | coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini  |
| $C^M(u_t)$    | coût de maintenance cumulé du système entier jusqu'à l'usage $u_t$ à l'instant $t$                            |
| $C_\infty^M$  | coût moyen asymptotique de maintenance par unité de temps sur un horizon infini                               |
| $C^I(u_t)$    | coût de gestion des inventaires cumulé du système entier jusqu'à l'usage $u_t$ à l'instant $t$                |
| $C_\infty^I$  | coût moyen asymptotique de gestion des inventaires par unité de temps sur un horizon infini                   |
| $C^T(u_t)$    | coût total cumulé du système entier jusqu'à l'usage $u_t$ à l'instant $t$                                     |
| $C_\infty^T$  | coût moyen asymptotique total par unité de temps sur un horizon infini  |
| $\mathcal{I}$ | fonction indicatrice : $\mathcal{I}_{\{\cdot\}} = 1$ si l'évènement $\{\cdot\}$ est vrai et 0 sinon           |
| $E[\cdot]$    | espérance mathématique  |
| $GR$          | gain relatif  |

# Introduction générale

Durant les dernières décennies, la maintenance industrielle s'est développée à partir d'un problème mineur pour devenir une «préoccupation stratégique». Pendant cette période, le rôle de la maintenance au sein d'une organisation a été radicalement transformé. La maintenance, qui n'était rien de plus qu'une partie inévitable de la production, devient d'aujourd'hui un élément stratégique commercial. En réalité, elle est considérée comme un outil primordial pour assurer la concurrence économique entre des entreprises [45]. Les objectifs de maintenance ne sont plus formulés comme «garder des choses en cours de fonctionnement», mais doivent être cohérents avec une stratégie commerciale globale. Cette stratégie peut être basée sur la flexibilité, la productivité, la qualité et la diminution des coûts. La construction ou le choix de stratégies de maintenance a des impacts essentiels sur la performance et l'efficacité de la stratégie commerciale globale et donc sur l'avenir d'une entreprise [210]. Latino [167] a mené une étude qui indique que les États-Unis dépensent plus de 300 milliards de dollars pour la maintenance et les évolutions de l'outil de production industrielle. Environ 80% de ces dépenses servent à corriger des défaillances chroniques de machines. L'élimination de ces défaillances peut réduire le coût de maintenance de 40 à 60%. Selon Robertson et Jones [223], le budget de maintenance varie de 2 à 90% du budget de fonctionnement total d'une usine, la moyenne étant de 20,8% [152]. Un coût énorme et des risques liés à la mauvaise maintenance ont été à la fois observés et documentés dans l'industrie [136]. Donc, pour mieux maîtriser les budgets et optimiser les opérations de maintenance, une stratégie de maintenance choisie et réfléchie s'impose. Elle doit permettre de diminuer les coûts de production et d'opération, d'améliorer la disponibilité du système, d'assurer la fiabilité du système, etc.). Pour cela il faut intégrer les caractéristiques du système (mono ou multi-composant), les dépendances entre composants dans le cas multi-composants [279] et prendre en compte les informations obtenues au fil du temps sur l'évolution de l'état de santé du système considéré.

Le processus d'évolution de stratégies de maintenance les a vu passer de la maintenance de panne «naïve» à la maintenance préventive «aveugle» basée sur temps [89, 282], puis récemment à la maintenance préventive «sophistiquée» basée sur l'état (c-à-d. maintenance conditionnelle) [5]. Un grand nombre des modèles de maintenance conditionnelle sont apparus dans la littérature. Cependant, ces modèles se limitent souvent à des systèmes mono-

composants [5, 151, 217, 269]. Théoriquement parlant, une stratégie de maintenance pour des systèmes mono-composants peut-être appliquée à des systèmes à composants multiples si tous les composants de ces systèmes sont indépendants les uns des autres [62, 125]. Cependant, un système à composants multiples en pratique est toujours soumis à des dépendances inhérentes entre ses composants, telles que les dépendances économiques, structurelles et stochastiques [198]. De part l'existence de ces types de dépendances, une stratégie optimale pour la maintenance d'un système à composants multiples n'est pas simplement la juxtaposition des stratégies optimales de ses composants [56, 123], et l'hypothèse « mono-composant » peut s'avérer très pénalisante. Pour faire face à cette situation, un petit nombre de travaux a été consacré à la construction de stratégies de maintenance conditionnelle considérant des dépendances entre composants. La plupart de ces travaux proposées essaient de profiter la dépendance économique positive (de manière directe ou indirecte) en regroupant des actions de maintenance (préventive ou/et corrective) à maintenir à la fois. On peut voir dans les publications telles que [43, 56, 143, 145, 250, 251, 310].

Dans l'industrie réelle, les systèmes à composants multiples sont de plus en plus automatisés et technologiquement très complexes avec un grand nombre de composants qui peuvent être inter-connectés selon une structure/configuration quelconque [45]. Cette dernière peut correspondre à une structures élémentaire (séries, parallèle, parallèle-séries,  $k$ -sur- $n$ ) ou à une structure dite « complexe » qui correspondra alors à n'importe quelle combinaison de ces structures élémentaires [276, 279], éventuellement dynamique dans le temps. Par conséquent, les stratégies de maintenance pour de tels systèmes deviennent plus complexe ayant à faire face à des attentes commerciales et techniques plus élevées. Les modèles de maintenance conditionnelle existants ne peuvent être appliqués que pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structures élémentaires. Afin de remédier à ce manque, l'objectif essentiel de cette thèse est de proposer et développer quelques stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. Pour ces stratégies, le pronostic d'état de santé, le rôle des composants, les dépendances économiques positives ou négatives et la structure complexe du système seront conjointement pris en compte et intégrés à la prise de décision de maintenance. De plus, également dans le cadre de l'organisation de la maintenance, l'approvisionnement (ou la gestion des stocks) des pièces de rechange est aussi étudié et couplé avec une des stratégies de maintenance proposées afin de fournir une optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement.

## **Organisation du manuscrit**

La première partie permet de donner un cadre à notre étude et de préciser notre problématique. Cette partie se compose de deux chapitres.

- 
- Dans le chapitre 1, les notions de base sont présentées et mentionnées afin de (i) localiser notre étude et notre problématique dans le monde des problèmes très divers de la maintenance (ii) faciliter la compréhension de nos problèmes et nos motivations de manière très générale.
  - Le chapitre 2 se consacre à l'étude bibliographique sur la modélisation de systèmes à composants multiples avec structure complexe (la structure du système, le processus de dégradation et de défaillance et les dépendances entre composants) et sur les stratégies de maintenance adaptées à ces systèmes, particulièrement des stratégies de maintenance conditionnelle. Cette étude permet de préciser nos contributions pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe. De plus, dans ce chapitre, nous présentons plus précisément des notions supplémentaires (rôle critique ou non-critique, mesures d'importance structurelles et fiabilistes, etc.) et des outils permettant d'évaluer des performances économiques que nous utiliserons dans les parties suivantes.

La seconde partie du mémoire est consacrée à l'étude de deux stratégies de maintenance prévisionnelle à inspection périodique pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe. Les deux stratégies proposées prennent à la fois en compte un indicateur de pronostic (durée de vie utile résiduelle) de chaque composant, la dépendance d'état, la dépendance économique positive (l'économie du coût de mise en oeuvre) et la dépendance économique négative (la pénalité du coût d'arrêt du système) entre composants dans le système considéré ainsi que la complexité de sa structure. Ces deux stratégies sont respectivement présentées dans le chapitre 4 et le chapitre 5 de cette partie.

- Le chapitre 3 est d'abord consacré à construire un modèle de dégradation et défaillance d'un système à composants multiples avec structure complexe où le processus de dégradation est fonction du temps. De tels modèles de dégradation permettent de déterminer la durée de vie utile résiduelle conditionnellement à l'état observé à un instant donné. Cette durée de vie est associée à la fiabilité prévisionnelle à un instant futur étant donné le niveau de dégradation courant du système et de ses composants. Les opérations liées à la maintenance et les structures de coûts liés à ces opérations sont également présentées dans ce chapitre.
- Dans le chapitre 4 et sur la base du chapitre 3, une stratégie est proposée dans laquelle la prise de décision de maintenance préventive est considérée au niveau du composant à partir des indicateurs introduits individuellement pour chaque composant du système. L'indicateur associé à chaque composant est conjoint entre sa durée de vie utile résiduelle et son facteur d'importance structurel. De plus, des opérations de maintenance corrective groupée sont intégrées à la stratégie développée. Les composants défaillants peuvent être

maintenus à la fois à des dates opportunistes de maintenance différentes des dates planifiées sous contraintes logistiques. L'évaluation de cette stratégie est effectuée à travers une étude numérique incluant des analyses de sensibilité de performances aux paramètres de maintenance.

- Dans le chapitre 5, le facteur d'importance de fiabilité est étendu à un facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût. Sur la base du chapitre 3 et de ce facteur, une deuxième stratégie est proposée. La prise de décision de maintenance préventive est alors considérée à deux niveaux : le niveau système et le niveau composant. L'efficacité de cette stratégie est démontré en comparaison avec une autre stratégie de maintenance prévisionnelle efficace par une étude numérique et des analyses de sensibilité aux données de maintenance.
- Le chapitre 6 présente des comparaisons de performances entre les deux stratégies de maintenance prévisionnelle proposées. Il montre les avantages et désavantages de chaque stratégie dans différentes situations d'application.

La troisième partie est consacrée à la proposition et à l'étude d'une stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange. Il s'agit d'un aspect de grande importance pour les systèmes de production industriels.

- Dans le chapitre 7, le modèle de maintenance prévisionnelle développé dans le chapitre 4 de la seconde partie est étendu à un modèle conjoint de maintenance et d'approvisionnement de pièces de rechange. Cette extension permet d'intégrer les règles de décision de maintenance et d'approvisionnement de pièces de rechange au modèle pré-existant. En conséquence, le modèle conjoint proposé permet d'évaluer et d'optimiser conjointement la maintenance et la gestion des stocks afin d'améliorer la performance économique globale pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe.
- Le chapitre 8 présente une étude numérique ainsi que des analyses de sensibilité des performances de la stratégie conjointe proposée dans le chapitre 7. L'objectif de ce chapitre est de montrer la façon dont la stratégie conjointe proposée est appliquée en réalité.

**Première partie**

**Cadre d'étude**



# Chapitre 1

## Maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe : problématique

### 1.1 Introduction

Dans le contexte actuel de mondialisation économique, de nombreuses entreprises cherchent à survivre en produisant plus, avec moins de ressources, sur des périodes plus courtes. Pour atteindre ces objectifs, les outils de production jouent un rôle central et leur maintenance est considérée comme un facteur clef de compétitivité.

Selon la norme européenne NF-EN-13306-X-60-319 [190], la *maintenance* est définie comme «*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*». Cette définition semble omettre l'aspect économique de la maintenance. Une stratégie de maintenance doit permettre d'une part de maximiser la disponibilité et la fiabilité (pour produire la quantité désirée de produits, avec les spécifications de qualité requises, dans les meilleurs délais, par exemple) et d'autre part d'atteindre une certaine efficacité en termes de coût dans tout le cycle de vie du système.

Avec le développement rapide des technologies, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes et le défi de la maîtrise de l'exploitation de ces systèmes impose un rôle de plus en plus actif à l'opérateur de maintenance. Par conséquent, les stratégies de maintenance de tels systèmes deviennent plus complexes pour faire face aux attentes techniques et commerciales élevées. Des actions de maintenance opportunes peuvent aider à prévenir, à éviter ou à corriger les dysfonctionnements. Dans cette optique, des stratégies prévisionnelles construites sur une anticipation de la dégradation semblent particulièrement appropriées. Une telle stra-

tégie de maintenance proactive est principalement basée sur des modules de surveillance, de diagnostic, de pronostic et d'aide à la décision. Le développement, à l'échelle industrielle, de ces orientations stratégiques de maintenance manque encore cruellement de conceptualisation, de méthodes et d'outils. Par conséquent, la proposition de méthodologies de modélisation de dégradations, de pronostic, d'aide à la décision et d'évaluation de performances en maintenance constitue un défi scientifique majeur pour la mise en oeuvre industrielle de nouvelles stratégies de maintenance.

L'objectif des travaux présentés dans ce mémoire est de développer *des modèles de maintenance prévisionnelle pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe*. Ces modèles permettent de représenter le comportement du système maintenu et d'en évaluer les performances par rapport à la maintenance. De plus, ils sont suffisamment élaborés pour permettent d'intégrer au mieux la complexité de systèmes (la structure/configuration du système, l'importance relative des composants, des dépendances entre composants, etc.), de mettre à jours régulièrement leurs informations surveillées (niveau de dégradation, durée de vie utile résiduelle, etc.) dans des contextes dynamiques. Ils permettent également une bonne représentation du cas d'applications traité.

Pour ce faire, dans un premier temps, on s'intéressera à la modélisation des systèmes à composants multiples avec structure complexe. Dans la section 1.2, une introduction générale sera donnée sur les principales étapes de la modélisation, telles que la structure du système, des comportements de dégradation, défaillance des composants et les dépendances entre composants. Avant de nous intéresser à la modélisation de stratégies de maintenance, nous présentons, dans la section 1.3, quelques notions générales et historiques relatives aux stratégies de maintenance. Ces analyses nous permettent de positionner des axes d'étude liés à la construction de stratégies de maintenance provisionnelle, et ensuite à la construction de stratégies conjointes dans lesquelles un modèle de maintenance prévisionnelle est associé à celui d'approvisionnement de pièces de rechange pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. Afin d'évaluer les performances de ces stratégies, des méthodes d'évaluation sont présentées succinctement dans la section 1.4. Enfin, notre problématique est résumée dans la section 1.5.

## **1.2 Modélisation de systèmes multi-composants avec structure complexe**

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, la modélisation des systèmes multi-composants complexes inclut les étapes suivantes [24] :

- modélisation de la structure du système ;
- modélisation stochastique du comportement des composants ;

- modélisation de dépendances entre composants.

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons de manière très générale chaque étape de la modélisation des systèmes multi-composants complexes et choisissons quelques modèles pour notre études. Les descriptions détaillées sur les modèles choisis seront présentées à la sous-section 2.2 du chapitre 2.

### 1.2.1 Configuration/structure du système

Dans la modélisation de maintenance pour un système multi-composant, la représentation de la structure/configuration du système devrait être réalisée en premier. La structure du système représente la manière dont les composants sont inter-connectés pour pouvoir remplir une fonction commune. Il faut savoir comment l'état des composants (l'état de marche ou de panne) conditionne celui du système global. Dans l'analyse de la fiabilité du système, la structure du système est souvent illustrée par «le diagramme de succès» ou «de fiabilité» qui aboutit à une modélisation fonctionnelle d'un système. Chaque composant du système, considéré comme indépendant, réalise une fonction autonome. L'évaluation de la fiabilité du système est déduite de cette modélisation fonctionnelle. La méthode du diagramme de fiabilité consiste à construire un diagramme composé de blocs, chacun d'eux représentant une entité (composant, sous-système), reliés par des arcs orientés indiquant les dépendances des entités entre elles. Le comportement des entités est binaire (fonctionnement/défaillance). Les diagrammes sont constitués d'une «entrée», d'un «corps diagrammatique» composé d'entités et d'une «sortie» [67, 219].

La structure/configuration d'un système multi-composant peut être classifiée en deux catégories principales [175] :

- structures élémentaires comprenant les structures série, parallèle, série-parallèle, parallèle-série,  $k$ -sur- $n$  ;
- structures complexes comprenant les structures qui ne sont pas comprises dans la première catégorie. Une structure complexe peut être une combinaison de structures élémentaires.

La représentation de ces structures du système en mathématique est faite par l'utilisation d'une fonction de structure qui sera évoquée dans le chapitre 2.

Dans la littérature, il existe un grand nombre de travaux sur la maintenance de systèmes avec structure élémentaire. Par contre, les études sur la maintenance des systèmes avec structure complexe sont très peu présentes. Étant donné le fort développement de l'économie et de la technologie, les structures complexes sont de plus en plus présentes (ou «privilegiées»). C'est la raison pour laquelle la maintenance de systèmes avec structure complexe est étudiée dans nos travaux.

Enfin, il faut noter aussi que nos études sont effectuées seulement sur des systèmes cohérents. Ceux-ci correspondent à la plupart des systèmes physiques réels. Un système est dit «cohérent» si la réparation d'un composant du système améliore toujours ses performances et tous les composants ont un impact sur la date de panne du système [219].

### 1.2.2 Modélisation de comportements propres des composants

Pour la modélisation de la défaillance d'une entité, une représentation de son comportement sous le point de vue dysfonctionnel (ou fiabiliste) doit premièrement être effectuée. Un modèle de défaillance est un modèle mathématique qui décrit l'évolution de l'entité à partir de l'état parfait à l'état de panne. Il s'agit par exemple de définir les divers états dans lesquels l'entité peut passer et les lois qui régissent ces passages. Pour décrire cette évolution de défaillance, on peut utiliser des modèles physiques, appelés «white box» [198], qui peuvent prendre en compte toutes les variabilités d'une entité, de son environnement et expliquer ainsi son évolution [155]. Cependant, la construction de tels modèles est très difficile, et impossible dans certains cas. Donc, une seconde approche consiste à décrire l'évolution de défaillance à l'aide *des modèles stochastiques* [238]. Il existe dans la littérature deux grandes classes de modèles pour rendre compte de l'évolution de défaillance d'un système :

- (a) *Modèles de durée de vie* : on appelle «modèle de durée de vie» les modèles pour lesquels une entité a un comportement binaire qui peut-être soit en marche soit en panne. Ces modèles sont habituellement utilisés dans la littérature [25] et particulièrement appropriés pour modéliser des formes de défaillances de type «cataleptique», pour lesquelles le passage de l'état de marche à l'état de panne est immédiat, sans qu'on puisse observer de phénomène de dégradation ou de vieillissement [28]. Ainsi, pour ce type de modèles, il est nécessaire de déterminer une loi de l'instant de panne qui peut-être directement une fonction de la durée de fonctionnement de l'entité. On trouve dans le cadre de modèles de durée de vie des méthodes statistiques classiques de type inférence paramétrique, semi-paramétrique et non-paramétrique [83].
- (b) *Modèles de dégradation graduelle* : on appelle «modèle de dégradation» les modèles pour lesquels l'espace d'état d'une entité de compose, en plus des états de marche et de panne, des états intermédiaires qui sont appelés «états dégradés». Les états de dégradation permettent de transiter successivement entre l'état neuf ou le moins dégradé et l'état de panne, et une défaillance se produit lorsque le niveau de dégradation atteint un certain seuil. Dans ce cas, il faut trouver les lois de dégradation qui vont donner les dates d'entrée dans ces différents états intermédiaires et le temps passé dans chaque état. Selon la nature d'une entité, on distingue deux grandes classes de dégradation telles que les modèles à dégradation discrète et les modèles à dégradation continue [52].

En comparant avec les modèles de durée de vie, les modèles de dégradation permettent de mieux décrire le comportement de défaillance d'une entité en prenant en compte son état réel de manière relativement précise, et donc permettant une prédiction plus précise de sa vie résiduelle. Cependant, la modélisation de défaillance suivant le type de modèles de dégradation doit être accompagnée de moyens et de développements supplémentaires au niveau de la surveillance, de la modélisation de la défaillance et de l'implémentation [111, 4, 16]. Ainsi, elle conduit souvent à un coût plus important. De plus, dans un système multi-composant, il n'est pas toujours possible de pouvoir inspecter l'état de santé de tous les composants. Cela peut-être par exemple dû aux raisons suivantes :

- l'inspection d'un composant en fonctionnement n'est pas autorisé,
- les coûts associés à l'inspection sur le composant sont élevés,
- le composant est très fiable et l'inspection est alors inutile.

Dans le cadre de cette thèse, le comportement de vieillissement et de défaillance d'un système à composants multiples est envisagé. Deux ensembles de composants peuvent être définis suivant le type d'information lié à leurs états, et décrits par ces deux types de modèles. Le modèle de dégradation est appliqué à un ensemble de composants pour lequel un suivi des niveaux de dégradation est disponible, noté  $S_D$ . Un autre groupe de composants pour lequel seulement l'âge des composants est disponible, noté  $S_A$ .

### 1.2.3 Modélisation de dépendances entre composants

Dans la modélisation et l'optimisation de maintenance de systèmes à composants multiples, les dépendances entre composants dans un système ne peuvent pas toujours être négligées et devraient être prises en compte dans la prise de décision de maintenance [80]. Les dépendances entre composants peuvent être classées en trois différents types [249] :

- (a) *Dépendance économique* : La structure du coût de maintenance présente des inter-dépendances entre les composants. En conséquence, le coût de maintenance d'un groupe de composants n'est pas égal à la somme des coûts de maintenance de tous les composants dans le groupe. Pour ce type de dépendance, nous distinguons deux cas suivants.
- Dépendance économique positive : cette dépendance implique que le coût de maintenance de plusieurs composants est moins élevé que la somme de leurs coûts de maintenance individuelles. Par exemple, pour des systèmes séries, quand les composants sont maintenus conjointement, le coût de maintenance peut être réduit grâce au partage des tâches de préparation de maintenance (déplacement d'équipes de maintenance, d'ouverture d'appareils, etc.) entre les composants où à la diminution du temps d'arrêt du système,
  - Dépendance économique négative : cette dépendance se produit quand le coût de main-

tenance d'un groupe de plusieurs composants est plus élevé que la somme de leurs coûts de maintenance individuelles. Par exemple, pour des systèmes parallèles, quand les composants sont maintenus conjointement, le coût de maintenance peut être augmenté à cause de l'augmentation du temps d'arrêt du système.

- (b) *Dépendance stochastique* : Cela correspond par exemple à une influence du niveau de dégradation d'un composant sur l'état de détérioration ou la durée de vie des autres.
- (c) *Dépendance structurelle* : Lorsque différents composants forment physiquement une partie et que la maintenance de l'un implique physiquement une intervention sur les autres, on peut parler de dépendance structurelle.

Parmi ces trois types de dépendances, les dépendances économiques et stochastiques sont souvent présentées et correspondent à nombreux cas réels. Les modèles de maintenance avec la prise en compte des dépendances stochastiques sont très compliqués et souvent se limitent aux systèmes avec quelques composants [171, 86]. Dans le cadre de cette thèse, nous nous attachons à étudier les dépendances économiques et les intégrer dans le développement de stratégies pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe.

## 1.3 Stratégies de maintenance

Dans cette section, on présentera de manière générale des divers types de maintenance et quelques éléments de chronologie associés.

### 1.3.1 Divers types de maintenance

Selon la norme AFNOR - 2001 [190], les différentes approches d'action de maintenance sont synthétisées dans la figure 1.1. Les actions de maintenance peuvent être classées en deux grandes catégories suivant l'objectif recherché par rapport à l'instant d'intervention :

- (a) *Maintenance corrective* : regroupe l'ensemble des activités de maintenance qui interviennent en réponse, et donc consécutivement à la défaillance d'une entité, afin de la remettre en état d'accomplir une fonction requise.
- (b) *Maintenance préventive* : regroupe l'ensemble des activités programmées, pour prévenir ou retarder une défaillance, à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits (réduire le nombre et les coûts de défaillance d'une entité, augmenter la fiabilité du système, améliorer la disponibilité du matériel, assurer la sécurité des individus et de l'environnement, faciliter la gestion des stocks, etc. [52]). La maintenance préventive peut-être soit systématique soit conditionnelle soit prévisionnelle.

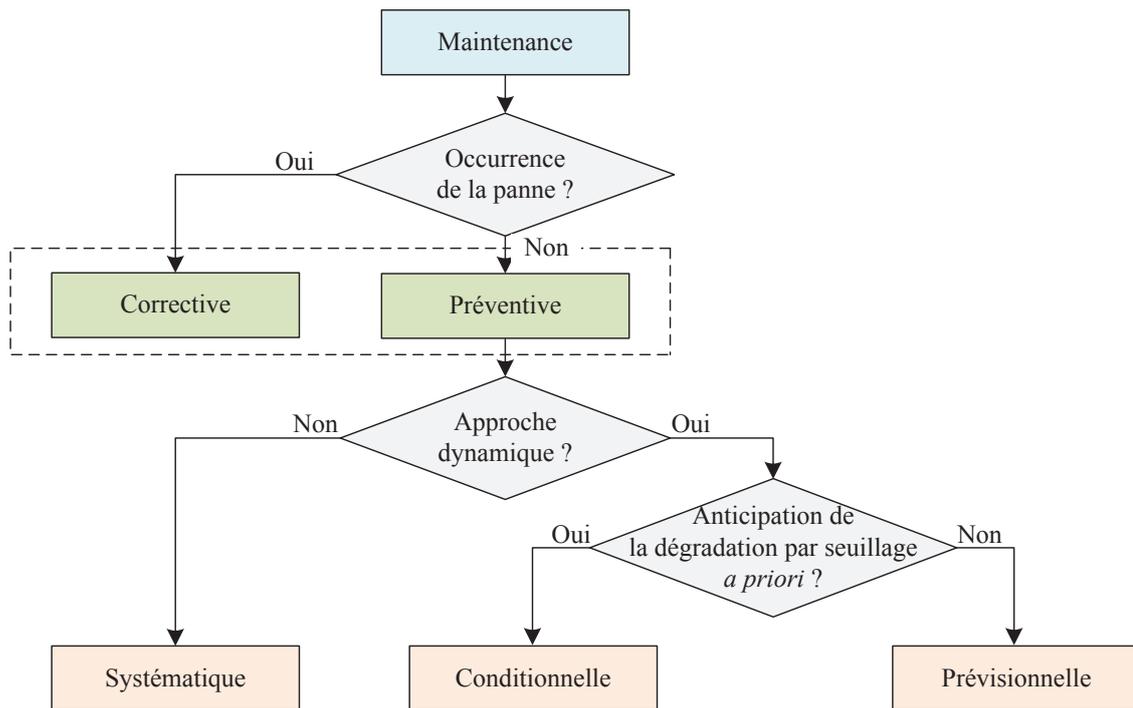


FIGURE 1.1 – Classification des divers types de maintenance.

- Maintenance systématique : la maintenance préventive est exécutée à des intervalles de temps prédéterminés (conformément à un calendrier) ou appuyant sur un nombre d'unité d'usage (ou cycles d'utilisation) quelque soit l'état de l'entité, on parle de maintenance systématique. Une stratégie de maintenance systématique est qualifiée de « statique ». Elle est également « aveugle », dans le sens où elle peut conduire à effectuer des remplacements préventifs d'équipements parfaitement sains et performants [89].
- Maintenance conditionnelle : est définie comme le maintenance préventive basée sur l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs (croissance, érosion, usure, température, pression, vibration, etc.) de la dégradation ou de la baisse de performance d'une entité, on parle de maintenance conditionnelle [52]. Elle n'est planifiée que si la condition (niveau de dégradation) de l'entité atteint un seuil critique donné.
- Maintenance prévisionnelle : est définie, par la norme AFNOR - 2002 [1], comme la maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation de l'entité aux instants futurs. La maintenance prévisionnelle est parfois également appelée maintenance proactive [150].

Bien que la maintenance préventive soit destinée à réduire la probabilité de panne du système, il subsiste une part de maintenance corrective incompressible. Il est donc nécessaire de considérer des stratégies de maintenance qui sont composées par la combinaison de chacune des trois approches (c-à-d. systématique, conditionnelle et prévisionnelle) de la maintenance préventive avec la maintenance corrective et qui permettent de contrôler le compromis entre la maintenance préventive et la maintenance corrective.

Aujourd'hui, la part de maintenance corrective et de maintenance préventive systématique est progressivement diminuée par la mise en place de stratégies de maintenance conditionnelle voire prévisionnelle [248]. On s'intéresse donc à la maintenance corrective et la maintenance préventive prévisionnelle (ou maintenance prévisionnelle) tout au long de ce manuscrit.

### 1.3.2 Histoire des stratégies de maintenance

En s'appuyant sur les types de maintenance donnés (cf. 1.3.1) différentes stratégies de maintenance ont été construites selon un historique qui est résumé dans la figure 1.2. Dans les

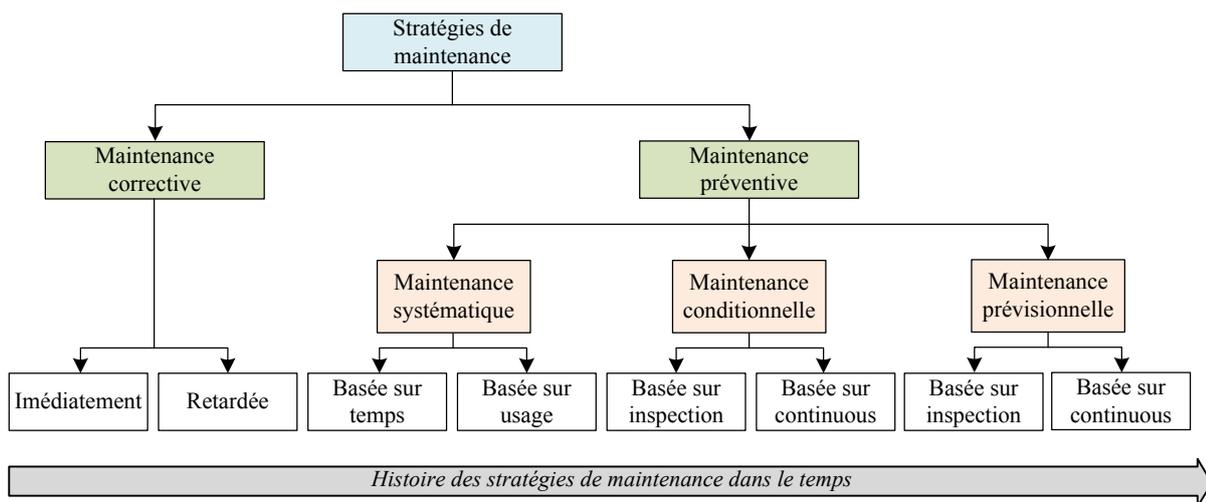


FIGURE 1.2 – Histoire des stratégies de maintenance.

soixante dernières années, la pratique de maintenance a traversé un processus de changement dû à la conscience de plus en plus croissante de l'importance de la gestion de maintenance.

Dans des années 1950, des stratégies de maintenance étaient majoritairement la maintenance corrective/réactive à une défaillance (« run-to-failure ») [285].

Dans des années 1960, les stratégies de maintenance préventive, qui se sont appuyées sur un modèle de durée de vie du système qui synthétise une connaissance statistique *a priori* (relative aux temps de panne du système), devenait populaire [112, 111]. Les remplacements de composant réguliers ont été programmés afin d'essayer d'éviter toute défaillance possible indépendamment de l'état de santé du système à maintenir.

Dans la seconde moitié des années 1980, la présence d'un système de surveillance permettant de disposer en temps réel d'une information sur l'état courant du système plus fine que sa seule information de panne et avec des technologies diagnostiques peuvent conduire à envisager des stratégies de maintenance préventive plus efficaces et par conséquent la maintenance conditionnelle a émergée. Par le déclenchement des actions de maintenance préventives seulement quand il y a des signes de détérioration ou des comportements anormaux sur le système, les stratégies de maintenance conditionnelle permettent d'éviter les actions de maintenance inutiles et par conséquent de réduire ces coûts de maintenance superflus [123, 151, 152, 248]. Cependant, la stratégie de maintenance conditionnelle nécessite d'installer et d'utiliser des équipements de surveillance [159, 289]. Donc, au début, les stratégies de maintenance de ce type semblaient n'être réservées qu'aux industries à haut risques. Mais les équipements de surveillance devenant moins onéreux, les stratégies de maintenance conditionnelle sont plus facilement envisagées [40].

Dans la dernière décennie, la technique de pronostic, qui est une discipline d'ingénierie focalisée sur la prédiction/prévision du moment où une entité ne sera plus remplir sa fonction requise, est introduite à la prise de décision de maintenance. Une stratégie de maintenance incorporant le pronostics au processus de décision est alors définie : la stratégie de maintenance prévisionnelle (ou proactive). Les premiers travaux sur la maintenance prévisionnelle sont synthétisés par Jardine et *al.* dans l'article [151]. Le diagnostic correspond à une analyse postérieure à l'événement alors que le pronostic se base sur une analyse antérieure. La maintenance prévisionnelle permet donc de diminuer les dérives de qualité du produit, l'insécurité et les coûts directs de maintenance grâce à un meilleur suivi des dégradations et à une meilleure maintenabilité en comparaison avec la maintenance conditionnelle [169]. En outre, elle permet également d'augmenter la disponibilité du système grâce à la réalisation d'interventions anticipées [248], de diminuer des temps de maintenance, d'optimiser les conditions d'approvisionnement en pièces de rechange (achat juste à temps) et de saisir les opportunités qui apparaissent lors de la phase d'exploitation d'un système de production [186].

### **1.3.3 Maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe**

Les stratégies calendaires sont basées uniquement sur le temps de l'échéancier ou sur l'âge initial du système. Ceci peut conduire à des interventions trop précoces ou trop tardives par rapport à l'état réel de dégradations. Donc, ces stratégies ne répondent plus à l'exigence des entreprises dans le contexte commercial actuel. Aujourd'hui, les stratégies de maintenance conditionnelle basées sur une anticipation de la dégradation semblent beaucoup mieux appropriées. Leur étude est donc très prometteuse et reste un enjeu majeur à venir.

Il existe une littérature très importante sur les stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes mono-composants [151, 269, 5, 217]. Cependant, les systèmes technologiques sont en réalité constitués de composants divers et parfois très nombreux qui peuvent être en interaction à des degrés divers. Une décision de maintenance optimale pour un composant ne l'est alors plus nécessairement pour le système entier [80, 297] et une simple juxtaposition de stratégies élaborées dans un contexte mono-composant n'est la plupart du temps pas opportune [123, 56]. L'adaptation à un cadre multi-composant d'une politique efficace pour un composant unique nécessite une attention particulière et n'est pas obligatoirement possible [123].

Jusqu'à maintenant, quelques travaux sur la maintenance conditionnelle ont été faits pour des systèmes à composants multiples avec les structures élémentaires (séries, parallèles, parallèles-séries,  $k$ -sur- $n$ ). Ces modèles de maintenance conditionnelle de systèmes à structure élémentaire n'assurent pas une décision optimisée pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe.

À notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée auparavant dans la littérature sur des systèmes à composants multiples avec structure complexe dans le contexte de maintenance conditionnelle. C'est la raison pour laquelle nous nous intéressons à la construction et à l'évaluation de stratégies de maintenance prévisionnelle pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe dans cette thèse.

Pour un système multi-composant avec structure complexe, un composant peut-être plus important que les autres, en fonction de son emplacement dans la structure du système, relativement à un critère de performance choisi (risque, coût, fiabilité, disponibilité, etc.) [90, 91, 191]. Afin de maximiser les effets positifs de la maintenance et d'éviter les actions de maintenance inutiles, il est donc nécessaire d'intégrer l'importance de composants dans la prise de décisions d'une stratégie de maintenance.

Dans le but d'optimiser la maintenance prévisionnelle des systèmes à composants multiples, on est souvent amené à répondre des questions principales du type :

- Quels sont les composants du système qui devraient bénéficier en priorité d'une action de maintenance préventive ?
- Pour ces composants, quelles actions de maintenance envisager ?
- Comment peut-on planifier les interventions (inspection, remplacement, réparation, etc.) pour éviter au mieux les dépenses inopportunes ?

Les réponses seront représentées dans le chapitre suivant à travers une étude bibliographique.

### **1.3.4 Problème conjoint de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement de pièces de rechange pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe**

Les pièces de rechange, sont « les articles destinés à remplacer des composants défectueux ou dégradés sur un bien » [190]. Elles sont demandées de manière à satisfaire aux besoins de maintenance d'un système. Aux dates planifiées, les composants les plus dégradés sont identifiés et remplacés pour éviter des occurrences de défaillance dans un futur proche. Les pièces de rechange sont donc nécessaires pour ces remplacements. L'indisponibilité de pièces de rechange nécessaires peut prolonger le temps d'arrêt du système et encourir des coûts inutiles. Mais, plus de pièces de rechange stockées peut également coûter en termes de coût d'inventaire (coût des stocks).

L'approvisionnement de pièces de rechange et la maintenance sont deux opérations connexes qui doivent être considérées à la fois pour atteindre l'efficacité du coût et du soutien logistique [290]. Cependant, ces deux opérations sont souvent étudiées séparément. Plus précisément, les pièces de rechange sont gérées par l'opération de gestion des stocks qui se appuie sur les demandes de pièces de rechange passées indépendamment de la stratégie de maintenance [105, 114, 183]. Pour l'opération de maintenance, elle est généralement supposée que les pièces de rechange sont toujours disponibles en cas de besoin [285], donc l'attention n'est basée que sur l'histoire de maintenance [198]. C'est une grande motivation pour s'intéresser à des modèles conjoints dans lesquels le modèle de maintenance et le modèle d'inventaire de pièces de rechange sont étudiés, évalués et optimisés conjointement.

## **1.4 Évaluation des stratégies de maintenance**

L'étape finale dans la modélisation en maintenance est de quantifier des performances d'une stratégie proposée. Comme les objectifs d'un programme de maintenance sont souvent variés et peuvent mener à des situations contradictoires, il faut tout d'abord définir le critère de choix qui permet d'optimiser ces performances. Une stratégie de maintenance en fonction de certains critères tels que le risque [140, 230, 100], le coût [125, 208, 197, 129, 269, 282, 151], la fiabilité [185] et la disponibilité [174, 257, 283, 75]. Le risque est défini comme la combinaison de la probabilité et les conséquences. Habituellement, la conséquence peut-être mesurée par le coût. Dans ce cas, le critère de risque est équivalent au critère de l'autre. Cependant, il y a certains cas comme les équipements critiques dans une centrale électrique nucléaire, dans laquelle la conséquence ne peut pas être estimée par le coût (la récente catastrophe nucléaire à centrale électrique nucléaire de Fukushima I au Japon au 11 Mars 2011, par exemple). Dans ces scénarios, le critère de probabilité ou de la fiabilité serait plus approprié.

Le critère économique est important dans la plupart des situations analysées en pratique. Il n'est pas surprenant l'optimisation basée sur un critère de coût occupé une place majoritaire dans les travaux relatifs à l'optimisation de la maintenance [151]. Alors, dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons au critère de coût, et les performances économiques globales d'un système multi-composant avec structure complexe qui peuvent n'apparaître qu'à long terme. Il est donc nécessaire de disposer un modèle mathématique du coût de maintenance. De manière générale, l'approche d'évaluation de ce modèle peut être analytique ou numérique. Cependant, en raison de la complexité de modèles de maintenance proposés, nous utiliserons l'approche d'évaluation numérique pour évaluer nos modèles. La recherche bibliographique dans le chapitre suivant montrera des critères économiques souvent utilisés et des méthodes pour évaluer les modèles du coût associés.

## **1.5 Conclusion**

À travers les analyses préliminaires de ce chapitre, nous avons positionné de manière très succincte la problématique liée à :

- la modélisation de systèmes industriels à composants multiples avec structure complexe (c-à-d. la modélisation de la structure, de la défaillance, des dépendances entre composants du système),
- la nécessité de développer des modèles de maintenance prévisionnelles et de quantifier leurs effets pour la maintenance de ces systèmes,
- la nécessité de développer des modèles conjoints dans lesquels l'optimisation de maintenance et d'approvisionnement de pièces de rechange est considérée ensemble.

Les modèles, qui seront proposés dans le reste de ce manuscrit, prennent en compte les éléments principaux suivants dans la prise de décisions :

- la complexité de la structure du système envisagé,
- l'information de pronostique,
- les stratégies de regroupement (indicateurs basés sur des facteurs d'importance),
- les dépendances économiques positive et négative.

Ces points seront explicités par une analyse bibliographique dans le chapitre suivant.

# Chapitre 2

## Étude bibliographique

### 2.1 Introduction

D'après les éléments soulignés dans le chapitre 1, nous proposons de faire une étude bibliographique approfondie sur des modèles et des problèmes associés à la modélisation d'un système complexe, incluant les modèles de défaillances et de dépendances entre composants, l'utilisation des facteurs d'importance, la prise en compte des informations pronostics, les modèles de maintenance conditionnelle et les méthodes d'évaluation. Cette étude nous aide, d'une part, à identifier des défis, et d'autre part, à reconnaître des opportunités afin de développer quelques stratégies liées à maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. En outre, certains concepts et notations, qui seront utilisés dans le reste de ce mémoire, sont mentionnés.

La section 2.2 présente, tout d'abord, la modélisation de systèmes à composants multiples, et notamment des systèmes à structure complexe. Certains facteurs d'importance potentiels, qui sont évalués et choisis pour intégrer dans la prise de décision de maintenance, sont aussi discutés dans cette section. En suite, les éléments fondamentaux d'une stratégie de maintenance conditionnelle et un point de vue personnel sur différents types de stratégies de regroupement pour la maintenance conditionnelle de systèmes multi-composants avec dépendance économique sont étudiés dans la section 2.3. De plus, une revue très succincte liée à des stratégies conjointes de maintenance conditionnelle et d'approvisionnement de pièces de rechange est également présentée dans cette section. La section 2.4 présente des méthodes et des outils qui sont souvent utilisés pour évaluer des performances de stratégies de maintenance. Après cela, dans la section 2.5, nous proposons les problèmes étudiés et précisons les objectifs des travaux qui seront faits dans cette thèse.

## 2.2 Modélisation de systèmes à composants multiples avec structure complexe

L'objectif de cette section est de fournir des concepts et des éléments pour supporter la modélisation de maintenance pour un système cohérent avec structure complexe. Pour ce faire, comme indiqué dans la section 1.2 du chapitre 1, nous présentons des concepts, des caractéristiques et des analyses sur des différents types liées à la structure de systèmes multi-composants. La sous-section 2.2.1 permet notamment d'aborder la notion de structure complexe en évoquant les fonctions de structures associées. Pour renforcer l'efficacité d'une stratégie de maintenance pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe, il est important d'étudier des mesures (ou facteurs) d'importance dans la sous-section 2.2.2. Ensuite, nous expliquons comment modéliser des comportements propres des composants par l'utilisation des modèles de dégradation et de durée de vie dans la sous-section 2.2.3. Les dépendances économiques positive et négative sont enfin présentées dans la sous-section 2.2.4.

### 2.2.1 Analyse de la structure du système

Nous considérons un système cohérent dont les  $n$  composants sont stochastiquement indépendants. Il est supposé que l'état du système et de ses composants est binaire (soit en marche soit en panne).

#### Concepts liés à la structure du système

Les concepts suivants, qui seront utilisés tout au long de ce manuscrit, sont rappelés ici [220, 162, 191] :

**Définition 1** Une coupe est l'ensemble de composants dont la panne cause à la panne du système.

**Définition 2** Une coupe minimale (MCS) est une coupe qui ne contient aucune autre coupe.

**Définition 3** Une coupe minimale d'ordre  $\epsilon$  est une coupe minimale contenant de  $\epsilon$  composants.

**Définition 4** Un composant est appelé « critique » si sa panne ou son arrêt, tandis que les autres composants sont dans l'état de fonctionnement, conduit le système à une panne ou un arrêt (c-à-d. l'ordre de la coupe minimale contenant ce composant est 1).

Inversement, un composant est dit « composant non-critique » si le système continue à fonctionner lorsque il tombe en panne ou s'arrête (c-à-d. l'ordre de la coupe minimale contenant ce composant est supérieur ou égal à 2).

**Définition 5** Un composant « critique temporaire » est le dernier composant non-critique, qui est encore survivant, contenant dans une coupe minimale d'ordre  $\epsilon \geq 2$ .

**Définition 6** Un groupe est dit « critique » si le système tombe en panne lorsque tous les composants tombent en panne. Selon le concept de la coupe minimale, un groupe critique contient au moins d'une coupe minimale.

Inversement, un groupe est défini comme « non-critique » si le système continue encore à fonctionner lorsque tous les composants de ce groupe tombent en panne.

**Définition 7** Un chemin de succès est l'ensemble de composants dont le fonctionnement assure le bon fonctionnement du système.

**Définition 8** Un chemin de succès minimal est un chemin de succès qui ne contient aucun autre chemin de succès.

**Définition 9** Une fonction de structure est une fonction binaire, notée  $\phi(\mathbf{y})$ , qui est une représentation mathématique du diagramme de fiabilité et qui permet de déterminer l'état du système à partir de l'état donné de tous les composants. On a

$$\phi(\mathbf{y}) = \phi(y_1, y_2, \dots, y_n) = \begin{cases} 1 & \text{si le système fonctionne;} \\ 0 & \text{si le système est dans l'état de panne;} \end{cases}$$

où,  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  est un vecteur d'état ;  $y_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) est la variable binaire décrivant l'état du composant  $i$ , avec

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ fonctionne;} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est dans l'état de panne.} \end{cases}$$

### Divers types de la structure du système et leur fonction de structure

- (a) *Structure série* : dans un système incluant  $n$  composants avec structure série, le système fonctionne si et seulement si tous ses composants fonctionnent. La figure 2.1 est une

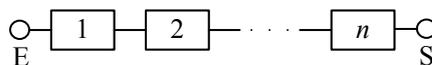


FIGURE 2.1 – Diagramme de fiabilité d'un système avec structure série.

représentation du diagramme de fiabilité du système avec structure série et sa fonction de structure est comme suit

$$\phi(\mathbf{y}) = \prod_{i=1}^n y_i = y_1 y_2 \cdots y_n = \min(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

- (b) *Structure parallèle* : dans un système incluant  $n$  composants avec structure parallèle, le système fonctionne si au moins l'un des ses composants fonctionne. La figure 2.2 est une

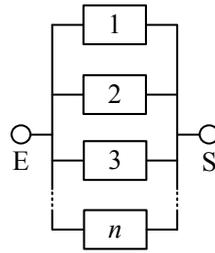


FIGURE 2.2 – Diagramme de fiabilité d'un système avec structure parallèle.

représentation du diagramme de fiabilité du système avec structure parallèle et sa fonction de structure est donnée par

$$\phi(\mathbf{y}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - y_i) = 1 - (1 - y_1)(1 - y_2) \cdots (1 - y_n) = \max(y_1, y_2, \dots, y_n).$$

- (c) *Structure série-parallèle* : un système incluant  $n$  composants présente une structure série-parallèle s'il se compose de  $m$  sous-systèmes qui sont connectés en parallèle. De plus, chaque sous-système  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) inclut  $n_j$  composants connectés en série, où  $\sum_{j=1}^m n_j = n$ . La figure 2.3 illustre le diagramme de fiabilité du système avec structure

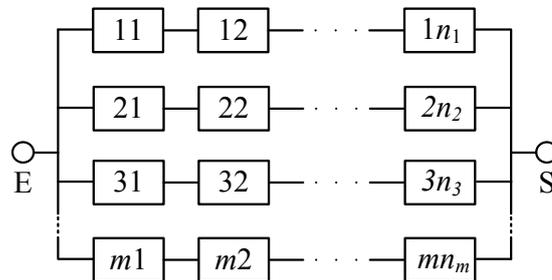


FIGURE 2.3 – Diagramme de fiabilité d'un système avec structure série-parallèle.

série-parallèle et sa fonction de structure est

$$\phi(\mathbf{y}) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - \prod_{i=1}^{n_j} y_{ji}),$$

où  $y_{ji}$  est la variable binaire représentant l'état du composant  $i$  qui se situe au sous-système  $j$ .

- (d) *Structure parallèle-série* : un système incluant  $n$  composants présente une structure parallèle-série s'il se compose de  $m$  sous-systèmes qui sont connectés en série, et chaque sous-système  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) inclut  $n_j$  composants connectés en parallèle, où  $\sum_{j=1}^m n_j = n$ . La figure 2.4 présente le diagramme de fiabilité du système avec structure parallèle-

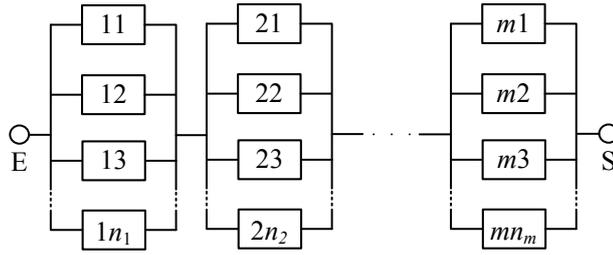


FIGURE 2.4 – Diagramme de fiabilité d'un système avec structure parallèle-série.

série et sa fonction de structure est

$$\phi(\mathbf{y}) = \prod_{j=1}^m [1 - \prod_{i=1}^{n_j} (1 - y_{ji})],$$

où  $y_{ji}$  est la variable binaire représentant l'état du composant  $i$  qui se situe au sous-système  $j$ .

(e) *Structure  $k$ -sur- $n$*  : on classe le système en deux types notés G et F :

- un système  $k$ -sur- $n$  incluant  $n$  composants est de type G quand le système fonctionne si et seulement si au moins  $k$  composants fonctionnent ( $1 \leq k \leq n$ ). On le note  $k$ -sur- $n$  :G;
- un système  $k$ -sur- $n$  incluant  $n$  composants est de type F quand le système tombe en panne si et seulement si au moins  $k$  composants tombent en panne ( $1 \leq k \leq n$ ). On le note  $k$ -sur- $n$  :F.

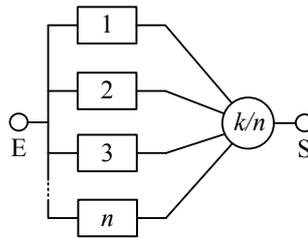


FIGURE 2.5 – Diagramme de fiabilité d'un système avec structure  $k$ -sur- $n$ .

La structure du système  $k$ -sur- $n$  est illustrée par le diagramme de fiabilité dans la figure 2.5. La fonction de structure de ce système avec type G est

$$\phi(\mathbf{y}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n y_i \geq k \\ 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n y_i < k \end{cases}$$

et avec type F est

$$\phi(\mathbf{y}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \sum_{i=1}^n y_i \leq n - k \\ 1 & \text{si } \sum_{i=1}^n y_i > n - k. \end{cases}$$

(f) *Structure complexe* : un système incluant  $n$  composants est considéré comme un système à structure complexe si sa structure ne peut pas être directement classée dans les catégories de structures élémentaires ci-dessus. À la différence des systèmes avec structure élémentaire dont la fonction de structure est obtenue de manière facile et directe, la détermination de la fonction de structure d'un système avec structure complexe est basée sur son ensemble des chemins de succès minimaux ou des coupes minimales.

– Dans le cas où l'ensemble des chemins de succès minimaux est utilisé, le système avec structure complexe est considérée comme une structure série-parallèle incluant  $np$  chemins de succès minimaux connectés en parallèle (c-à-d.  $np$  sous-systèmes). Chaque sous-système se compose de tous les composants d'un chemin de succès minimal connectés en série. Alors, la fonction de structure du système est déterminée comme :

$$\phi(\mathbf{y}) = 1 - \prod_{j=1}^{np} (1 - \prod_{i \in P_j} y_i), \quad (2.1)$$

où  $P_j$  est  $j$ -th chemin de succès minimal et  $np$  est le total nombre de chemins de succès minimaux du système.

– Dans le cas d'utilisation de l'ensemble des coupes minimales, le système complexe est considérée comme une structure parallèle-série contenant  $nc$  coupes minimales en série (c-à-d.  $nc$  sous-systèmes). Chaque sous-système contient les composants d'une coupe minimale connectés en parallèle. Alors, la fonction de structure du système est déterminée comme :

$$\phi(\mathbf{y}) = \prod_{j=1}^{nc} [1 - \prod_{i \in C_j} (1 - y_i)], \quad (2.2)$$

où  $C_j$  est  $j$ -th coupe minimale et  $nc$  est le total nombre de coupes minimales du système.

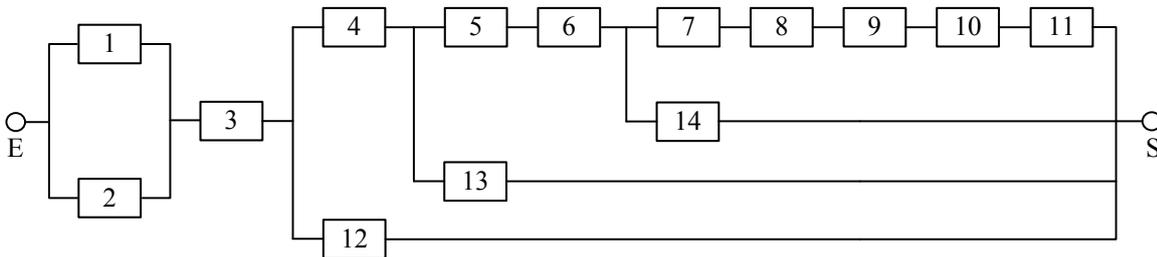


FIGURE 2.6 – Diagramme de fiabilité d'un système cohérent avec structure complexe.

Le diagramme de fiabilité d'une partie d'une usine de traitement de gaz naturel, donné dans la figure 2.6, est un exemple d'un système avec structure complexe qui ne peut pas se réduire à des structures élémentaires. Ce système est constitué par  $np = 8$  chemins de succès minimaux :  $P_1 = \{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ ,  $P_2 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$ ,

$P_3 = \{1, 3, 4, 5, 6, 14\}$ ,  $P_4 = \{2, 3, 4, 5, 6, 14\}$ ,  $P_5 = \{1, 3, 4, 13\}$ ,  $P_6 = \{2, 3, 4, 13\}$ ,  $P_7 = \{1, 3, 12\}$ ,  $P_8 = \{2, 3, 12\}$  et  $nc = 10$  coupes minimales :  $C_1 = \{1, 2\}$ ,  $C_2 = \{3\}$ ,  $C_3 = \{4, 12\}$ ,  $C_4 = \{5, 13, 12\}$ ,  $C_5 = \{6, 13, 12\}$ ,  $C_6 = \{7, 14, 13, 12\}$ ,  $C_7 = \{8, 14, 13, 12\}$ ,  $C_8 = \{9, 14, 13, 12\}$ ,  $C_9 = \{10, 14, 13, 12\}$ ,  $C_{10} = \{11, 14, 13, 12\}$ . La fonction de structure du système dans ce cas est représentée

– en se basant sur l'ensemble des chemins de succès minimaux par :

$$\phi(\mathbf{y} = y^{(1:14)}) = 1 - \prod_{j=1}^8 (1 - \prod_{i \in P_j} y_i), \quad (2.3)$$

– en se basant sur l'ensemble des coupes minimales par :

$$\phi(\mathbf{y} = y^{(1:14)}) = \prod_{j=1}^{10} [1 - \prod_{i \in C_j} (1 - y_i)]. \quad (2.4)$$

Les travaux dans cette étude visent à prendre en compte des systèmes à composants multiples avec structure complexe.

### 2.2.2 Analyse de rôles des composants par facteurs d'importance

Dans un système dont la performance dépend de celle de ses composants, certains de ces composants peuvent jouer un rôle plus important que les autres. Cette importance relative de chaque composant est introduite comme sa mesure d'importance (ou s'appelle aussi son facteur d'importance), qui est un indice d'évaluation de la contribution d'un composant individuel à la performance globale du système. Le concept de facteurs d'importance de composants dans un système cohérent a été proposé dans les années 1960 par Birnbaum [37]. En raison de la tendance à l'utilisation de systèmes de plus en plus complexe, d'autres types de mesures d'importance ont également été étudiés, dont l'un est appelée l'importance Fussell-Vesely [108, 274] qui a été utilisé dans la conception de la fiabilité et de la sécurité dans des centrales nucléaires.

Aujourd'hui, de nombreux de facteurs d'importance ont été proposés, qui permettent de fournir des outils efficaces d'aide à : l'amélioration de la conception [161] et l'exploitation [314], l'optimisation d'activités de maintenance [42, 191], l'analyse pour la prise de décision durant le processus de traitement des incidents [240], le développement de logiciels [161], l'analyse de risques [73].

Deux classes de facteurs d'importance apparaissent dans la littérature : la classe des facteurs d'importance structurels (*structural importance measures*) et la classe des facteurs d'importance fiabilistes (*reliability importance measures*) [90].

– Dans le premier type de facteurs d'importance, l'importance relative d'un composant ne dépend que de son emplacement dans la structure du système (c-à-d. la structure d'arbre

de défaillance, le diagramme de fiabilité ou la fonction de structure du système). Par exemple, si un système se compose de  $n$  composants en série ou en parallèle (cf. les figures 2.1 et 2.2, respectivement), on peut être incliné à considérer chaque composant tout aussi important pour la performance du système [37]. Cependant, pour le système donné dans la figure 2.6, dont les composants ne sont pas symétriques ni identiques, le composant 3 semble intuitivement plus important que tous les composants restants. Sans entrer dans le détail, les facteurs d'importance structurels les plus populaires sont le facteur d'importance de Birnbaum, le facteur d'importance de Barlow et Proschan, le facteur d'importance de Freixas et Pons, le facteur d'importance de Butler [163].

- Le deuxième type de facteurs d'importance permettent de déterminer la contribution d'un composant (ou un groupe de composants) à la défaillance (ou une baisse de performance) du système. Ils peuvent constituer des indicateurs de pilotage des activités de maintenance qui permettent de concentrer des ressources disponibles sur les composants les plus critiques et d'optimiser des décisions de maintenance. Grâce à l'aide des facteurs d'importance, il est par exemple possible de distinguer les composants critiques sur lesquels on renforcera la maintenance ainsi que la surveillance, les composants non critiques pour lesquels on peut souhaiter relâcher certaines contraintes réglementaires. Certains facteurs d'importance fiabilistes tels que le facteur d'importance marginal, le facteur d'importance conjoint, le facteur d'importance critique, le facteur d'importance de diagnostic, le facteur d'augmentation du risque, le facteur de diminution du risque et le facteur d'importance différentiel ont été utilisés les plus couramment [90].

Sur la base d'analyses bibliographiques sur les facteurs d'importance, nous précisons ici deux facteurs d'importance potentiels, qui seront être utilisés dans la prise de décisions liée à la maintenance prévisionnelle et à l'approvisionnement de pièces de rechange dans cette thèse, tels que :

- le facteur d'importance structurel de Birnbaum [37] qui sera utilisé dans les chapitres 4, 6, 7 et 8 ;
- une extension du facteur d'importance fiabiliste [37] à un «facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût» qui sera utilisé dans les chapitres 5 et 6.

### 2.2.3 Modélisation stochastique des composants

Dans cette sous-section, nous nous attachons à étudier les modèles de défaillance disponibles dans la littérature. Deux modèles potentiels sont choisis dans ceux pour décrire les comportements correspondant à deux ensembles de composants dans nos systèmes à composants multiples avec structure complexe. Ils sont définis suivant le type d'informations disponibles (c-à-d. le niveau de dégradation ou l'âge, cf. la sous-section 1.2.2). Ces modèles choisis permettent de calculer les grandeurs usuelles de fiabilité et d'estimer la vie résiduelle d'une entité.

Ces grandeurs sont considérés comme les indicateurs principaux qui seront utilisés dans la prise de décisions de maintenance et d’approvisionnement des pièces de rechange dans cette thèse. Une entité représente ici un composant ou un système. Avant de rappeler les grandeurs usuelles utilisées en fiabilité, les notions suivantes liées à la défaillance d’un composant et d’un système sont définies.

**Définition 10** Une défaillance correspond à une cessation de l’aptitude de l’entité à accomplir une ou plusieurs fonctions requises.

On distingue deux types de défaillance, suivant le degré de criticité de la panne de l’entité : la défaillance partielle (un moteur électrique fonctionne en mode dégradé à cause de la corrosion de son roulement, par exemple) et la défaillance complète (ce moteur est suspendu de l’aptitude de fonctionnement lorsque la corrosion du roulement atteint un niveau critique). Dans ce manuscrit, le terme défaillance (ou panne) d’un composant se réfère à la défaillance complète. Une défaillance du système résulte de la défaillance d’au moins une coupe minimale de celui-ci.

### Grandeurs caractéristiques de fiabilité

L’étude de fiabilité utilise la connaissance *a priori* et le traitement statistique des données pour estimer la probabilité de défaillance d’un composant  $i$  tout au long de sa vie. La fiabilité se caractérise par la probabilité que le composant  $i$  remplisse la mission requise sur une durée donnée. Pour calculer les grandeurs de fiabilité du composant  $i$ , on note d’abord  $\tau^{(i)}$  la variable aléatoire non-négative qui représente la date de défaillance/panne du composant  $i$ .

La fonction de répartition (ou distribution de défaillance)  $F^{(i)}(t)$  est la probabilité que le composant  $i$  tombe en panne avant l’instant  $t$  ( $t \geq 0$ )

$$F^{(i)}(t) = \mathbb{P}(\tau^{(i)} \leq t). \quad (2.5)$$

La densité de probabilité  $f^{(i)}(t)$  représente la fréquence relative des dates de défaillance comme une fonction du temps

$$f^{(i)}(t) = \frac{dF^{(i)}(t)}{dt}. \quad (2.6)$$

La fonction de survie  $R^{(i)}(t)$  (ou fonction de fiabilité) représente la probabilité d’apparition d’une panne après l’instant  $t$

$$R^{(i)}(t) = \mathbb{P}(\tau^{(i)} > t) = 1 - F^{(i)}(t) = 1 - \int_0^t f^{(i)}(u)du. \quad (2.7)$$

La probabilité conditionnelle que le composant  $i$  tombe en panne dans l’intervalle de temps  $(t, t + \Delta t]$ , sachant que le composant  $i$  est en marche à l’instant  $t$ , est définie par

$$\mathbb{P}(\tau^{(i)} \leq t + \Delta t | \tau^{(i)} > t) = \frac{\mathbb{P}(t < \tau^{(i)} \leq t + \Delta t)}{\mathbb{P}(\tau^{(i)} > t)} = \frac{F^{(i)}(t + \Delta t) - F^{(i)}(t)}{R^{(i)}(t)}. \quad (2.8)$$

Le taux de défaillance (« *hazard function* »), noté  $\lambda^{(i)}(t)$ , est définie par la limite quand  $\Delta t$  tend vers zéro, si elle existe, de la probabilité pour que le composant  $i$  tombe en panne dans l'intervalle  $(t, t + \Delta t]$ , sachant qu'il était en marche à l'instant  $t$ , divisé par  $\Delta t$ . Il s'exprime alors par

$$\begin{aligned} \lambda^{(i)}(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbb{P}(\tau^{(i)} \leq t + \Delta t | \tau^{(i)} > t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F^{(i)}(t + \Delta t) - F^{(i)}(t)}{\Delta t} \frac{1}{R^{(i)}(t)} = \frac{f^{(i)}(t)}{R^{(i)}(t)}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Le taux de défaillance est une grandeur caractéristique très important pour les modèles de durée de vie. Dans le champ de fiabilité, on considère généralement comme hypothèse que l'allure du taux de défaillance d'une population d'entités similaires non-réparables a la forme d'une courbe en baignoire. Avec le temps, elle se divise en trois phases tel qu'illustré dans la figure 2.7.

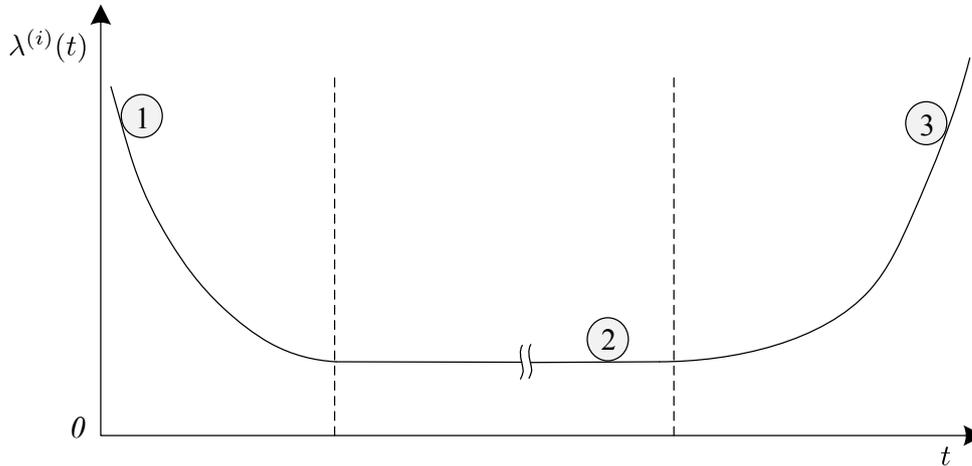


FIGURE 2.7 – Forme usuelle du taux de défaillance illustrée par la courbe en baignoire.

- Pendant la phase 1 (habituellement appelée la phase de rodage), le taux de défaillance diminue au cours du temps. La probabilité que le composant  $i$  tombe en panne sur l'intervalle de temps  $[t_1, t_2]$  est supérieure à la probabilité qu'il tombe en panne sur l'intervalle de temps  $[t_1 + \Delta t, t_2 + \Delta t]$ . Cela correspond à des pannes de jeunesse (déverminage, élimination des défauts de jeunesse).
- Durant la phase 2, le taux de défaillance est constant au cours du temps d'usage et inférieur à la phase précédente.
- À la différence de la phase 1, pendant la phase 3, le taux de défaillance augmente avec le temps. C'est-à-dire que la probabilité que le composant  $i$  tombe en panne sur l'intervalle de temps  $[t_1, t_2]$  est inférieure à la probabilité qu'il tombe en panne sur l'intervalle de temps  $[t_1 + \Delta t, t_2 + \Delta t]$  avec  $\Delta t > 0$ . L'entité vieillit au cours du temps dû à la dégradation.

La fonction de fiabilité  $R^{(i)}(t)$  dans l'équation (2.7) peut être déterminée à partir du taux de défaillance  $\lambda^{(i)}(t)$

$$R^{(i)}(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda^{(i)}(u) du\right). \quad (2.10)$$

La fonction de fiabilité prévisionnelle  $R^{(i)}(t+v|t)$ , qui représente la probabilité que le composant  $i$  d'âge  $t$  peut survivre une durée supplémentaire  $v \geq 0$ , est déterminée par

$$R^{(i)}(t+v|t) = \mathbb{P}(\tau^{(i)} > t+v | \tau^{(i)} > t) = \frac{\mathbb{P}(\tau^{(i)} > t+v)}{\mathbb{P}(\tau^{(i)} > t)} = \frac{R^{(i)}(t+v)}{R^{(i)}(t)}. \quad (2.11)$$

Le temps moyen de fonctionnement du composant  $i$  avant sa date de panne est défini comme suit

$$MTTF^{(i)} = \mathbb{E}(\tau^{(i)}) = \int_0^{+\infty} t f^{(i)}(t) dt = \int_0^{+\infty} R^{(i)}(t) dt. \quad (2.12)$$

La durée de vie résiduelle est la durée qui reste à un composant avant sa défaillance. Il s'agit d'une variable aléatoire et non d'une valeur déterministe précise. La valeur moyenne de la durée de vie résiduelle notée  $MRL_i$  (« Mean Residual Lifetime ») est calculée comme suit

$$MRL^{(i)}(t) = \int_0^{+\infty} R^{(i)}(x|t) dx = \frac{1}{R^{(i)}(t)} \int_t^{+\infty} R^{(i)}(x) dx. \quad (2.13)$$

La durée de vie résiduelle moyenne  $MRL$  est une grandeur très utile. Elle permet d'apprécier la possibilité de bon fonctionnement des composants dans l'avenir.

### Évaluation de grandeurs fiabilistes

Pour obtenir les grandeurs présentées ci-dessus, on utilise des modèles stochastiques de défaillance qui ont été présentés et classifiés dans la sous-section 1.2.2 du chapitre 1.

- (a) *Basée sur les modèles de durée de vie* : Pour un composant modélisé par ce type de modèles, son comportement peut seulement être décrit par deux états élémentaires : l'état de marche et l'état de panne. Soit  $X_t^{(i)}$  la variable d'état du composant  $i$  à un instant  $t$ ,

$$X_t^{(i)} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ est en état de marche;} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est en état de panne.} \end{cases}$$

La date de panne/défaillance du composant  $i$  est alors déterminée par

$$\tau^{(i)} = \min_{i \in S_A} \{t | X_t^{(i)} = 0\}. \quad (2.14)$$

Dans la littérature, plusieurs lois de probabilités liées à la durée de vie sont souvent utilisées telles que la loi de Weibull, la loi exponentielle, la loi log-normale et la loi Gaussienne inverse [24, 220].

Les paramètres caractéristiques de ce type de modèles peuvent seulement s'obtenir à partir d'une population d'entités identiques. Pour évaluer le niveau d'état de santé d'une entité individuelle, on peut utiliser des modèles de dégradation graduelle qui sont présentés dans la suite.

- (b) *Basée sur les modèles de dégradation graduelle* : Le choix du processus stochastique afin de décrire l'évolution de vieillissement d'un système dépend de la nature du système et des indicateurs de dégradation surveillés [155].

**Définition 11** *Un indicateur de dégradation (ou détérioration) est une grandeur physique ou non-physique directement liée à l'état de dégradation du système pour laquelle il est possible de détecter une défaillance.*

Pour ce type de modèles, il est possible de prendre en compte un mode de dégradation graduelle avec une représentation de l'usure du système par le biais d'une variable d'état continue ou par le biais d'un nombre fini de niveaux de dégradation. Les modèles de défaillance considérés sont de nature stochastique. On distingue deux classes telles que les modèles de dégradation graduelle discrète et ceux continue.

- *Modèles de dégradation graduelle discrète* : une entité passe d'un état neuf à un état défaillant par des états distincts de transition. Ces modèles sont souvent utilisés dans les cas où la loi physique de dégradation peut n'être pas disponible ou bien peut engendrer certaines difficultés au niveau de la formalisation mathématique du problème de modélisation d'un système. Pour construire un modèle de ce type, il est possible d'identifier un certain nombre d'états transitoires de dégradation que l'on peut ranger dans un ordre croissant d'un état neuf jusqu'à la panne [52]. Les chaînes de Markov sont souvent utilisées pour modéliser à la fois l'instant de transition d'un état et l'état dans lequel se trouve l'entité. Alors, on cherche à déterminer une matrice de taux de transition entre les différents états. On peut citer [71, 69, 38, 52, 28] pour de tels travaux.
- *Modèles de dégradation graduelle continue* : dans ce cas la dégradation d'une entité peut résulter par exemple des phénomènes d'usure, de fatigue, d'érosion et plus généralement de détériorations qui évoluent de manière continue au cours du temps. Pour ce type de dégradation les incréments de dégradation sont continus et il faut disposer de la loi de représenter afin de la dégradation à chaque instant [26]. Pour décrire les modèles de dégradation de type graduelle continue, on souvent utilise le processus de Wiener ou le processus Gamma [123, 7, 168, 295, 207].

Lorsqu'un composant est représenté par un modèle de dégradation graduelle, son comportement est souvent décrit par un processus stochastique  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$ , où  $X_t^{(i)}$  est la variable d'état scalaire du composant  $i$  à l'instant  $t$ . Le composant  $i$  est considéré comme en panne si son niveau de dégradation dépasse un seuil inacceptable qui est défini comme le seuil de panne, noté

$Z^{(i)}$ . Ce seuil représente l'ensemble de limitation pour l'ingénieur de maintenance qui indique un point où un paramètre de performance inacceptable se produit en ce qui concerne la mesure de dégradation surveillée.

La date de panne  $\tau^{(i)}$  du composant  $i$  liée à la dégradation est définie par l'expression suivante :

$$\tau^{(i)} = \inf\{t | X_t^{(i)} \geq Z^{(i)}, i \in S_D\}. \quad (2.15)$$

Dans ce cas, la fonction de fiabilité  $R^{(i)}(t)$  basée sur le niveau de dégradation est définie comme la probabilité que le niveau de dégradation mesuré à l'instant  $t$ ,  $X_t^{(i)} = x_t^{(i)}$ , est inférieur au seuil de panne  $Z^{(i)}$ . Elle peut également être équivalente à celle basée sur le temps, qui a été montrée dans l'équation (2.7), et exprimée comme suit [179] :

$$R^{(i)}(t) = \mathbb{P}(X_t^{(i)} = x_t^{(i)} < Z^{(i)}) = 1 - \mathbb{P}(X_t^{(i)} = x_t^{(i)} \geq Z^{(i)}) = \mathbb{P}(\tau^{(i)} > t). \quad (2.16)$$

## Enseignements

Grâce à la facilité de l'estimation de paramètres et la flexibilité pour la représentation de comportements dysfonctionnels (instants de défaillance et évolutions de dégradation), les distributions de Weibull et de Gamma sont souvent préférées et largement utilisées dans la modélisation et l'optimisation de maintenance.

Dans le cadre de ce thèse, le processus Gamma, qui sera discuté en détail dans le chapitre 3, est principalement utilisé pour la modélisation de dégradation graduelle des composants pour lesquels leurs niveaux de dégradation sont disponibles. Dans le cas contraire où l'état de santé des composants ne peut pas être obtenu sauf leurs âges, la loi de Weibull est utilisée pour modéliser la durée de vie avec une représentation binaire marche/panne de l'état de l'ensemble de ces composants.

### 2.2.4 Modélisation des dépendances économiques entre composants

Dans un système multi-composant, si le coût de remplacement de plusieurs composants conjointement est inférieur à la somme des coûts de remplacement des composants individuels, ces décisions de remplacement ne sont pas indépendantes [231, 273]. En d'autres termes, cela est introduit comme la *dépendance économique positive* entre composants dans le système. Par conséquent, un grand nombre de travaux ultérieurs a exploité les effets positifs de la dépendance économique dans le développement de stratégies de maintenance/remplacement optimaux pour des systèmes multi-composants. On peut citer ici les travaux dans [200, 201, 204, 110, 13, 229, 14, 77, 6, 299, 104, 56, 43, 252, 251, 250, 310, 143]. Ces stratégies peuvent être classifiées en quelques catégories principales telles que la maintenance corrective groupée, la maintenance préventive groupée et la maintenance opportuniste [79, 279].

Sous ce type de dépendance économique, les coûts économisés résultent du partage du coût lié aux tâches préparatoires de maintenance, aussi appelé *coût de mise en œuvre*, et du coût lié à la perte de production, aussi appelé *coût d'indisponibilité*, lorsque les activités de maintenance (préventive et/ou corrective) sur les différents composants sont exécutées simultanément. L'exécution d'un groupe d'activités nécessite une seule mise en œuvre ainsi que un seul arrêt du système [80, 198]. Cela est particulièrement vrai pour les systèmes séries, où une défaillance ou une intervention de maintenance préventive sur tout composant conduit à l'arrêt du système. Dans ce cas, le coût de mise en œuvre et d'indisponibilité sera partagé quand la maintenance est effectuée sur un groupe de plusieurs composants. Pour cette raison, la plupart des études mentionnées ci-dessus est faite pour des systèmes séries dans le contexte de la dépendance économique positive.

Cependant, dans certains cas le regroupement d'activités de maintenance peut également conduire à la croissance de coût global de maintenance. Par exemple, pour le système donné dans la figure 2.6, l'intervention de maintenance sur un groupe non-critique de composants (4-11, 13, 14, par exemple) ne conduit pas à l'arrêt du système, et par conséquent aucun coût d'indisponibilité n'est pas encouru dans ce cas. Néanmoins, un arrêt du système est nécessaire si la maintenance est effectuée sur un groupe critique de composants, et si ce groupe ne contient aucun composant critique (le groupe critique de composants 12, 13, 14, 11 par exemple). Pour ce cas, les deux types de dépendance économique existent : la *dépendance économique positive* et la *dépendance économique négative*.

La plupart des études dans le contexte de dépendance économique considèrent ces deux types de dépendance économique souvent en se basant sur deux coûts principaux : le coût de mise en œuvre et le coût d'indisponibilité [195, 191, 192, 278, 277, 279, 194].

- (a) *Coût de mise en œuvre* : le total des coûts qui sont issu de tâches ou d'activités de préparation de maintenance est appelé le coût de mise en œuvre («*set-up cost*»). Il inclut souvent des coûts liés au transport de la main-d'œuvre et des équipements, aux activités de démantèlement et rassemblement, à l'opération d'ouverture d'appareils, etc. Les coûts de mise en œuvre peuvent être économisés lorsque plusieurs activités de maintenance sur les différents composants sont exécutées simultanément, car l'exécution de maintenance sur un groupe de composants exige un seule mise en œuvre [198]. Ce coût est souvent égal à environ 5% du coût total de remplacement d'une entité, mais parfois il est très important pour les systèmes tels que des parcs éoliens en mer, les installations au large des côtes où le transport a besoin d'avions ou de bateaux [297, 131, 279], les réseaux électriques à haute tension. Dans la littérature, il existe deux types de coût de mise en œuvre [299, 198].
  - *Coût unique de mise en œuvre* : dans le cas où le coût de mise en œuvre est le même pour la maintenance de tous les composants dans le système, il est appelé coût de mise en œuvre de type unique («*single set-up*»).

- *Coût multi de mise en œuvre* : dans le cas où le coût de mise en œuvre est partagé entre des groupes de composants spécifiques et il est différent pour chaque groupe, le coût de mise en œuvre est dit de type multiple (« *multi set-up* »).

Ce dernier type de coût de mise en œuvre est très rarement utilisé. Nous avons trouvé un article de ce type [262], dans lequel on a introduit une structure hiérarchique complexe de mise en œuvre. Le premier type de coût de mise en œuvre est plus simple pour proposer des modèles de maintenance plus généraux. Il est donc utilisé dans la plupart des recherches dans la littérature. Ces deux types de coût de mise en œuvre rapportent toujours la dépendance économique positive et sont indépendants de la structure du système considéré.

- (b) *Coût d'indisponibilité du système* : ce coût de maintenance est engendré en raison de l'arrêt du système. Ce coût d'arrêt du système peut être composé par les coûts de perte de production, de redémarrage du système, de perte de la qualité des produits ou de la qualité des services [109, 272, 235, 243]. D'après les causes de l'arrêt du système, le coût d'arrêt du système est souvent classé suivant les deux catégories suivantes.

- *Coût d'arrêt non-planifié du système* : lorsque l'apparition de pannes du système est aléatoire, le coût engendré est appelé coût d'arrêt non-planifié du système. Cet arrêt non-planifié du système est souvent une opportunité afin de remplacer un groupe de composants défectueux ou de combiner les activités de maintenance corrective et préventive [135, 216, 36, 128, 56, 192].

- *Coût d'arrêt planifié du système* : les différentes actions de maintenance préventive sont toujours décidées *a priori*. Si ces actions conduisent le système à l'arrêt, un coût est alors encouru. Ce coût est dit coût d'arrêt planifié du système. Lorsque plusieurs composants sont maintenus conjointement, le nombre d'arrêts planifiés du système peut être augmenté ou diminué en fonction de la nature critique ou non-critique du groupe de ces composants. Les deux dépendances économiques négative et positive existent pour ce coût. Par exemple, le fonctionnement du système ne est pas affecté si les composants non-critiques 5, 12 et 13 sont maintenus séparément (cf. la figure 2.6). Cependant, lorsque ces composants sont maintenus conjointement, le système est alors arrêté (car le groupe de composants {5, 12, 13} est critique) et engendre par conséquent un coût d'arrêt planifié du système est supplémentaire. Dans ce cas, la dépendance économique est négative. Par contre, la maintenance du groupe de composants {3, 5, 12, 13} peut réduire le nombre d'arrêts planifiés, car le système est arrêté une seule fois au lieu de deux fois lorsque le composant critique 3 et le groupe critique {5, 12, 13} sont maintenus séparément. Dans ce cas, la dépendance économique est positive.

Dans la littérature, la plupart des études ne sont faites qu'avec la dépendance économique

positive du coût de mise en œuvre et du coût d'arrêt non-planifié du système. Cette dépendance apparaît à travers le regroupement d'activités de maintenance préventive (stratégies de maintenance préventive groupée) ou la combinaison d'activités de maintenance préventive et d'activités de maintenance corrective (stratégies de maintenance opportuniste). Jusqu'à maintenant, peu de travaux d'étude réalisés pour le regroupement d'activités de maintenance corrective (stratégies de maintenance corrective groupée) [160, 134, 196, 191] prennent en compte le coût d'arrêt planifié et la structure du système [275, 278, 277, 191, 192].

À travers les études bibliographiques sur le cadre des dépendances économiques, nous précisons ici les deux dépendances économiques positive et négative ainsi que les différentes natures de coûts. Le coût de mise en œuvre de type unique, le coût d'arrêt non-planifié et le coût d'arrêt planifié du système seront à la fois pris en compte dans la construction des stratégies de maintenance dans cette thèse.

## **2.3 Stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes multi-composants**

La construction d'une stratégie de maintenance conditionnelle est liée étroitement à la détermination des natures d'interventions, à la construction d'indicateurs de décision conditionnels (à partir des données de surveillance de plus en plus diverses), et à la planification des interventions. La recherche bibliographique dans cette section a pour but de donner une revue de ces points, et d'éclairer les choix qui ont été faits pour construire des stratégies de maintenance dans cette thèse.

### **2.3.1 Nature et caractéristiques des interventions**

L'étude de la maintenance conditionnelle des systèmes dans un contexte d'exploitation « en ligne » des données observées dans le processus de décision de maintenance. Elle conduit naturellement à une démarche d'intégration des aspects liés à la surveillance et à la maintenance. Dans cette sous-section, nous nous intéressons à étudier la nature et les caractéristiques de ces opérations. Plus précisément, nous mettrons en valeur la qualité des opérations de surveillance et le niveau de restauration des opérations de maintenance.

#### **Inspection**

Afin de suivre l'évolution des systèmes industriels, on a recours souvent à des systèmes dits de surveillance (systèmes d'acquisition de données autonomes, réseaux de capteurs, etc.). Les systèmes de surveillance retournent des informations sur l'état de santé des machines ; ces

informations (dites informations de surveillance) nous permettent d'avoir des interventions appropriées (surveillance, maintenance, reconfiguration, etc.) afin d'assurer le fonctionnement de ces machines. Quelques exemples typiques d'informations de surveillance sont le nombre de chocs survenus, le niveau de vibrations, les mesures de paramètres environnementaux (température, pression, humidité, etc.). Ces informations sont souvent collectées en temps réel tout au long d'un cycle de vie de ces machines. On distingue deux types principaux de surveillance : *la surveillance directe* (lorsque l'état du système est complètement observable) et *la surveillance indirecte* (lorsque l'état du système est inobservable ou partiellement observable) [151]. Concernant la qualité de l'information surveillée, la surveillance est également classée en deux catégories : la surveillance parfaite et la surveillance imparfaite [123].

*La surveillance parfaite* : La surveillance est dit « parfaite » lorsque les informations acquises permettent de refléter exactement l'état réel du système. Ces informations sont souvent le résultat de mesures directes si les données obtenues sont sans bruits et correctes [64, 144]. Cependant, les mesures obtenues dans certains cas doivent être traitées et synthétisées afin d'obtenir un indicateur nécessaire de santé du système. Dans ce cas, elle est le résultat de mesures indirectes [155]. Ce type de surveillance est largement utilisée dans la littérature de maintenance conditionnelle, on peut citer ici les travaux dans [32, 19, 54, 56, 87, 125, 141, 182, 189, 287].

*La surveillance imparfaite* : Pour ce type de surveillance, l'état de santé du système ne peut pas être connu directement à partir des données obtenues. Cela peut-être dû à des contraintes économiques, à des limites de la technologie et/ou des outils de surveillance, à des limites d'accessibilité dans le système, etc. [64, 303]. Dans ces cas, les mesures peuvent être bruitées [50, 209] ou entachées d'erreurs [27]. Cette hypothèse de surveillance imparfaite peut donc entraîner plusieurs difficultés notamment dans la modélisation des processus de dégradation et la construction des indicateurs de décision.

Généralement, les informations obtenues des réseaux de capteurs sont utilisées pour d'une part contrôler en temps réel l'opération des actionneurs des systèmes de contrôle/commande selon certains objectifs du contrôle ainsi que certains objectifs de la sécurité et d'autre part aider à la décision de maintenance. Dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, selon la fréquence des observations, on peut distinguer également la surveillance (quasi-)continue de la surveillance discrète [115, 116, 127, 218].

*La surveillance continue* : Pour ce type de surveillance, l'état de santé du système est contrôlé quasiment à tout instant et une alarme est déclenchée dès qu'un état anormal est détecté. Elle est souvent utilisée pour les système critiques et considérée dans travaux portant sur des problèmes de maintenance avec contraintes au niveau des instants possibles des interventions ou des délais entre la décision et l'intervention [120, 33, 174].

*La surveillance discrète* : En raison des limites technologiques et des contraintes économiques, ce type de surveillance est appliqué aux cas où les observations sur l'état de santé du système sont seulement disponibles à des instants d'inspection données. En général, ces instants coïncident souvent avec les dates de maintenance préventive [120]. Il est donc nécessaire de bien les planifier. La plupart de la littérature de maintenance conditionnelle se base sur la surveillance discrète [32, 19, 54, 56, 87, 125, 141, 182, 189, 287, 145, 191].

Dans le cadre de cette étude, on se limite à la surveillance parfaite discrète.

### **Actions de maintenance**

Il est important de construire des modèles représentant les effets des actions de maintenances pour des systèmes réparables complexes (réparation minimale, réparation partielle, remplacement, etc.) et de développer des méthodes permettant d'évaluer leur efficacité. Basiquement, ces actions pourraient remettre les matériels défectueux ou en fonctionnement trop dégradés à un état se trouvant entre « aussi bon que neuf » et « aussi mauvais que vieux » (remettre en fonctionnement un matériel défectueux dans l'état juste avant sa panne). La littérature sur les actions de maintenance peut-être naturellement classée en trois niveaux principaux selon le degré de restauration d'un système : la maintenance parfaite, la maintenance minimale et la maintenance partielle [212, 284].

*La maintenance parfaite* : La maintenance parfaite correspond à un remplacement complet ou une réparation à neuf d'un composant. Après cette action de maintenance, un composant à maintenir est ramené dans un état « aussi bon que neuf ». De nombreux modèles de maintenance parfaite effectués pour les opérations de maintenance corrective et préventive peuvent être trouvés dans les articles [6, 125, 126, 87, 56, 174, 107, 214, 145, 191].

*La maintenance minimale* : Cette action de maintenance ramène le système à l'état opérationnel sans affecter son taux de panne. Le changement d'un pneu crevé d'une voiture ne résulte pas du changement de taux de défaillance global de cette voiture, par exemple [212]. La maintenance minimale (ou la réparation minimale) est souvent appliquée pour les actions de maintenance corrective [284]. Dans le cadre de la maintenance conditionnelle, elle est beaucoup moins utilisée [203, 241, 144].

*La maintenance imparfaite* : La réalité se trouve naturellement entre les deux actions de maintenance ci-dessus. On parle alors de maintenance imparfaite. La maintenance imparfaite est une action d'intervention qui améliore l'état du système sans pour autant le remettre dans un état neuf. Ce type d'intervention peut être appliqué pour les maintenances préventive ou corrective. Cette action de maintenance occupe habituellement une période pour diagnostiquer le défaut et pour réparer. Elle prend souvent plus de temps qu'un remplacement ou une réparation minimale

[144, 98, 92]. Plusieurs modèles de maintenances imparfaites ont déjà été introduits. Parmi les plus connus on trouve le modèle d'Age Virtuel proposé par Kijima [157] qui considère que l'effet de la maintenance est de rajeunir le système ; ou le modèle de Brown-Proschan dans lequel le système après maintenance est supposé « aussi bon que neuf » avec une probabilité  $p$  et « aussi mauvais que vieux » avec une probabilité  $(1 - p)$  [44].

Tout au long de ce manuscrit, les deux maintenance corrective et préventive seront assimilées à la maintenance parfaite.

### 2.3.2 Indicateurs d'aide à la décision de maintenance conditionnelle

Une fois les informations importantes (issues de la surveillance en-ligne) sur le système disponibles, il est nécessaire de disposer d'un ou plusieurs indicateurs qui sera (seront) utilisé(s) comme les outils importants d'aide à la décision en maintenance conditionnelle. La synthèse d'un tel indicateur joue un rôle très important pour assurer la pertinence d'une intervention en maintenance. Dans le contexte de la maintenance conditionnelle, les interventions de maintenance effectuées se basent sur des indicateurs d'état de santé ou de performance de l'entité surveillée. Plus précisément, les interventions de maintenance (parfaite ou imparfaite) sont mises en œuvre lorsqu'une grandeur critique observé dépasse un seuil déterminé [151]. L'optimisation de telles règles de décision en maintenance conditionnelle est donc dite de type « limite de contrôle » [35, 15, 282]. La littérature de la maintenance conditionnelle montre que le niveau de dégradation, le taux de défaillance conditionnel et la durée de vie résiduelle conditionnelle sont les indicateurs potentiels [151, 211, 236, 237, 259, 144].

*Le niveau de dégradation* : C'est un indicateur qui montre l'état de santé le plus intuitif et direct du système à maintenir. De nombreux travaux ont été mis en œuvre se basant sur ce type d'indicateur dans la prise de décision en maintenance conditionnelle. On peut citer ici les travaux dans [125, 54, 87, 56, 84, 107, 106, 214, 286]. Son avantage est qu'il est utilisé directement sans aucune procédure de transformation complémentaire dans le cas d'informations surveillées parfaites. Dans le cas contraire où les informations surveillées sont les informations imparfaites, qui sont soumises à des erreurs de détection [281] ou des bruits [49] (le résultat d'une surveillance indirecte), elles sont nécessaires de passer des traitements intermédiaires avant toute décision d'intervention. Les méthodes d'estimation de dégradation, telles que le filtrage stochastique [144], les modèle des hasards basé sur des covariables, le modèle de Markov caché, etc., sont souvent appliquées dans ces cas [236].

*Le taux de défaillance conditionnel* : À côté du niveau de dégradation, cet indicateur de taux de défaillance conditionnel permet aussi de tenir compte de différents types d'informations (variables d'environnement, mesures bruitées,...) dans la prise de décision de maintenance conditionnelle [176]. Il semble particulièrement pertinent dans certains cas dans lesquels l'élément

d'environnement peut avoir une influence significative sur l'évolution de défaillance du système [83]. Néanmoins, les stratégies de maintenance basées sur le taux de défaillance conditionnel restent encore beaucoup moins nombreuses que celles basées sur le niveau de dégradation. Les stratégies de maintenance utilisant l'indicateur de taux de défaillance (conditionnel) qui est estimé à partir du niveau de dégradation et de l'état de l'environnement peuvent se trouver dans [18, 20, 251, 301]. La raison est que le taux de défaillance est souvent inaccessible car il n'est pas une grandeur physique, et que son utilisation nécessite des calculs relativement complexes.

*La fiabilité prévisionnelle/durée de vie résiduelle conditionnelle* : Les deux indicateurs conditionnels ci-dessus ne portent que sur des informations d'état du « passé » et du « présent » du système, mais pas son état futur. Afin d'incorporer ce type d'information dans la décision en maintenance, on peut faire les prédictions de la durée de vie résiduelle conditionnelle à partir des données de surveillance [17, 113]. La fiabilité prévisionnelle/durée de vie résiduelle conditionnelle peut caractériser l'état du système de façon beaucoup plus précise que celle classique (la durée de vie résiduelle « non-conditionnelle » [29, 188]) [294] qui est largement appliquée pour les stratégies de maintenance systématiques. Dans la pratique industrielle courante, cet indicateur est considéré comme une grandeur très importante à estimer dans le champ du pronostic [159, 211, 236, 237] et également un indicateur très prometteur en maintenance prévisionnelle [48, 151, 101, 186, 248]. L'incorporation de la durée de vie résiduelle conditionnelle dans la prise de décision de maintenance prévisionnelle est apparue récemment dans les travaux [51, 97, 98, 192, 191, 147, 145, 92, 291, 292].

Généralement, la durée de vie résiduelle et la date de panne d'une entité ont la même loi de probabilité. L'évaluation de durée de vie résiduelle de cette entité à l'instant courant peut-être réalisée en évaluant sa fiabilité prévisionnelle à un moment dans l'avenir. Dans cette thèse, la fiabilité prévisionnelle/durée de vie résiduelle conditionnelle est la grandeur principale et sera prise en compte dans la prise de décisions de maintenance ainsi que d'approvisionnement de pièces de rechange.

### **2.3.3 Stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes multi-composants**

Nombres de stratégies de maintenance ont été développées pour différentes industries manufacturières au cours des dernières décennies. Il est donc difficile d'identifier une stratégie optimale universelle qui est réellement appropriée pour la maintenance d'un système. Dans la littérature, de différentes classifications des stratégies de maintenance. Dans la revue de Ahmad [4], en se basant le modèle de défaillance utilisé, les stratégies de maintenance sont classées en deux catégories : la maintenance calendaire (ou systématique) et la maintenance conditionnelle. Ce travail ne se focalise que sur les système mono-composants. On peut trouver dans

[282] une classification entre les systèmes mono-composants et les systèmes multi-composants, dans [198, 249] une classification liée au type de dépendance entre composants (économique, stochastique ou structurelle). Ding [88] a classifié les modèles d'optimisation des stratégies de maintenance en termes de certitude, d'incertitude et de risque. En divers objectifs commerciaux tels que la production [46], la garantie [232] ou la gestion des stocks [264] sont également pris en compte dans la classification des stratégies de maintenance.

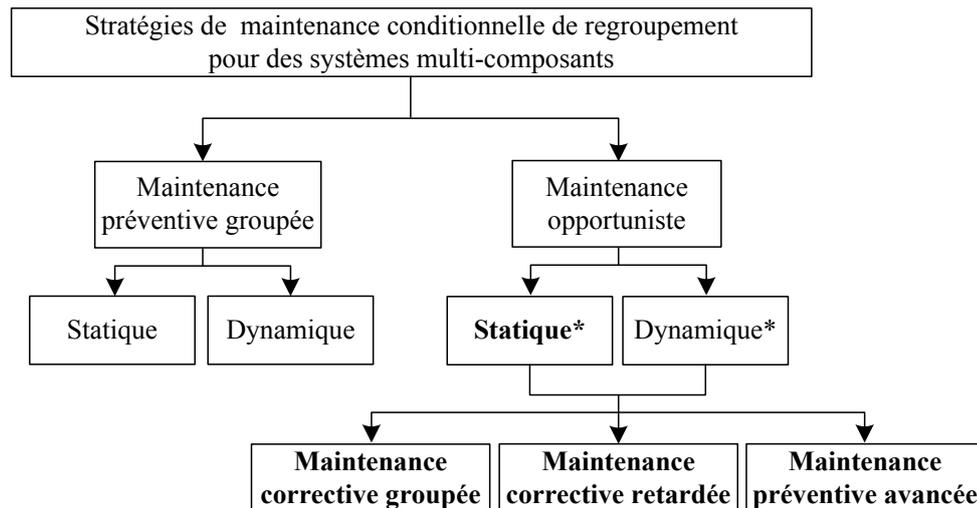


FIGURE 2.8 – Différents types des stratégies de maintenance pour la maintenance des systèmes multi-composants

Comme nous l'avons dit précédemment, la dépendance économique est courante dans la plupart des systèmes technologiques. Des exemples de tels systèmes incluent les avions, les navires, les centrales électriques, les systèmes de télécommunication, les installations de traitement chimique et les lignes de production de masse. Pour les systèmes multi-composants avec dépendance économique, le coût d'indisponibilité du système (une fois à l'arrêt) peut être plus élevé que les coûts de maintenance. Donc, il y a souvent un grand potentiel d'économies de coûts en mettant en œuvre des stratégies de regroupement de maintenance [282]. Ce sujet a reçu une attention particulière, et en conséquence, de nombreux modèles optimaux proposés dans la littérature pour la maintenance des systèmes multi-composants avec dépendance économique ont été synthétisés et classifiés dans les articles [62, 80, 282, 199]. Les points communs dans ces articles sont que la classification est principalement réalisée en se basant sur la manière de grouper des actions de maintenance et de les planifier. En nous appuyant sur ces états de l'art et avec notre point de vue personnel, dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons à différents types de stratégies de maintenance conditionnelle de regroupement pour la maintenance des systèmes multi-composants avec dépendance économique. Une présentation de notre classification est montrée dans la figure 2.8.

Nous avons fait le choix de nous intéresser aux dépendances économiques dans lesquelles des économies d'échelles peuvent être réalisées par des regroupements d'opérations sur les différents composants. La plupart des modèles de maintenance pour des systèmes à composants multiples permettent des regroupements d'actions de maintenance [80]. En vérifiant la nature des actions de maintenance (préventive/corrective) qui sont groupées, les stratégies de maintenance conditionnelle de regroupement sont divisées en deux grands groupes suivants : la maintenance préventive groupée et la maintenance opportuniste.

Ensuite, les stratégies de maintenance préventive groupée sont classées en deux types : la maintenance préventive groupée statique et la maintenance préventive groupée dynamique. Les stratégies de maintenance opportuniste sont également classées en deux types : la maintenance opportuniste statique\* et la maintenance opportuniste dynamique\*. Il convient de noter ici que la classification des types « statique » et « dynamique » pour la maintenance préventive groupée est basée sur une approche liée à l'horizon de planification, tandis que pour la maintenance opportuniste elle est basée sur une approche liée à la nature de planification dans laquelle les dates d'interventions sont fixées ou non. Donc, un astérisque est attaché respectivement à la définition « statique » et la définition « dynamique » des stratégies de maintenance opportuniste pour distinguer celles des stratégies de maintenance préventive groupée. En outre, en se basant sur la nature des actions de maintenance effectuées aux instants d'opportunité, trois sous-types des maintenances opportunistes statique et dynamique sont considérés tels que la maintenance corrective groupée, la maintenance corrective retardée et la maintenance préventive avancée. Parmi ces trois sous-types de maintenance opportunistes, la maintenance corrective retardée et la maintenance préventive avancée sont intéressantes et largement développées.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous concentrons principalement sur la maintenance corrective groupée et la maintenance corrective retardée du grand groupe de la maintenance opportuniste avec approche statique de planification. Dans le reste de cette sous-section, pour chaque type de stratégies de maintenance conditionnelle de regroupement, nous présenterons des problèmes liés à la définition, des caractéristiques ainsi que certains travaux existants.

### **Stratégies de maintenance préventive groupée**

Les stratégies de maintenance de ce type considèrent un plan de regroupement qui n'inclut que les actions de maintenance préventive. Un avantage de la maintenance préventive groupée est qu'elle est planifiable. Certaines tâches de préparation avant la mise en œuvre de maintenance peuvent se dérouler dans des conditions favorables. Des pièces de rechange peuvent être commandées à temps et des équipes de maintenance rendues disponibles aux périodes de maintenance préventive. En se basant sur l'horizon de planification de maintenance, ce groupe des stratégies de maintenance préventive groupée est classé en deux types suivants : la maintenance

préventive groupée statique et la maintenance préventive groupée dynamique.

*Maintenance préventive groupée dynamique* : Les stratégies de maintenance préventive groupée dynamiques permettent de prendre en compte des contextes dynamiques tels que des changements de structure, de conditions opérationnelles du système durant l'horizon de planification. Sur la base de l'horizon de planification, ces stratégies peuvent également être divisées suivant les deux catégories suivantes :

- *Horizon fini de planification* : Les stratégies de maintenance préventive groupée dynamiques basée l'horizon fini permet d'intégrer les contextes dynamiques dans la prise de décision de maintenance de considérer un système sur un seul horizon fini [187]. Les stratégies de maintenance sont optimisées sur l'horizon fini en considérant que le système n'est plus opérationnel à la fin de l'horizon. Le calcul de coûts de maintenance doit pallier cet effet en intégrant des valeurs résiduelles concernant les composants afin d'estimer la vie résiduelle du système à la fin de l'horizon fini. À cause de la complexité de la modélisation et de l'optimisation de maintenance, les modèles de maintenance avec cette approche de planification sont moins bien développés. Ces modèles, qui sont appliqués dans le cas où le temps de fonctionnement du système est fini, sont souvent proposées pour la maintenance de systèmes avec structure série [300, 47, 206].
- *Horizon roulant de planification* : Pour cette deuxième approche de planification, les dates de maintenance individuelles pour chaque composant doivent premièrement être déterminées. Ceci est réalisé en minimisant le coût moyen de maintenance de chaque composant sur un horizon infini (c-à-d. le coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini). À cette étape, les modèles de maintenance de type statiques pour les systèmes mono-composants, tels que les stratégies de remplacement basée sur l'âge ou de remplacement par blocs, peuvent être appliqués. Pour chaque composant, une fonction de coût de pénalité est construite afin d'évaluer les coûts additionnels lorsque sa date de maintenance est déplacée par rapport à sa date optimale. Ensuite, un algorithme d'optimisation est appliqué pour trouver la meilleure façon de regrouper les dates de maintenance individuelles sur un horizon fini de planification en maximisant le profit économique total du regroupement sur cet horizon. Pour ce faire, le plan de regroupement optimal doit être choisi en optimisant le compromis entre des économies de coût de mise en œuvre, des coûts d'arrêt du système et des coûts de pénalité des déplacements des dates de maintenance individuelles.

Afin d'optimiser les stratégies avec l'approche par horizon roulant, une programmation dynamique peut être proposée pour chercher le plan optimal de regroupement en temps quadratique [299]. Avec cette méthode d'optimisation de maintenance, la stratégie proposée dans cet article peut s'appliquer à la maintenance de systèmes de plusieurs composants. Cependant, cette stratégie de regroupement basée sur la programmation dynamique n'est applicable que

pour la maintenance des systèmes avec structure série. Dans un autre travail [298] les auteurs s'intéressent au problème de comparaison entre l'approche par horizon roulant et celle de maintenance statique. En considérant une évolution dynamique de variables des contextes tels que le changement de taux d'utilisation ou l'opportunité de faire la maintenance, ils ont montré que l'utilisation de l'approche par horizon roulant donne meilleurs résultats que l'approche par maintenance statique. Les modèles de maintenance proposés avec l'approche sur horizon roulant de planification sont relativement simples (seulement considérant des systèmes en série, la dépendance économique positive et des modèles de durée de vie) [81, 299, 298].

En basant sur l'approche par horizon roulant, certains travaux ultérieurs ont été développés par Do et al. [93, 91] et Vu et al. [278, 277]. Dans ces articles, certains modèles plus complexes sont proposés pour la maintenance de systèmes à composants multiples. Do et al. [93] ont développé un modèle de maintenance avec une durée de la maintenance préventive non-négligeable dans lequel ils s'intéressent au problème de regroupement dynamique avec certaines contraintes de la disponibilité du système et de nombre limité d'opérateurs. Do et al. [91] ont proposé un modèle de maintenance dans lequel le problème de plusieurs activités de maintenance pour un composant sur l'horizon de planification est considéré. De plus, une nouvelle méthode est également proposée pour mettre à jour le plan de regroupement lorsqu'une opportunité de durée limitée apparaît. En se basant sur les modèles proposés dans [93, 91], Vu et al. ont introduit deux modèles de maintenance [278, 277]. Le premier modèle, dans lequel les deux dépendances économiques positive et négative sont prises en compte dans la construction des règles de décision, est développé pour la maintenance de systèmes avec structure complexe [278]. Le second modèle est également développé pour la maintenance de systèmes avec structure complexe. Cependant, dans ce modèle de maintenance, des contextes dynamiques tels que des changements de structure, de l'environnement opérationnel et de l'état de fonctionnement du système sont supplémentaires tenus en compte dans la prise de décision de maintenance. Néanmoins, les modèles de maintenance, qui sont mentionnés ci-dessus, ne peuvent être considérés que pour des systèmes dont le vieillissement des composants suit des modèles de durée de vie dans lesquels des stratégies de maintenance du type systématique sont trouvées.

Jusqu'à maintenant, dans le contexte de la maintenance conditionnelle et avec l'approche par horizon roulant, il n'y a que deux modèles qui ont été respectivement développés dans les articles [43, 263]. Dans l'article [43], Bouvard et al. a développé l'approche par horizon roulant pour la maintenance de systèmes à composants multiples à détérioration graduelle. Pour que la planification soit adaptée aux conditions opérationnelles réelles, les décisions de regroupement se basent sur la fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle des composants du système qui peut être mise à jour à chaque date d'inspection. Enfin, la stratégie de maintenance prévisionnelle de regroupement dynamique développée vise à s'appliquer à la maintenance de véhicules industriels. Dans l'article [263], Van Horenbeek et Pintelon ont proposé une stratégie de maintenance

prévisionnelle de regroupement pour la maintenance de systèmes complexes de quelques composants dans laquelle les deux dépendance économique et stochastique entre composants sont envisagées. Les règles de décision de maintenance de regroupement sont construites se basant sur le niveau de dégradation et la durée de vie résiduelle des composants. Pourtant, ces deux modèles sont seulement susceptibles d'application à des systèmes à composants multiples en séries.

*Maintenance préventive groupée statique* : Les stratégies de maintenance préventive groupée statique prévoit un plan de regroupement sur un horizon infini en considérant que la plupart des conditions d'opération du système sont stables et la fréquence d'apparition de contextes dynamiques est faible. Les stratégies de maintenance préventive groupée statique semblent donc être moins compliqués par rapport aux stratégies de maintenance préventive groupée dynamique. En considérant la stratégie de l'optimisation du regroupement des actions de maintenance, les stratégies de maintenance de type statique peuvent également être classées en deux groupes : le regroupement direct et le regroupement indirect.

- *Regroupement direct* : Le regroupement des actions de maintenance suit une manière « directe ». Ceci signifie que, pour un système de  $n$  composants, on doit déterminer : une structure groupante optimale  $SG^* = \{G_1^*, \dots, G_l^*, \dots, G_m^*\}$  qui explique quel composant est de quel groupe ( $m \in \mathbb{N}$  et  $m \geq 1$ ), et le cycle de maintenance préventive optimal de chaque groupe de la structure groupante optimale  $SG^*$  (c-à-d.  $t_{SG}^* = \{t_{G_1}^*, \dots, t_{G_l}^*, \dots, t_{G_m}^*\}$ ). En conséquence, le problème de regroupement est directement formulé comme suit :

$$\text{Minimiser } CA = f(SG, t_{SG})$$

$$\text{avec } SG = \{G_1, \dots, G_l, \dots, G_m\}, \quad \forall SG \in ESG$$

$$\text{et } t_{SG} = \{t_{G_1}, \dots, t_{G_l}, \dots, t_{G_m}\}, \quad \forall t_{G_l} \in [0, +\infty), \quad l = 1, \dots, m.$$

Où,  $CA$ , qui est le coût moyen asymptotique, est une fonction de la structure groupante et les cycles de maintenance préventive optimaux de ses  $m$  groupes.  $ESG$  est l'ensemble des structures groupantes possibles. Dans ce cas, le nombre de solutions possibles est égal à  $2^n - 1$  [299].

- *Regroupement indirect* : Comme son nom d'indique, le plan des stratégies de maintenance de type de regroupement « indirect » est obtenu de façon indirecte. Il y a quelques différentes approches suivantes pour le type de regroupement indirect.
  - Une première approche de regroupement indirect est de considérer que chaque composant  $i$  du système a un cycle de maintenance préventive optimal formulé par  $k_i T$ .  $T$  est l'intervalle de temps supérieur à zéro ;  $k_i$  est un nombre entier et supérieur à un ( $i = 1, \dots, n$ ). Dans ce cas, les paramètres optimaux de décision de maintenance  $T^*$

et  $k_i^*$  peuvent être déterminés en minimisant le coût moyen asymptotique du système entier. Plusieurs travaux réalisés basés sur cette approche de regroupement peuvent se trouver dans les articles [122, 121, 76, 78], où l'optimisation de performance de maintenance peut être représentée comme suit :

$$\text{Minimiser } CA(k_i, T) = ac_{ms} + \sum_{i=1}^n \frac{C_p^{(i)} + C_c^{(i)}(k_i T)}{k_i T},$$

où :  $ac_{ms}$  est le coût de mise en œuvre moyen de maintenance ;  $C_p^{(i)}$  est le coût spécifique de remplacement préventif du composant  $i$  ;  $C_c^{(i)}(x)$  est le coût total de maintenance corrective du composant  $i$  engendré sur l'intervalle de temps  $[0, x]$ .

- Une second approche de modélisation de regroupement indirect est proposée dans les articles [244, 102, 132, 133] dans lesquels le système à maintenir est renouvelé après chaque  $T$  unités de temps. De plus, la maintenance préventive du composant  $i$  du système ( $i = 1, \dots, n$ ) est effectuée à chaque  $T/k_i$  unités de temps, avec  $k_i$  est un nombre entier et supérieur à un ( $i = 1, \dots, n$ ). Les variables de décision sont déterminées en minimisant le coût moyen asymptotique :

$$CA(k_i, T) = AS + \frac{\sum_{i=1}^n [(k_i - 1) C_p^{(i)} + k_i C_c^{(i)}(\frac{T}{k_i})]}{T}$$

- Pour les approches de regroupement indirect présentées ci-dessus, le nombre des variables de décision augmente avec le nombre de composants du système. Le problème d'optimisation de regroupement est donc assez compliqué et prend beaucoup de temps de calcul. Afin de résoudre ce problème de temps de calcul, les approches de regroupement indirect proposées se basent sur des seuils. Ces seuils (les variables de décision) à optimiser sont souvent peu nombreux, le problème d'optimisation du regroupement indirect est donc moins compliqué. Les stratégies les plus connues utilisant cette approche sont celles de remplacement par blocs [222, 234]. Selon ces stratégies, tous les composants du systèmes sont remplacés après chaque  $T$  unités de temps. Lorsque un composant tombe en panne, il est immédiatement réparé par une réparation minimale ou par un remplacement complet. Le paramètre optimal de décision de maintenance du système  $T^*$  est déterminée en minimisant le coût moyen asymptotique :

$$CA(T) = \frac{c_{ms} + \sum_{i=1}^n [C_p^{(i)} + C_c^{(i)}(T)]}{T}$$

où  $c_{ms}$  est le coût de mise en œuvre de maintenance.

Les stratégies de type remplacement par blocs sont relativement faciles à mettre en place. Néanmoins, dans les cas où les composants défaillants sont remplacés à leur date de panne, ces remplacements provoquent parfois du gaspillage surtout dans le cas où l'intervalle de temps entre la date de panne d'un composant et la prochaine période de maintenance préventive est court. Afin d'éviter ce désavantage, une stratégie de remplacement par blocs modifiée est proposée dans l'article [34, 9]. Selon cette stratégie modifiée, aux dates de remplacement préventif, les composants suivants ne sont que remplacés si leur âge est supérieur à une limite d'âge  $a$ . Pour ces stratégies, deux paramètres optimaux de décision  $T^*$  et  $a^*$  sont déterminées en minimisant le coût moyen asymptotique.

*Remarque* : Toutes les stratégies mentionnées dans ce paragraphe de la maintenance préventive groupée statique ne peuvent qu'être faites avec une maintenance de type systématique (conformément à un calendrier ou appuyant sur cycles d'utilisation). Cela ne convient pas aux stratégies de maintenance conditionnelle dans lesquelles des contextes dynamiques (l'état de santé du système, changements d'environnement d'opération, etc.) nécessitent des mises à jour régulières.

#### **Stratégies de maintenance opportuniste**

Pour ce type de stratégies, le plan de regroupement, qui est programmé sur un horizon infini, contient les activités de maintenance préventive et/ou corrective effectuées en même temps et l'intervalle d'inter-inspection peut-être changé ou non. Toute intervention de maintenance effectuée sur un composant constitue également une opportunité d'action sur les autres composants [123]. L'exploitation des dépendances économiques entre composants conduit à envisager naturellement des stratégies de maintenance de type opportuniste [62].

Dans le cadre des stratégies de maintenance conditionnelle, il s'agit de déterminer les dates de surveillances et de maintenances d'un système. Comme mentionné dans la sous-section 2.3.1, sur la base de la fréquence des observations, on distingue la surveillance continue de la surveillance discrète. Pour la surveillance discrète, la condition du système n'est accessible qu'à des instants discrets. Ce type de surveillance est alors souvent moins coûteux que dans le cas de surveillance continue. Néanmoins, comme ce type de surveillance n'autorise des interventions qu'à des instants discrets, il peut omettre certaines défaillances survenues entre deux inspections successives [107, 117].

Dans le cadre de cette thèse, on ne considère que des stratégies de maintenance conditionnelle sous surveillance discrète. Ensuite, on présente ici deux types principaux de stratégies de maintenance de type opportuniste : la maintenance opportuniste statique (planification statique) et la maintenance opportuniste dynamique (planification dynamique).

*Maintenance opportuniste statique* : Une stratégie est appelée stratégie de maintenance op-

opportuniste statique lorsque la plupart de ses dates d'interventions sont fixées *a priori* durant la vie d'un système. Pour ce type de planification, les actions d'inspection/maintenance sont périodiques, ceci signifie que l'intervalle d'inter-inspection est inchangé et les dates de maintenance sont tenues de coïncider avec des inspections [61, 154, 246]. Pour les stratégies de maintenance de type statique, l'intervalle d'inter-inspection est une première variable de décision de maintenance. Elle est optimisée dans de nombreux modèles de maintenance conditionnelle (voir [139, 20, 308, 124, 293, 96, 146, 147] pour des systèmes mono-composants et [32, 253, 251, 148, 191, 192, 145, 194] pour des systèmes multi-composants).

En comparant avec les stratégies de maintenance opportuniste dynamique, les stratégies de maintenance opportuniste statique sont plus simples à réaliser et semblent plus appropriées dans la pratique, notamment pour des systèmes avec un grand nombre de composants. Ce type de planification est donc appliqué dans cette thèse.

*Maintenance opportuniste dynamique* : Lorsque les dates d'interventions (inspections et/ou maintenances) peuvent s'adapter au fur et à mesure aux conditions du système, une telle planification de maintenance est appelée planification dynamique. Certaines méthodes suivantes pour déterminer une séquence de dates d'interventions ont été proposées.

Dans la première méthode, les dates d'inspection/remplacement d'une stratégie sont définies sur la base de la disponibilité du système. Plus en détail, les dates d'inspection sont établies pour garantir une valeur de disponibilité maximum du système. De telles stratégies sont également appelées « inspection basée sur le quantile » (« quantile-based inspection »). On peut les trouver dans les articles [304, 305, 306, 74].

La seconde méthode est de définir les dates d'interventions en s'appuyant sur un taux de défaillance du système. Un taux de défaillance élevé nécessite des interventions plus fréquentes qu'un taux de défaillance faible. Pour cette méthode, les périodes d'inter-inspection s'adaptent au mode nominal et accéléré de la dégradation du système [226, 227, 8, 83, 214]. L'avantage de ces stratégies est la capacité de prendre en compte des covariables faciles à surveiller dans la décision d'interventions. Mais, ses inconvénients résident dans la difficulté d'optimisation d'un système d'un grand nombre de composants. La troisième méthode de planification dynamique dépend de niveau de risque du système. Il est bien évident que si le risque est élevé, on intervient plus fréquemment que si le risque est faible. Une stratégie d'inspection dynamique propose de se baser sur le risque de défaillance dans le cas où l'état d'un système est décrit par un processus stochastique multi-variables [189]. Certains autres travaux ont été réalisés en utilisant un critère économique afin de déterminer les dates d'inspection. Précisément, la prochaine date d'inspection est obtenue de manière à ce que le coût total de maintenance par unité de temps sur l'intervalle entre l'inspection actuelle et la prochaine inspection soit minimal [64, 288]. Un inconvénient de cette approche, dans certains cas, est que l'identification de ces conséquences est assez difficile.

La dernière méthode définit les durées d'inter-inspection en fonction de niveaux de dégradation observés lors de la précédente inspection. Les auteurs des articles [87, 127] ont choisi une fonction linéaire et strictement décroissante pour dire que plus le système est dégradé, plus il est inspecté fréquemment. Barker et Newby [23] étendent ce modèle en considérant des formes convexes et concave de la fonction de planification. Zhao *et al.* [312] appliquent le modèle de Barker et Newby pour planifier des actions de maintenance conditionnelle. En partageant la même idée, les auteurs de [31, 54, 125] présentent une structure d'inspection multi-seuils.

Toutefois, il convient de noter ici que tous les travaux mentionnés ci-dessus ne sont proposés que pour la maintenance de systèmes mono-composants dans le contexte de planification dynamique. Pour autant que nous sachions, il n'y a qu'un article qui a été proposé en se basant sur l'approche de niveaux de dégradation dans le cadre de maintenance conditionnelle opportuniste dynamique [56]. En effet, la structure paramétrique de la stratégie de maintenance conditionnelle opportuniste proposée pour un système à 2 composants i.i.d. en séries dans cet article est étendue de la stratégie de maintenance de contrôle-limite multi-seuils proposées dans [53, 55]. La prochaine date d'intervention déterminée pour le composant  $i$  dépend de son niveau de dégradation à la fin d'opération de maintenance et la prochaine date d'inspection du système est donnée par le minimum de toutes les dates d'intervention des composants. Du point de vue théorique, la méthode d'adaptation au niveau de dégradation peut apporter plus d'avantage économique par rapport à une stratégie périodique [156]. Néanmoins, ces inconvénients, comme dans la méthode de taux de défaillance, résident dans la difficulté d'optimisation de plusieurs paramètres lorsque le nombre de composants du système augmente. C'est la raison pour laquelle, la plupart des travaux effectués dans la littérature dans le contexte de maintenance conditionnelle opportuniste sont basés sur la planification statique [32, 253, 251, 148, 191, 192, 145].

Selon la façon de grouper les actions de maintenance corrective et préventive, nous considérons les trois types suivants de maintenance opportuniste : la maintenance corrective groupée, la maintenance corrective retardée et la maintenance préventive avancée.

*Maintenance corrective groupée* : Bien que la maintenance préventive soit destinée à réduire la probabilité de panne du système, il subsiste une part de maintenance corrective incompressible. Donc, il est important d'étudier et de proposer des règles de décision de maintenance corrective à côté de la maintenance préventive.

Le plan de regroupement des stratégies de maintenance corrective groupée vise à grouper les actions de maintenance corrective à des dates opportunistes (lorsque le nombre de composants défaillants atteint un seuil prédéfini [110] ou des dates d'arrêt du système [191, 192], par exemple). La maintenance corrective groupée s'applique souvent à la maintenance de systèmes redondants où quelques composants peuvent être laissés dans l'état de panne sans interrompre le fonctionnement du système. Par exemple, quand un composant non-critique tombe en panne, il est laissé en panne jusqu'à la prochaine date.

[204] propose une stratégie de maintenance corrective pour un système parallèle à  $n$  composants i.i.d. pour laquelle une opération corrective est menée à chaque  $T$  unité de temps sur tous les composants défaillants.  $T$  est la variable unique de décision de cette stratégie et déterminé en minimisant le coût moyen par unité de temps sur horizon infini. En considérant le même modèle que celui dans [204], Gertsbakh [110] construit une stratégie dans laquelle un seuil de nombre de composants défaillants est utilisé comme un paramètre de décision de maintenance corrective. Pour cette stratégie, tous les composants défaillants sont conjointement remplacés quand le nombre de composants défaillants atteint un seuil  $m$ . Nguyen et al. [191, 192] examinent une stratégie de maintenance corrective groupée où tous les composants non-critiques défaillants sont laissés en l'état de panne et remplacés conjointement à une date opportuniste (lorsque le système tombe en panne) sous une contrainte logistique.

*Maintenance corrective retardée* : Lorsque les activités de maintenance corrective et préventive sont groupées à une date donnée *a priori* en retardant les activités de maintenance corrective, on parle de maintenance corrective retardée. Pour ce type de maintenance, quand un composant tombe en panne, aucune action de maintenance n'est faite à l'instant de panne. Le composant défaillant est laissé dans l'état de panne et sera maintenu conjointement avec les activités de maintenance préventive, si elles existent, à la prochaine période de maintenance préventive.

Il convient de noter que le retardement d'activités de maintenance corrective peut d'une part économiser des coûts de mise en œuvre, le coût de réparation et des coûts liés à la préparation de pièces de rechange, mais, d'autre part, ce retardement peut conduire à la croissance de probabilité de défaillance du système dont la conséquence est l'augmentation de coûts du risque (coût d'indisponibilité, par exemple). C'est la raison pour laquelle la maintenance corrective retardée peut s'avérer judicieuse pour la maintenance des systèmes redondants où l'arrêt de quelques composants ne conduit pas toujours à l'arrêt du système.

On peut citer ici les travaux dans [32, 56, 253, 251, 148, 191, 192, 145].

*Maintenance préventive avancée* : Toute intervention de maintenance (corrective ou préventive) effectuée sur un composant constitue une opportunité d'action sur les autres composants (c-à-d. l'opportunité de regroupement d'interventions) et l'exploitation des dépendances économiques entre composants conduit à envisager naturellement des stratégies de maintenance préventive avancée [231, 273, 62]. Pour les stratégies de ce type, en profitant de la maintenance (préventive/corrective) d'un composant, les autres composants dans le système peuvent être choisis et remplacés préventivement. Ces stratégies sont souvent appliquées pour la maintenance des systèmes séries où l'arrêt de n'importe quel composant conduit immédiatement à l'arrêt du système et cet arrêt peut-être considéré comme une opportunité de faire la maintenance préventive sur les autres composants [56].

Les stratégies de type maintenance préventive avancée, comme les stratégies de type main-

tenance préventive retardée, sont largement développées et appliquées pour la maintenance des systèmes industriels réels. On peut trouver les travaux liés aux telles stratégies dans les articles [56, 253, 251, 145, 164, 143, 313, 142, 302].

*Remarque* : en résumant, la maintenance préventive avancée est préférée pour la maintenance de systèmes à composants multiple en séries. Un inconvénient de ce type de stratégies est que certaines activités de maintenance ne sont pas connues à l'avance. En conséquence, aucun plan et aucune tâche de préparation ne sont possibles. Au contraire, la maintenance corrective retardée est appropriée pour la maintenance de systèmes redondants. Elle permet souvent de préparer et de planifier les tâches de préparation à l'avance surtout quand les instants de panne des composants sont éloignés de la prochaine période de maintenance préventive.

## 2.4 Méthodes d'évaluation

Dans cette section, on s'attache à étudier des méthodes pour évaluer les performances de stratégies de maintenance. Pour ce faire, un critère de performance doit être premièrement déterminé. Comme l'on a mentionné dans la section 1.4 du chapitre 1, le critère de coût (ou critère économique) est appliqué à la plupart des situations en pratique, et donc, il est largement utilisé dans l'optimisation de performances de maintenance [269, 282, 151]. On parle dans la suite tout d'abord de certains critères économiques disponibles dans la littérature, et ensuite des deux méthodes les plus connues pour les évaluer. Finalement, un critère économique et une méthode d'évaluation sont choisis pour être appliqués dans toute la thèse.

### 2.4.1 Critères économiques

Les critères économiques peuvent être évalués sur un horizon fini [187] ou infini [127, 126, 56], selon une durée de temps d'exploitation d'un système [52, 213, 268]. L'exploitation à long terme des systèmes mène naturellement à utiliser des critères sur un horizon infini. Il y a deux raisons pour choisir ces critères. La première est qu'il vaut mieux évaluer les décisions d'investissements itératifs (tels les actions de maintenance) sur un horizon infini plutôt qu'ignorer des situations futures, et la deuxième est que la modélisation mathématique sur un horizon infini est moins complexe, et peut satisfaire les besoins de plusieurs applications pratiques [280]. On appliquera donc cette approche asymptotique à nos modèles de maintenance dans cette thèse.

Avec la approche asymptotique basée sur un horizon infini, il est naturel de considérer des critères liées à des coûts asymptotiques. On distingue le critère de coût moyen asymptotique, le critère de coût amorti asymptotique et le critère de coût équivalent [267, 280].

Le critère de coût moyen asymptotique est simplement le coût total de maintenance cumulé à long terme par unité de temps [30]. Ce critère est adapté aux situations pour lesquelles la valeur

de l'argent est plus ou moins stable en temps et aucun grand investissement n'est ajouté sur le système à maintenir [144]. Lorsqu'il existe un changement dans la stratégie d'investissement ou une grande variation de valeur de l'argent, le critère de coût amorti asymptotique ou le critère de coût équivalent sont utilisés [261]. D'après [267], le critère de coût amorti asymptotique est calculé par la valeur d'escompte de coût de maintenance sur un horizon infini. Il peut-être représenter sous une forme mathématique que la valeur d'escompte du coût  $C_t$  dans  $t$  unité de temps est définie par  $\eta^t C_t$ , où  $\eta = \left(1 + \frac{r}{100}\right)^{-1}$ ,  $r > 0$  le taux d'escompte réel. Le critère de coût équivalent relie les deux critères précédents. Il est calculé par le coût amorti asymptotique par unité de temps. Les deux derniers critères se justifient par le fait que la valeur de l'argent diminue en temps (« a dollar today is worth more than a dollar tomorrow » [245], par exemple).

## 2.4.2 Méthodes d'évaluation

Après de choisi un critère, l'étape finale dans la modélisation en maintenance a pour but d'évaluer les performances de la stratégie de maintenance. Il existe de nombreuses méthodes d'évaluations dans la littérature pour ce but [213]. Dans cette sous-section, on présente les méthodes d'évaluation stochastiques les plus utilisées telles que la méthodes d'évaluation analytique et la méthodes d'évaluation numérique. Toutes les méthodes sont présentées en se basant sur le critère de coût moyen asymptotique, noté  $C_\infty$ .

### Évaluation analytique

Dans le cas de modèles de maintenance suffisamment simples (la simplicité de modèles de défaillance, de règles de décision, d'inspection, d'action de maintenance, etc.), il est possible d'appliquer la méthode d'évaluation analytique qui se base essentiellement sur les propriétés de régénération ou de semi-régénération du processus d'évolution du système maintenu [33, 205].

Pour la propriété de régénération, il est possible d'identifier des instants de régénération (ou renouvellement) auxquels le système se retrouve exactement dans le même état (et avec les même lois qui régissent son évolution) avec une probabilité de 1 au bout d'un temps fini. Les instants de régénération correspondent aux dates de remise à neuf du système (par l'opération de remplacement préventive ou corrective). Dans le cas où le système est neuf à l'instant initial et sans tenir compte de la durée de l'intervention pour la remise à neuf, on parlera de processus de renouvellement simple pour les dates de remise à neuf [68]. Dans ce cas, la propriété de régénération du processus peut-être utilisée pour calculer le coût moyen asymptotique [12, 254, 165, 9], qui est égal au rapport de l'espérance de coût de maintenance sur un cycle de renouvellement et de la longueur moyenne du cycle :

$$C_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E[C(H)]}{E[H]} \quad (2.17)$$

où :

- $E$  est l'espérance mathématique ;
- $C(t)$  est le coût de maintenance cumulé à l'instant  $t$  ;
- $H$  est l'instant de premier renouvellement.

On peut trouver dans [84, 85, 166, 173, 261] les travaux dans lesquels l'optimisation de maintenance est effectuée sur la base de l'équation (2.17) de la propriété de régénération.

Lorsque les modèles de maintenance sont plus complexes, les instants de renouvellement peuvent être difficiles à identifier. Dans ce cas, on s'attache à chercher à réduire d'autant plus le domaine de l'étude en mettant à profit la propriété de semi-régénération [12, 68]. Plus précisément, au lieu d'identifier les instants de renouvellement, on identifie les dates de renouvellement markoviens (ou dates de semi-régénération) auxquels le système ne se retrouve pas dans l'état initial, mais « oublie » son passé. Alors, l'évolution de dégradation du système après une intervention ne dépend que du niveau de dégradation à la fin de cette intervention. Le coût moyen asymptotique  $C_\infty$ , qui est calculé en se basant sur cette propriété de semi-régénération, est donné par [30] :

$$C_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E_\pi [C(T)]}{E_\pi [T]}, \quad (2.18)$$

où :

- $\pi$  est la loi stationnaire de la chaîne de Markov immergée représentant l'état du système aux instants d'inspection ;
- $T$  est la longueur d'un cycle de semi-régénération en régime stationnaire.

On peut trouver dans [54, 56, 87, 127, 214, 145] des travaux dans lesquels l'optimisation de maintenance est effectuée sur la base de l'équation (2.18) de la propriété de semi-régénération.

### Évaluation numérique

Lorsque le coût moyen asymptotique d'un système est trop difficile d'obtenir en le calcul analytique (la complexité de modèles de dégradation, de règles de décision de maintenance, de structure du système, etc.), il faut avoir recours aux méthodes numériques qui sont faites en se basant sur une approche stochastique. Avec cette approche, on s'intéresse à la simulation de Monte Carlo [225]. La simulation de Monte Carlo peut-être divisée en la simulation avec des incréments de temps variables et la simulation avec des incréments de temps fixés [180]. La dernière est utilisée dans cette thèse. Cette méthode consiste à simuler un grand nombre d'histoires indépendantes décrivant chacune une trajectoire possible de la dégradation du système, de l'instant initial et pour un temps donné ou jusqu'à un critère donné (par exemple, l'atteinte d'un seuil de panne). Pour chaque histoire, les dates d'occurrence des différents événements possibles, comme l'évolution d'une dégradation, sont identifiées, en effectuant un tirage aléatoire.

De cette façon, on peut récrire le coût moyen asymptotique sous la forme :

$$C_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(t)}{t} = \frac{E[C(H)]}{E[H]} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_k}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N T_k} \simeq \frac{\sum_{k=1}^{N_b} C_k}{\sum_{k=1}^{N_b} T_k}, \quad (2.19)$$

où :

- $H$  est l'instant de premier renouvellement ;
- $N_b$  représente un nombre suffisamment grand d'histoires ;
- $T_k$  correspond à la longueur du premier cycle de renouvellement de la  $k^{\text{ème}}$  histoire ;
- $C_k$  est le coût de maintenance sur le cycle de renouvellement de la  $k^{\text{ème}}$  histoire.

Cette méthode nécessite l'observation d'un grand nombre d'histoires afin de converger vers la solution optimale, elle nécessite souvent un long temps de calcul. Quelques modèles de maintenance évalués par simulation Monte Carlo se trouvent dans [59, 66, 107, 106, 181, 312].

Étant donné la complexité de problèmes proposés (complexité de structure du système, de procédures de décisions), la méthode d'évaluation numérique est appliquée à évaluer les performances des stratégies proposées dans cette thèse.

## 2.5 Conclusion et problèmes d'études

Notre objectif final constitue à développer quelques stratégies de maintenance prévisionnelle ainsi que des stratégies conjointes de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange. Elles visent à s'appliquer aux systèmes cohérents à composants multiples avec structure complexe. Pour ce faire, nous décidons d'organiser les travaux d'étude en trois étapes permettant de déterminer un modèle de maintenance prévisionnelle : (i) modéliser les systèmes cohérents à composants multiples, (ii) construire les procédures de décision de maintenance ainsi que d'approvisionnement des pièces de rechange, (iii) évaluer les performances des stratégies proposées. L'étude bibliographique dans les sections précédentes du ce chapitre permet d'identifier les problèmes liés à chaque étape et de répondre à la problématique posée dans le premier chapitre.

### 2.5.1 Modélisation d'un système à composants multiples avec structure complexe

L'étude bibliographique montre que tous les travaux s'intéressent au développement de stratégies de maintenance conditionnelle pour la maintenance de systèmes avec structure série en considérant que l'arrêt de n'importe quel composant va conduire à l'arrêt du système. La considération de tels systèmes conduit à limiter l'application en pratique de ces stratégies de maintenance. Afin de compenser ce manque, on s'attache à étudier et présenter dans ce manuscrit un modèle plus réaliste de système à composants multiples.

## Structure du système

Comme mentionné dans la sous-section 2.2.1, on s'intéresse à des systèmes à composants multiples avec structure complexe. Chacun de ces systèmes inclut  $n$  composants différents et la connection entre eux suit une structure complexe, c'est-à-dire qu'elle peut consister une n'importe quelle combinaison des structures élémentaires (séries, parallèles, série-parallèle, parallèle-série,  $k$ -sur- $n$ ).

## Importance des composants dans d'un système cohérent

Bien que de nombreux de facteurs d'importance aient été étudiés et proposés dans la littérature, leurs applications dans la prise de décision de maintenance sont encore assez rares. Sur la base de l'étude bibliographique sur ce problème, on précise dans cette thèse deux facteurs d'importance potentiels : le facteur d'importance structurel de Birnbaum et une extension du facteur d'importance fiabiliste [37] à un « facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût ». Ils seront utilisés dans la prise de décisions liée à la maintenance prévisionnelle et à l'approvisionnement de pièces de rechange.

## Modèle stochastique des composants

La plupart des études existant dans la littérature liées à la maintenance conditionnelle des systèmes à composants multiples, considèrent que tous les composants du système ont la même loi de distribution de probabilité de défaillance. Cependant, dans un système à composants multiples dans la réalité, il existe parfois quelques composants dont le niveau de dégradation peut n'être pas obtenu par l'opération d'inspection. Dans ce cas, des modèles de durée de vie sont appliqués. En conséquence, on intègre dans notre travail les deux types de modèle stochastique (modèles de dégradation graduelle et modèles de durée de vie) dans le même modèle de maintenance. Dans cette thèse, on choisit deux représentants correspondant à deux types de modèle stochastique tels que le processus Gamma, qui est utilisé pour la modélisation de dégradation graduelle des composants pour lesquels leurs niveaux de dégradation sont disponibles, et la loi de Weibull est utilisée pour modéliser la durée de vie et une représentation binaire marche/panne de l'état des composants pour lesquels leur niveau de dégradation ne peut pas être obtenu. En effet, les lois Gamma et Weibull sont largement utilisées dans la littérature étant donné leur versatilité et leur simplicité [178, 299, 127, 269, 307]. Il convient de noter ici que lois Gamma et Weibull sont utilisées à titre d'exemple et que les autres lois, qui sont appropriées à représenter respectivement l'évolution de dégradation et la durée de vie, peuvent être envisagées à s'appliquer aux modèles de maintenance proposés dans ce mémoire.

## Dépendances entre composants

Nous nous limitons dans ce manuscrit aux dépendances économiques entre composants. Dans la littérature, la plupart des stratégies de maintenance conditionnelle ne sont que faites avec des systèmes à composants multiples avec structure série où seuls des dépendances économiques positives existent. Pour nos études, les deux dépendances économiques positive et négative sont considérées et intégrées dans les processus de décision de maintenance ainsi que d'approvisionnement des pièces de rechange.

### 2.5.2 Développement des stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange pour des systèmes à composants multiple avec structure complexe

De nombreuses stratégies de maintenance ont été proposées dans la littérature pour la maintenance de systèmes à composants multiples. La plupart de ces stratégies sont développées en se basant sur la maintenance systématique. Les stratégies de maintenance conditionnelle pour des systèmes à composants multiples se limitent souvent aux structures simples (série ou  $k$ -sur- $n$ ). Jusqu'à maintenant, aucun travail d'étude n'est réalisé sur des systèmes à composants multiples avec structure complexe dans le contexte de la maintenance conditionnelle. C'est la raison pour laquelle notre objectif est de développer des stratégies de maintenance conditionnelle (plus précisément, celles de maintenance prévisionnelle) pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe sous la maintenance opportuniste. Précisément, dans le premier temps (dans la seconde partie), nous nous concentrons sur la recherche de deux facteurs d'importance mentionnés ci-dessus à proposer deux stratégies pures de maintenance prévisionnelle dont le processus de décision est basé respectivement sur ces facteurs. Ensuite, dans la troisième partie, nous étudions une stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle (qui est une de deux stratégies proposées dans la seconde partie) et d'approvisionnement des pièces de rechange afin d'augmenter la chaîne de valeur d'une entreprise. Dans ces stratégies, les éléments suivants sont pris en compte dans les processus de décision :

- des informations conditionnelles pour le pronostique de tous les composants,
- la structure du système et la dépendance structurelle entre composants du point de vue de la fiabilité,
- la dépendance d'états (marche/panne) entre composants dans le système,
- les aspects positifs de regroupement de maintenance tels que l'économie de coûts de mise en oeuvre et d'arrêt planifié et les impacts négatifs du regroupement sur le fonctionnement du système qui dépendent de la structure du système du point de vue de la maintenance.

### **Stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum avec maintenance corrective groupée**

Cette stratégie est développée dans le chapitre 4 de la partie II, la maintenance corrective groupée est appliquée aux dates d'opportunité d'action (date de panne du système) sous des contraintes logistiques, et la maintenance préventive n'est que effectuée à des dates d'inspection. Il convient de noter que les composants défaillants précédents sont également maintenus correctivement à ces dates (maintenance corrective retardée). Le choix d'un composant survivant à une date d'inspection pour la maintenance préventive est basé sur son facteur d'importance structurel et sa fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle. La procédure de décision de maintenance préventive de cette stratégie construite est basée sur le seul niveau du composant.

### **Stratégie de maintenance prévisionnelle pour des systèmes multi-composants en utilisant le facteur d'importance d'amélioration basé sur le coût**

Cette stratégie, développée dans le chapitre 5 de la partie II, vise à s'appliquer à une extension du facteur d'importance fiabiliste à un « facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût » afin de construire les règles de décision en se basant sur deux niveaux : le niveau du système et le niveau du composant. Le but de règles de décision au niveau du système est d'adresser l'intérêt de l'opération de maintenance préventive du point de vue de la fiabilité provisionnelle du système. Au niveau du composant, les règles de décision visent à chercher un groupe optimal de plusieurs composants qui doit être remplacé préventivement si la maintenance préventive est déclenchée en raison de la décision au niveau du système. Contrairement à la première stratégie, la maintenance préventive et la maintenance corrective ne sont que faites à des dates d'inspection (maintenance corrective retardée).

### **Stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum**

Comme les stratégies de maintenance conditionnelle proposées pour la maintenance de systèmes à composants multiples, la plupart des stratégies conjointes de maintenance et d'inventaire de pièces de rechange existantes dans la littérature ne sont pas développées pour des systèmes à composants multiple avec structure complexe. Dans la partie III, sur la base d'une des deux stratégies proposées dans la partie II, on l'étend à une stratégie conjointe dans laquelle les deux stratégies de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange sont considérées à optimiser conjointement. Pour cette stratégie, le processus de la prise de décision de maintenance et d'inventaire est basé sur le facteur d'importance structurel de chaque composant et sa fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle.

### **2.5.3 Évaluation des performances économiques des stratégies proposées**

L'évaluation des performances économiques d'une stratégie proposée est l'étape finale dans la construction d'un modèle de maintenance. L'objectif de cette étape est de déterminer les variables de décision optimaux correspondant à un coût global de maintenance optimal. Dans le cadre de cette thèse, le coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini peut-être obtenu par l'utilisation de la méthode d'évaluation numérique. Pour ce faire, on construit un modèle mathématique de coût, qui permet de mettre facilement en œuvre les simulations numériques, pour chaque stratégie proposée.

## **Deuxième partie**

# **Stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe**



# Introduction

Le premier objectif de cette partie est de développer deux stratégies de maintenance prévisionnelle périodiques pour lesquelles le regroupement d'activités de maintenance du type opportuniste est effectué suivant deux approches différentes.

La première stratégie de maintenance prévisionnelle est proposée dans le chapitre 4. La maintenance corrective groupée est appliquée immédiatement aux instants de pannes du système à maintenir, avec une contrainte logistique. La maintenance préventive n'est effectuée qu'à des dates d'inspection. Il convient de noter qu'en l'absence de panne du système les composants défaillants sont également maintenus correctivement à ces dates d'inspection (maintenance corrective retardée). Le choix de réaliser une action de maintenance préventive sur un composant survivant à une date d'inspection est basé sur son facteur d'importance structurel et sa fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle. Tous les règles de décision de maintenance préventive de cette stratégie sont basées sur le seul niveau des composants. Le niveau du système n'est pas considéré.

La seconde stratégie est proposée dans le chapitre 5. Elle prend en compte les informations fournies par des indicateurs évalués au niveau du système et au niveau du composant. Le but des règles de décision au niveau du système est d'évaluer si l'opération de maintenance préventive est nécessaire du point de vue à la fiabilité prévisionnelle globale du système. Au niveau du composant, les règles de décision visent à déterminer un groupe optimal de plusieurs composants qui doivent être remplacés préventivement simultanément lorsque la décision de maintenance préventive est prise au niveau du système. Contrairement à la première stratégie, la maintenance préventive et la maintenance corrective ne sont effectuées qu'aux dates d'inspection (maintenance corrective retardée).

Il convient de noter que cette partie se focalise exclusivement sur la décision d'actions de maintenance et le développement de modèles pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. Le problème de la gestion des stocks sera abordé plus tard. Les pièces de rechange sont supposées être toujours disponibles pour tous les remplacements sauf les rempla-

cements urgents.

Les caractéristiques générales importantes prises en compte pour la décision de maintenance dans les deux stratégies proposées sont :

- les informations conditionnelles de pronostic pour tous les composants,
- la structure du système et la dépendance structurelle entre composants du point de vue de la fiabilité,
- la dépendance des états (marche/panne) entre composants du système,
- les aspects positifs de regroupement de maintenance (PED) tels que l'économie de coûts de mise en oeuvre et d'arrêt planifié ainsi que les impacts négatifs du regroupement sur le fonctionnement du système (NED) qui dépendent de la structure du système.

Pour permettre de mettre en oeuvre des travaux, la modélisation des comportements liés au vieillissement et à la défaillance du système, les dépendances d'états entre composants, la prédiction de la fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle du système ainsi que de ses composants et la structure des coûts liés aux interventions sur le système sont étudiées et présentées dans le chapitre 3.

Enfin, pour mettre en évidence les avantages ainsi que les faiblesses de chacune de deux stratégies proposées respectivement dans les chapitres 4 et 5, des études de sensibilité et des comparaisons de performance entre les deux stratégies proposées sont présentées dans le chapitre 6.

# Chapitre 3

## Modélisation de dégradation et structure de coûts de maintenance

### 3.1 Introduction

La classe des stratégies de maintenance conditionnelle regroupe l'ensemble de stratégies préventives pour lesquelles des décisions de maintenance se prennent sur la base d'une observation de l'état du système à maintenir. Différents modes de dégradation correspondant à diverses réalités peuvent être considérés. Une part importante des modèles de maintenance conditionnelle développés dans la littérature est basée sur des modèles de dégradation à états discrets pour lesquels le système peut se trouver dans un nombre fini d'états distincts [158, 256, 202, 296, 247, 72, 139, 39].

Les modèles de dégradation à états continus qui sont développés sur la base d'une prise en compte de la nature continue du phénomène de détérioration sont moins nombreux et apparus plus récemment. On peut citer les références [2, 63, 20, 124, 58]. Dans cette classe de modèles de dégradation à états continus, deux types de modèles sont envisagées : les modèles de type limite de défaillance sur le niveau de dégradation (la panne est caractérisée par le franchissement d'un seuil limite de dégradation) et les modèles de type taux de défaillance dépendant du niveau d'usure (l'instant de panne est une variable aléatoire dont les caractéristiques dépendent du niveau de dégradation). Le premier type de cette classe est présenté et développé dans ce chapitre.

Plus précisément, on présente un modèle de défaillance pour un système à composants multiples avec structure complexe dont les composants sont soumis à des phénomènes de dégradation graduelle. L'évolution de la dégradation est modélisée par des processus stochastiques à espace d'états continus. Un composant du système est considéré en état de panne dès que son niveau de dégradation dépasse un seuil critique. La modélisation de ce type permet de prendre

en compte la dynamique de dégradation de tous les composants du système et de déterminer l'indicateur conditionnel de pronostic (la fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle) du système et de ses composants. Les structures de coûts liés aux interventions sur le système sont également présentées dans ce chapitre.

La suite du chapitre s'organise de la manière suivante. La section 3.2 modélise les mécanismes de dégradation stochastique et de défaillance du système à composants multiples avec structure complexe. Une description de la dépendance d'états (marche/panne) entre composants dans le système est également présentée ici. La section 3.3 se focalise sur la prédiction de fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle aux niveaux du composant et du système pour le système étudié. Les structures de coûts d'interventions (surveillance/inspection, maintenance corrective/préventive, etc.) sur le système sont présentées dans la section 3.4. Enfin, certaines conclusions issues de ce chapitre sont présentées dans la dernière section 3.5.

## 3.2 Modélisation de dégradation du système

Considérons un système cohérent qui est composé de  $n$  composants à dégradation graduelle continue et pour lequel la connection entre composants peut suivre une structure complexe. La structure est ici qualifiée de « complexe » dans le sens où elle peut consister une n'importe quelle combinaison des structures élémentaires (séries, parallèles,  $k$ -sur- $n$ , etc.). Les composants dans le système sont dépendants structurellement du point de vue de la fiabilité et économiquement du point de vue de la maintenance. Avant de présenter des stratégies de maintenance proposées pour un système de ce type, il est utile d'évoquer le choix du modèle de dégradation qui tient une place importante dans un modèle de maintenance conditionnelle.

### 3.2.1 Description générale de dégradation

Le renforcement des techniques de surveillance de l'état de santé d'un système a permis de développer l'étude des phénomènes de dégradation et leur modélisation. Pour certaines classes de systèmes, il est possible d'identifier des phénomènes d'usure, de fatigue et plus précisément de détériorations qui évoluent de manière continue au cours du temps et mènent à la défaillance ou à l'incapacité du système à remplir sa mission. Le choix de conserver une caractéristique de continuité dans le temps ainsi que sur l'espace des valeurs possibles de la dégradation permet d'asseoir la décision de maintenance sur un niveau de dégradation directement mesurable, dont la signification physique est en pratique plus facile à appréhender par l'opérateur de maintenance que lorsqu'il s'agit d'états construits artificiellement.

Différents systèmes peuvent subir des phénomènes de dégradation. Il peut s'agir par exemple de l'augmentation du courant de fuite sur une grille d'oxyde ultra-mince produite grâce aux

nano-technologies [57, 82], de la croissance d'une fissure de fatigue sur du métal [260], de l'érosion sur des structures de retenue d'eau [271, 265, 242], de la corrosion sur des pipe-lines [138] ou des ouvrages d'art en béton armé [221], d'une usure due aux frottements pour des pneumatiques, des plaquettes, etc. Quelques hypothèses générales peuvent être mises en avant pour caractériser les phénomènes de dégradation pris en compte dans la suite et permettre le choix d'un modèle générique. En particulier, l'évolution de dégradation en fonction du temps peut-être considérée comme une fonction monotone (par exemple croissante) en l'absence de toute opération de maintenance (pas d'amélioration spontanée du système). Pour les phénomènes envisagés, l'atteinte d'un niveau de dégradation donné est interprétée comme résultant d'une accumulation d'incrément aléatoires dus à l'usure à laquelle est soumis le composant au cours de sa vie utile. L'ordre dans lequel les événements surviennent est considéré sans influence [266]. Cette dernière constatation évoque le choix de variables aléatoires échangeables.

Si le niveau de dégradation du composant  $i$  est représenté par un processus stochastique  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$ , les hypothèses minimales imposent à ce processus stochastique de vérifier les propriétés suivantes :

- le processus  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$  est non décroissant,
- le processus  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$  est à incréments stationnaires indépendants, c'est à dire que la distribution de  $X_{t+s}^{(i)} - X_t^{(i)}$  dépend uniquement de  $s$  et que les incréments de dégradation  $X_{t_{k+1}}^{(i)} - X_{t_k}^{(i)}$  sont mutuellement indépendants pour tout ensemble fini  $t_1 < t_2 < \dots < t_K$ . Cette propriété est proche, mais plus forte qu'une propriété de stationnarité et d'échangeabilité des incréments.

### 3.2.2 Modélisation de dégradation par processus Gamma

Les propriétés d'indépendance des incréments et de stationnarité amènent à considérer la classe des processus de Lévy [3, 11]. Ces processus stochastiques s'expriment comme la somme d'un processus de Wiener (à trajectoire continue) et d'un processus de saut. Dans cette classe, la propriété de positivité des incréments conduit à se limiter aux processus de sauts purs et le choix de processus Gamma homogènes en temps se fait alors naturellement. De plus, ces processus permettent de disposer de fonctions de densité de probabilité marginales explicites. L'intérêt des processus Gamma a été justifié par différents auteurs (cf. dans les articles [239, 270]).

L'évolution de la dégradation du composant  $i$  est supposée suivre un processus Gamma homogène  $\{\tilde{X}_t^{(i)}, t \geq 0\}$  de paramètre de forme  $\alpha^{(i)} > 0$  et de paramètre d'échelle  $\beta^{(i)} > 0$  si elle vérifie les propriétés suivantes :

- l'état initial  $\tilde{X}_0^{(i)} = 0$ , ce qui signifie que le composant  $i$  est neuf à  $t = 0$ ,
- les incréments de  $\{\tilde{X}_t^{(i)}, t \geq 0\}$  sont indépendants et stationnaires,
- pour tout  $0 \leq t < t + s$ , l'incrément de dégradation  $\tilde{X}_{t+s}^{(i)} - \tilde{X}_t^{(i)}$  est une variable aléatoire qui suit une loi Gamma de paramètre de forme  $\alpha^{(i)} \cdot (t + s - t) = \alpha^{(i)} \cdot s$  (la linéarité en

$s$  est nécessaire pour l'homogénéité en temps) et de paramètre d'échelle  $\beta^{(i)}$ . La fonction de densité de probabilité s'écrit :

$$f_{\alpha^{(i)},s,\beta^{(i)}}(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha^{(i)} \cdot s)} (\beta^{(i)})^{\alpha^{(i)} \cdot s} x^{\alpha^{(i)} \cdot s - 1} e^{-\beta^{(i)} \cdot x} \mathcal{I}_{\{x \geq 0\}}, \quad (3.1)$$

où :  $\mathcal{I}$  représente la fonction indicatrice. Pour un événement donné,  $\mathcal{I}_{\{A\}} = 1$  si l'évènement  $\{A\}$  est vrai et 0 sinon.  $\Gamma(\cdot)$  désigne la fonction Gamma dont la définition est donnée par :

$$\Gamma(y) = \int_0^{+\infty} x^{y-1} \exp(-x) dx, \quad \text{pour } y > 0. \quad (3.2)$$

La détérioration moyenne par unité de temps est alors égale au rapport de  $\alpha^{(i)}$  sur  $\beta^{(i)}$  et sa variance est donnée par le rapport de  $\alpha^{(i)}$  sur  $(\beta^{(i)})^2$ . Plus la détérioration moyenne  $\alpha^{(i)}/\beta^{(i)}$  est importante, plus le processus de dégradation est rapide. Le choix des paramètres  $\alpha^{(i)}$  et  $\beta^{(i)}$  permet de modéliser des comportements de dégradation très divers, quasiment déterministes ou très chaotiques. Les paramètres du processus peuvent être estimés à partir des données de dégradation par des méthodes statistiques classiques telles que la méthode du maximum de vraisemblance, la méthode de moments, etc. Pour plus de détails, on pourra se référer à l'article de Van Noortwijk [269]. La figure 3.1 illustre l'évolution de la dégradation du composant  $i$  avec  $\alpha^{(i)} = \beta^{(i)} = 0.2$ .

### Défaillances liées au niveau de dégradation :

Dans ce paragraphe, nous expliquons une manière de modéliser une défaillance ou panne des composants et du système.

- *Défaillance/panne des composants* : lorsque le niveau de dégradation  $\tilde{X}_t^{(i)}$  dépasse le seuil de défaillance/panne  $Z^{(i)}$ , le composant  $i$  est dit «défaillant». Le composant  $i$  n'a alors plus la capacité à remplir sa mission, même s'il est encore en fonctionnement. Les exemples suivants sont donnés pour illustrer le seuil de défaillance/panne d'une entité. Un moteur fonctionnant à une température plus de 115°C est inacceptable [191]. Dans des centrales nucléaires, un pipeline de transfert de chaleur dont l'épaisseur nominale est de 6,5mm est considéré défaillant lorsqu'une fissure atteint la taille de 3,09mm [60]. Une poutre de soubassement est dessinée en fonction d'une charge limite donnée. Le paramètre de performance est le stress  $\sigma$  calculé à partir de la charge réellement appliquée et le seuil de défaillance sur  $\sigma$  est la valeur limite  $[\sigma]$ . Quand  $\sigma \geq [\sigma]$ , la poutre est considérée comme inapte à remplir sa fonction[309]. Une soupape de tiroir est conçue avec une fonction de contrôle de circulation de l'huile dans le circuit hydraulique. L'augmentation du jeu du tiroir  $x$  dû à l'usure conduira à la fuite d'huile et affecte alors la fonction désirée. Par conséquent, le paramètre de performance du tiroir est le jeu  $x$  et le seuil de panne

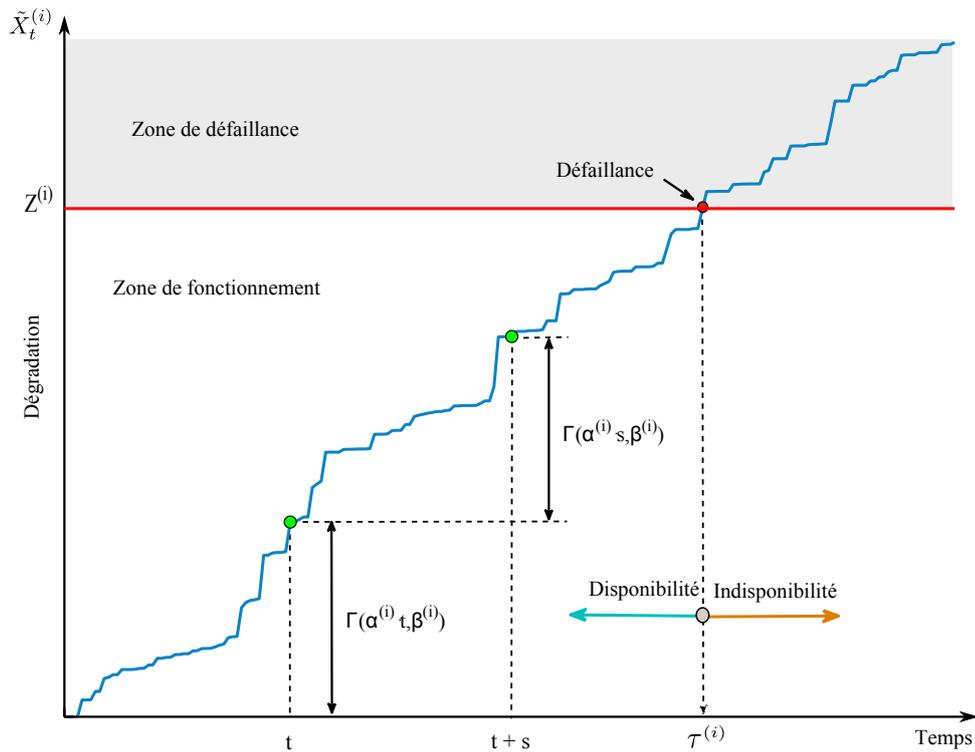


FIGURE 3.1 – Illustration d'évolution de dégradation du composant  $i$  avec  $\alpha^{(i)} = \beta^{(i)} = 0.2$ .

correspondant  $x_{th}$  est déterminée à partir des exigences fonctionnelles. Quand  $x \geq x_{th}$ , la soupape du tiroir devient défaillante [309] ;

- *Défaillance du système* : le système est considéré en panne s'il y a au moins une coupe minimale défaillante (c-à-d. si tous les composants associés à la coupe sont défaillants).

### 3.2.3 Estimation de paramètres du processus de dégradation Gamma

Supposons que l'on dispose d'enregistrements de données  $(\tilde{X}_{t_1}^{(i)}, \dots, \tilde{X}_{t_k}^{(i)}, \dots, \tilde{X}_{t_K}^{(i)})$  correspondant niveau de dégradation du composant  $i$  à  $K$  différents instants  $(t_1, \dots, t_k, \dots, t_K)$ . Ces données sont supposées parfaites sans bruit (l'estimation des paramètres Gamma à partir des enregistrements de données imparfaites avec des bruits de mesure peut-être trouvée dans [70, 168]). Afin d'estimer les paramètres du modèle de dégradation  $(\alpha^{(i)}, \beta^{(i)})$ , la technique du maximum de vraisemblance est ici utilisée, voir [224, 65]. La fonction de vraisemblance est exprimée

comme suit :

$$\begin{aligned}\mathfrak{L}(\alpha^{(i)}, \beta^{(i)}) &= \prod_{k=1}^K f_{\alpha^{(i)} \Delta t_k, \beta}(\Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}) \\ &= \prod_{k=1}^K \frac{(\beta^{(i)})^{\alpha^{(i)} \Delta t_k}}{\Gamma(\alpha^{(i)} \Delta t_k)} (\Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)})^{\alpha^{(i)} \Delta t_k - 1} e^{-\beta^{(i)} \Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}}.\end{aligned}$$

En conséquence, la fonction de log-vraisemblance est :

$$\begin{aligned}\ln \mathfrak{L}(\alpha^{(i)}, \beta^{(i)}) &= \sum_{k=1}^K (\alpha^{(i)} \Delta t_k \ln(\beta^{(i)}) - \ln(\Gamma(\alpha^{(i)} \Delta t_k))) \\ &\quad + (\alpha^{(i)} \Delta t_k - 1) \ln(\Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}) - \beta \Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}.\end{aligned}$$

On a

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \alpha^{(i)}} \ln \mathfrak{L}(\alpha^{(i)}, \beta^{(i)}) &= \sum_{k=1}^K (\Delta t_k \ln(\beta^{(i)}) - \Delta t_k \Psi(\alpha^{(i)} \Delta t_k) + \Delta t_k \ln(\Delta t_k)) \\ \frac{\partial}{\partial \beta^{(i)}} \ln \mathfrak{L}(\alpha^{(i)}, \beta^{(i)}) &= \sum_{k=1}^K \left( \frac{\alpha^{(i)} \Delta t_k}{\beta^{(i)}} - \Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)} \right),\end{aligned}$$

où  $\Psi(x) = \frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)}$  est la fonction digamma.

Les estimations de  $\beta^{(i)}$  et de  $\alpha^{(i)}$  sont obtenues par résolution numérique des équations données par :

$$\hat{\beta}^{(i)} = \hat{\alpha}^{(i)} \frac{\sum_{k=1}^K \Delta t_k}{\sum_{k=1}^K \Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}} \quad (3.3)$$

$$\sum_{k=1}^K \Delta t_k \left[ \ln(\hat{\alpha}^{(i)} \frac{\sum_{k=1}^K \Delta t_k}{\sum_{k=1}^K \Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}}) + \ln(\Delta \tilde{X}_{t_k}^{(i)}) - \Psi(\hat{\alpha}^{(i)} \Delta t_k) \right] = 0. \quad (3.4)$$

Sur la base des paramètres estimés  $(\hat{\alpha}^{(i)}, \hat{\beta}^{(i)})$ , nous pouvons évaluer la fiabilité prévisionnelle/RUL qui sera utilisée pour les décisions de maintenance préventive dans cette étude. Les détails concernant ce point seront décrites dans la suite.

### 3.2.4 Dépendance d'états entre composants dans le système

La panne d'un composant non-critique ne conduit pas à une panne immédiate du système, mais si ce composant défaillant n'est pas immédiatement maintenu, il peut conduire certains autres composants à l'état de repos. Les composants placés en état de repos peuvent se détériorer d'une manière qui est différente par rapport à ceux qui sont en état de marche. Dans nos travaux, le processus de dégradation d'un composant est supposé s'arrêter lorsque il est en état de repos.

Ce phénomène introduit une dépendance d'état (de marche/panne) entre composants dans un système cohérent.

Afin de mieux comprendre, la Figure 3.3 est utilisée à titre d'exemple pour illustrer la dépendance entre composants dans le système donné sur la Figure 3.2. L'évolution de dégradation

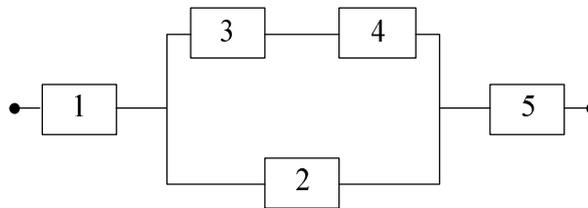


FIGURE 3.2 – Diagramme de fiabilité du système cohérent 5-composants.

du composant 4 est stoppée lorsque le composant 3 est en panne. Les composants 1, 2 et 5 sont encore en marche. Le composant 4 reste dans l'état de repos au cours de la période de panne du composant 3, tandis que le composant 2 devient le composant « critique temporaire » pendant cette période. Le processus de dégradation du composant 4 redémarre lorsque le remplacement du composant 3 est terminé (à. De même, entre l'instant de panne du composant 4 et une date de maintenance opportuniste où le système tombe en panne par exemple, l'évolution de la dégradation du composant 3 est stoppée. Les composants 1, 2 et 5 sont encore en marche. Le processus de dégradation démarre de nouveau après remplacement du composant 4 (à la date de maintenance opportuniste) et ainsi de suite.

## 3.3 Prédiction de fiabilité/RUL des composants et du système

La fiabilité est un terme général qui fait référence à la capacité d'un produit à remplir sa fonction pendant un plage de temps donnée dans des conditions prédéterminées. La fiabilité est un indicateur d'aide à la décision important dans plusieurs phases du cycle de vie, que ce soit dans la phase de conception du composant ou du système ou dans les phases opérationnelles de son cycle de vie (le développement, le test, la production et l'exploitation, par exemple). Cette section est donc consacrée à discuter principalement de l'évaluation de la fiabilité basée sur le niveau de dégradation d'un système à composants multiples avec structure complexe.

### 3.3.1 Prédiction de fiabilité au niveau du composant

#### Fiabilité basée sur le niveau de dégradation

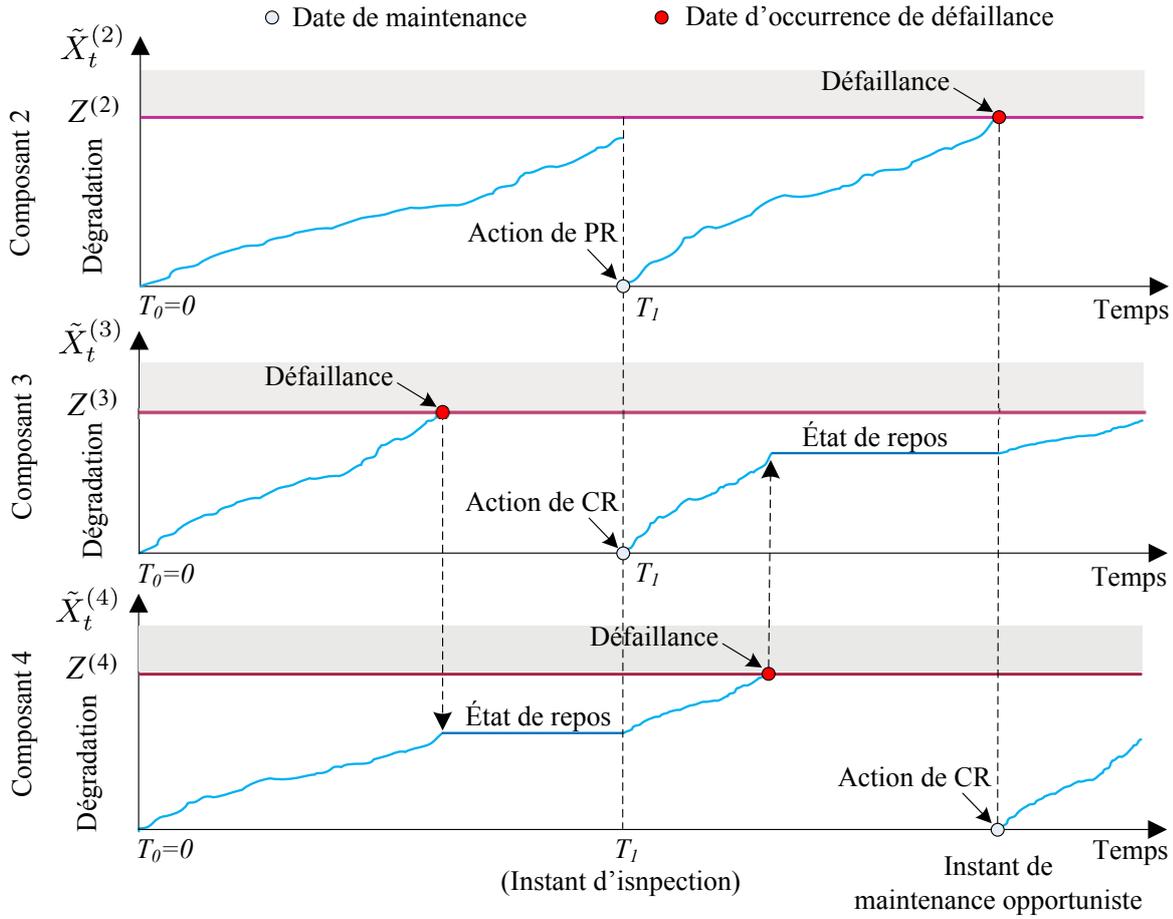


FIGURE 3.3 – Illustration de la dépendance d'états entre les composants 2, 3 et 4 du système qui est présentée dans la Figure 3.2 avec des activités de maintenance.

Comme nous avons vu, la fiabilité traditionnelle (fiabilité basée sur le temps) ne considère que deux états pour le composant/système étudié : l'état de panne et l'état de marche. Les évolutions du niveau de dégradation du composant/système au cours de son processus de fonctionnement ne sont classiquement pas prises en compte. Dans le cadre de la fiabilité conditionnelle, l'estimation de fiabilité du composant/système est mise à jour sur la base de son état de santé courant en non seulement de son âge ou de sa durée de fonctionnement [286].

Rappelons que la fiabilité  $R^{(i)}(s)$  du composant  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) se dégradant graduellement est définie comme la probabilité que le niveau de dégradation à l'instant  $s$  ( $s \geq 0$ ),  $\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}$ , est inférieur au le seuil de panne  $Z^{(i)}$  :

$$R^{(i)}(s) = \mathbb{P}(\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)} < Z^{(i)}) = 1 - \mathbb{P}(\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)} \geq Z^{(i)}) = 1 - F^{(i)}(s). \quad (3.5)$$

Pour le processus Gamma homogène,  $F^{(i)}(s)$  est calculée par :

$$F^{(i)}(s) = \frac{\Gamma(\alpha^{(i)}s, Z^{(i)}\beta^{(i)})}{\Gamma(\alpha^{(i)}s)}. \quad (3.6)$$

### Fiabilité prévisionnelle basée sur le niveau de dégradation

Supposons maintenant que le composant  $i$  est en fonctionnement à l'instant  $s$  avec un niveau de dégradation mesuré  $x_s^{(i)}$  à cet instant. La probabilité conditionnelle que le composant  $i$  survive jusqu'à l'instant  $t$  ( $t > s$ ) étant donné son niveau courant de dégradation  $x_s^{(i)}$  est déterminée comme :

$$\begin{aligned}
 R^{(i)}(t|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}) &= \mathbb{P}(\tilde{X}_t^{(i)} < Z^{(i)}|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}) = 1 - \mathbb{P}(\tilde{X}_t^{(i)} \geq Z^{(i)}|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}) \\
 &= 1 - \mathbb{P}(\tilde{X}_{t-s}^{(i)} \geq Z^{(i)} - x_s^{(i)}) = 1 - \int_{Z^{(i)} - x_s^{(i)}}^{+\infty} f_{\alpha^{(i)}(t-s), \beta^{(i)}}(x) dx \\
 &= 1 - \frac{\Gamma[\alpha^{(i)}(t-s), \beta^{(i)}(Z^{(i)} - x_s^{(i)})]}{\Gamma[\alpha^{(i)}(t-s)]}, \tag{3.7}
 \end{aligned}$$

où

$$\Gamma(y, \sigma) = \int_{\sigma}^{+\infty} x^{y-1} \exp(-x) dx, \quad \text{pour } y > 0, \tag{3.8}$$

est la fonction Gamma incomplète.

$R^{(i)}(t|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}) = R^{(i)}(t|s)$  est appelée la fiabilité conditionnelle du composant  $i$  à l'instant  $s$ . Cette grandeur correspond à l'espérance mathématique de la durée de vie conditionnelle restante (RUL conditionnelle) du composant  $i$  [177]. Par abus de langage, la RUL conditionnelle et son espérance mathématique seront assimilées dans la suite. La probabilité conditionnelle fait référence à la date de panne future étant donné un niveau actuel de dégradation [145].

### 3.3.2 Prédiction de fiabilité au niveau du système

La fiabilité du système à l'instant  $s \geq 0$ , notée  $R^S(s)$ , est définie comme la probabilité que le système fonctionne pendant l'intervalle de temps  $[0, s]$  et s'exprime par :

$$R^S(s) = \mathbb{E}[\phi(\mathbf{y})], \tag{3.9}$$

où  $\mathbb{E}[\cdot]$  désigne l'espérance mathématique. Comme mentionné dans le chapitre 2, la fonction de structure  $\phi(\mathbf{y})$  peut-être définie à partir des concepts de chemin minimal ou de coupe minimale. Sans perte de généralité, la fonction  $\phi(\mathbf{y})$  peut être donnée :

- par l'équation (2.1), qui est représentée en utilisant le concept du chemin minimal. La fiabilité du système est alors exprimée par :

$$R^S(s) = 1 - \prod_{j=1}^{np} (1 - \prod_{i \in P_j} \mathbb{E}(y^{(i)})) = 1 - \prod_{j=1}^{np} (1 - \prod_{i \in P_j} R^{(i)}(s)); \tag{3.10}$$

- par l'équation (2.2) qui est représentée en utilisant le concept de la coupe minimale. La fiabilité du système est alors exprimée :

$$R^S(s) = \prod_{j=1}^{nc} [1 - \prod_{i \in C_j} (1 - \mathbb{E}(y^{(i)}))] = \prod_{j=1}^{nc} [1 - \prod_{i \in C_j} (1 - R^{(i)}(s))], \quad (3.11)$$

Dans ce qui précède,  $R^{(i)}(s) = \mathbb{E}(y^{(i)})$  est la fiabilité du composant  $i$  qui a été donnée dans l'équation (3.5).

### Fiabilité prévisionnelle basée sur le temps

Il est maintenant supposé que le système est train de fonctionner à l'instant  $s$ . La probabilité conditionnelle que le système survive à l'instant  $t$  ( $t > s$ ) est également appelée fiabilité prévisionnelle du système. Elle peut être déterminée :

- en utilisant le concept du chemin minimal (cf. équation (3.10)) :

$$R^S(t|s) = 1 - \prod_{j=1}^{np} [1 - \prod_{i \in P_j} R^{(i)}(t|s)], \quad (3.12)$$

- en utilisant le concept de la coupe minimale (cf. 'equation (3.11)) :

$$R^S(t|s) = \prod_{j=1}^{nc} \{1 - \prod_{i \in C_j} [1 - R^{(i)}(t|s)]\}. \quad (3.13)$$

Dans ce qui précède,  $R^{(i)}(t|s)$  désigne la fiabilité prévisionnelle du composant  $i$ .

### Fiabilité prévisionnelle basée sur le niveau de dégradation

Si le niveau de dégradation du composant  $i$  est mesuré à l'instant  $s$ ,  $\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)}$ ,  $R^{(i)}(t|s) = R^{(i)}(t|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)})$  est ensuite prévue comme dans l'équation (3.7). Finalement, la fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle du système à l'instant  $t$  peut-être estimée si son état de santé global à l'instant  $s$  est disponible. Soit  $\mathbf{X}_s^{(1:n)} = (\tilde{X}_s^{(1)}, \tilde{X}_s^{(2)}, \dots, \tilde{X}_s^{(n)})$  est le vecteur caractérisant l'état de dégradation global du système à l'instant  $s$ , sa fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle à l'instant  $t$  étant donné  $\mathbf{X}_s^{(1:n)} = \mathbf{x}_s^{(1:n)} = (x_s^{(1)}, x_s^{(2)}, \dots, x_s^{(n)})$  est alors déterminée

- en utilisant le concept du chemin minimal (cf. l'équation (3.10)) :

$$R^S(t|\mathbf{X}_s^{(1:n)} = \mathbf{x}_s^{(1:n)}) = 1 - \prod_{j=1}^{np} [1 - \prod_{i \in P_j} R^{(i)}(t|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)})], \quad (3.14)$$

- en utilisant le concept de la coupe minimale (cf. l'équation (3.11)) :

$$R^S(t|\mathbf{X}_s^{(1:n)} = \mathbf{x}_s^{(1:n)}) = \prod_{j=1}^{nc} [1 - \prod_{i \in C_j} [1 - R^{(i)}(t|\tilde{X}_s^{(i)} = x_s^{(i)})]]. \quad (3.15)$$

Les fiabilités prévisionnelles/RUL conditionnelles du système et de ses composants sont des indicateurs importants qui seront utilisés pour construire les règles de décision des stratégies de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange dans les chapitres suivants.

## 3.4 Interventions et structures des coûts

### 3.4.1 Opération d'inspection

En pratique, les pannes produisent souvent des phénomènes anormaux dans le comportement d'une entité après une phase de dégradation graduelle. Lorsqu'il s'agit de systèmes de production, ces phénomènes peuvent relever d'une diminution de la qualité ou d'une réduction de la quantité des produits. Un dysfonctionnement plus marqué ou l'arrêt intempestif de fonctionnement du système, peuvent également survenir. Aujourd'hui, le fort développement des techniques de détection et d'isolation de défaillances couplées aux technologies microélectroniques permet de fabriquer des capteurs intelligents. Les défaillances et leurs instants d'apparition sont faciles à identifier sur une entité sans besoin d'intervention [149]. Il est alors raisonnable de supposer que l'instant de défaillance est immédiatement détecté dès qu'un composant tombe en panne, sans nécessité d'intervention. La défaillance est alors dite « auto-décelable ».

Dans cette étude, on suppose que si un composant n'est pas encore tombé en panne, son état courant, entre l'état « neuf » et l'état « défaillant », est masqué. Cela signifie ici que la mise à disposition du niveau réel de dégradation ne peut être obtenu sur un composant donné que par le biais d'une opération d'inspection. Cette opération est intégrée à l'ensemble des tâches nécessaires avant la prise de décision de maintenance dans un programme de maintenance conditionnelle [151].

L'état de santé courant permet de mettre à jour la fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle de chaque composant ainsi que du système afin d'optimiser la planification de maintenance et des activités associées à stratégie de maintenance conditionnelle [305, 125]. Comme mentionné dans la section 2.3 du chapitre 2, l'opération d'inspection dans cette thèse est assimilée à la surveillance discrète. Dans le cadre de la surveillance discrète, la planification des inspections peut être de type périodique ou apériodique.

- Pour l'inspection périodique, l'intervalle de temps constant entre deux dates d'inspection successives est une variable de décision à optimiser (voir les modèles de maintenance conditionnelle par exemple dans [139, 20, 308, 293, 215, 96]);
- Pour l'inspection apériodique, la date d'inspection à venir doit être déterminée sur la base de l'état de santé du composant à l'instant d'inspection courant (voir [124, 32, 306, 125, 74, 118, 119, 56, 22]).

La mise en œuvre d'inspections apériodiques peut-être assez complexe, notamment pour des

systèmes avec un grand nombre de composants. L'inspection périodique est plus simple et de mise en  $\frac{1}{2}$ uvre opérationnelle plus facile en pratique. Ce type d'inspection est donc choisi dans la suite de la thèse.

Le système à maintenir, à composants multiples et à structure complexe, est donc régulièrement inspecté sur l'ensemble  $S_D$  de composants. Les inspections ont lieu aux instants  $T_k = kT$ , où  $T$  est l'intervalle d'inter-inspection (ou le cycle d'inspection),  $k \in \mathbb{N}$  et  $T_0 = 0$ . De plus, les opérations d'inspection sont supposées instantanées, parfaites et non destructives. Pour chaque composant survivant, une inspection génère un coût  $c_{ins}$ .

### 3.4.2 Opérations de maintenance

Les actions de maintenance, correctives ou préventives, permettent de restaurer complètement un composant vers son état initial. Le niveau de dégradation du composant après une action de maintenance est supposé être remis à zéro. Au niveau du composant, la maintenance de ce type est appelée la « maintenance parfaite » ou « as good as new ». Cependant, au niveau du système, elle est encore imparfaite sauf si tous les composants du système sont remplacés en même temps.

#### Durée de maintenance

Concernant la durée de maintenance, chaque action de maintenance nécessite en pratique une certaine durée d'intervention. Néanmoins dans certaines configurations cette durée est faible par rapport à l'intervalle inter-inspections  $T$ . La durée de maintenance (corrective et préventive) est donc considérée dans la suite comme négligeable. Dans cette partie, il est également supposé que les ressources nécessaires à la maintenance (telles que les pièces de rechange de tous les composants, les outils de maintenance, les équipes techniques, etc.) sont toujours disponibles aux dates planifiées.

#### Coût lié au remplacement correctif urgent du composant $i$

Hors des instants d'inspection planifiés, si le composant  $i$  doit cependant être immédiatement remplacé dès qu'il tombe en panne, un bon de commande urgent de pièce de rechange pour ce composant est alors nécessaire. Le délai de livraison reste considéré comme négligeable, mais un coût complémentaire lié aux ressources de maintenance, noté  $c_e^{(i)}$  et appelé « coût de commande urgente du composant  $i$  » est pris en compte. Ce coût peut-être très élevé et prendre une partie significative du coût total de maintenance [184, 228]. Au contraire, si le remplacement d'un composant défaillant est planifié à la prochaine date d'inspection ou lors d'une maintenance corrective opportuniste (CMO), les ressources de maintenance sont prépa-

rées dans des conditions favorables et le coût  $c_e^{(i)}$  n'est pas donc encouru. Les aspects liés à la CMO seront présentés plus en détails dans le chapitre 4).

### Coût lié à l'arrêt planifié du système

Quand le système est en fonctionnement, une intervention pour remplacer préventivement un composant ou un groupe de composants spécifiques peut conduire à un arrêt. Les interventions de maintenance préventive sont la plupart du temps planifiées. Un arrêt du système lié aux interventions est donc appelé « arrêt planifié » du système. Cet arrêt peut générer un coût, noté  $c_{psd}$ , potentiellement très élevé même lorsque sa durée est négligeable. En effet, un arrêt du système peut conduire [109, 272] :

- à la perte de la fonction principale du système (production, sécurité, etc.),
- au coût de redémarrage du système (incluant par exemple le coût du combustible pour redémarrer la chaudière et la turbine dans une centrale thermique),
- à une perte transitoire de qualité des produits ou de qualité de services,
- à la combinaison de plusieurs des problèmes précédents.

En pratique, pour de nombreux systèmes tels que des systèmes de production et de transmission d'énergie, des systèmes de télécommunication, des centres de données, etc., le coût d'arrêt planifié du système peut-être très élevé même si la durée d'arrêt est très faible. Par exemple, un centre de données encourt un coût d'arrêt de \$300,000 par heure [258]. De même, l'arrêt d'une ligne de raffinerie de pétrole de Dung Quat (au centre du Vietnam) dont la capacité est de 6.5 millions de tonnes par an induit une perte de l'ordre de 224 dollars par tonne soit 4 millions de dollars par jour. Ce coût peut conduire à une augmentation significative du coût de maintenance global si un programme de maintenance inefficace est mis en  $\frac{1}{2}$ uvre.

### Coût lié à l'arrêt non-planifié du système

Lorsqu'un système tombe en panne (c-à-d. lorsque la panne d'un composant critique ou critique temporaire se produit), un coût d'arrêt non-planifié, noté  $c_{usd}$ , est encouru. Généralement,  $c_{usd} \geq c_{psd}$ . Si le système défaillant reste à l'état de panne, il est nécessaire de prendre en compte un coût supplémentaire pour chaque unité de temps. Ce coût est appelé « taux de coût d'indisponibilité » et noté  $c_d$ .

À partir des différents coûts unitaires évoqués précédemment, les structures des coûts appliquées dans cette étude sont détaillées ci-après.

### Coût du remplacement préventif effectué sur le composant $i$

Pour un remplacement préventif sur le composant  $i$  à l'instant  $t$ , un coût de remplacement

préventif, noté  $C_p^{(i)}$ , est encouru :

$$C_p^{(i)} = c_p^{(i)} + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}, \quad (3.16)$$

où :

- $c_p^{(i)}$  est le coût spécifique du remplacement préventif du composant  $i$  (y compris le coût de pièce de rechange) ;
- $c_{ms}$  est le coût de mise en œuvre qui doit être payé pour les tâches de préparation de maintenance lorsqu'une action de maintenance est effectuée. Il faut noter que ce coût peut être partagé lorsque plusieurs composants sont maintenus en même temps ;
- $\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}$  est la fonction indicatrice signifiant, lorsque le système est arrêté pour le remplacement préventif du composant  $i$  que :

$$\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ est critique ou critique temporaire ;} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est non-critique.} \end{cases}$$

### Coût du remplacement correctif effectué sur le composant $i$

De même, pour un remplacement correctif sur le composant défaillant  $i$  à l'instant  $t$  étant donné qu'il est tombé en panne à l'instant  $\tau^{(i)}$  (où  $0 < \tau^{(i)} \leq t$ ), le coût de remplacement correctif noté  $C_c^{(i)}$  est donné par :

$$C_c^{(i)} = c_c^{(i)} + c_{ms} + c_e^{(i)} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} + [c_{usd} + c_d (t - \tau^S)] \mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau^S\}}, \quad (3.17)$$

où :

- $c_c^{(i)}$  est le coût spécifique du remplacement correctif (y compris le coût des pièces de rechange). Une panne peut avoir des conséquences désastreuses, à cause de la non planification de l'intervention mais aussi par exemple par son impact sur l'environnement ou sur l'humain. C'est pourquoi il est généralement supposé que  $c_c^{(i)} \geq c_p^{(i)}$  ;
- $\tau^S$  est la date de panne du système ;
- $\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}}$  et  $\mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau^S\}}$  sont les fonctions indicatrices et définies comme suit :

$$\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant critique } i \text{ doit être correctivement immédiatement} \\ & \text{remplacé dès qu'il tombe en panne ;} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

et

$$\mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau^S\}} = \begin{cases} 1 & \text{si } \tau^{(i)} = \tau^S, \text{ ce qui signifie que la panne du système est due à celle} \\ & \text{du composant } i ; \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

### Coût du remplacement préventif effectué sur le groupe $G_l$

Comme nous l'avons dit ci-dessus, le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$  peut être partagé lorsque plusieurs actions de maintenance (corrective et/ou préventive) sont effectués en même temps. La mise en  $\frac{1}{2}$ uvre d'un remplacement préventif sur le groupe  $G_l$  constitué de  $|G_l|$  composants ( $1 \leq |G_l| \leq n$ ) engendre un coût qui est noté  $C_p^{(G_l)}$ . Il est formulé par :

$$C_p^{(G_l)} = \sum_{i \in G_l} C_p^{(i)} - \underbrace{c_{ms} (|G_l| - 1)}_{\text{profit économique : PED}} - \underbrace{c_{psd} \left( \sum_{i \in G_l} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_l \text{ est un groupe critique}\}} \right)}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé : PED ou NED}} \quad (3.18)$$

où :

- la deuxième partie sur le côté droit de l'équation (3.18) représente les coûts de mise en œuvre économisés dus à la dépendance économique positive (PED) entre composants ( $c_{ms}$  imputé une fois) ;
- la troisième partie peut être positive ou négative. Elle est positive et représente la dépendance économique positive si le groupe  $G_l$  contient plus d'un composant critique ou composant critique temporaire. Si le groupe  $G_l$  est un groupe critique mais ses composants sont non-critiques, cette troisième partie est négative. Elle représente alors la dépendance économique négative (NED). Il est important de noter ici que la troisième partie n'existe pas dans les systèmes multi-composants à structure séries car tous les composants d'un système à structure série sont critiques.

## 3.5 Conclusion

Les modèles physiques sont des modèles de connaissance qui permettent de représenter les évolutions des phénomènes physiques par des expressions mathématiques. Les modèles de survie décrivent le comportement des instants de pannes et sont plus simples à mettre en place, mais ne permettent pas de décrire l'évolution de l'état de santé de l'entité au cours du temps. Par comparaison, les modèles de détérioration stochastiques continus semblent constituer un compromis entre facilité de mise en place et flexibilité de modélisation. Ils permettent de décrire le comportement de dégradation d'une entité entre sa mise en service et sa date de défaillance. Un avantage particulier du modèle de détérioration choisi réside dans la possibilité qu'il offre de remettre à jour la fiabilité prévisionnelle ou d'évaluer la RUL conditionnelle des composants ainsi que du système à chaque fois que les nouvelles valeurs de dégradation sont disponibles. De plus, les structures de coûts d'interventions proposées sur le système dans les différentes situations de maintenance (sur chaque composant individuellement or sur un groupe de composants) permettent de tenir compte de l'importance des composants et des dépendances économiques

dans un objectif de renforcement des effets positifs de ces éléments.

Sur la base des éléments présentés précédemment, des modèles de maintenance prévisionnelle efficaces et appropriés au système étudié seront développés dans les chapitres suivants de cette thèse.

## **Chapitre 4**

# **Stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum et maintenance corrective groupée**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre consiste à proposer une nouvelle stratégie de maintenance prévisionnelle qui se base sur des informations de surveillance disponibles pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. La notion de complexité inclut ici l'impact que peut avoir la panne d'un composant sur l'évolution de dégradation d'autres composants en fonction de leur positionnement dans la structure du système. Deux composants en redondance active qui assurent conjointement une fonction en configuration nominale peuvent avoir une influence l'un sur l'autre. Afin de sélectionner les composants du système pour la maintenance préventive, des règles de décision sont construites en s'appuyant à la fois sur le facteur d'importance structurel de chaque composant et sur sa fiabilité prévisionnelle ou sa RUL conditionnelle.

Les activités de maintenance corrective envisagées dans la suite peuvent être classées en deux types : la « maintenance corrective retardée » qui est effectuée aux dates d'inspections postérieures à la panne et la « maintenance corrective groupée » qui est effectuée immédiatement aux instants de panne du système. Pour cette dernière, une procédure de décisions est proposée pour le remplacement correctif des composants défectueux. Elle prend en compte simultanément l'importance de chaque composant et les contraintes liées au soutien logistique.

En outre, les dépendances économiques et les dépendances d'états (marche/panne) entre composants dans le système sont étudiées et intégrées dans la prise de décision de maintenance.

Un système cohérent de 12 composants est finalement introduit afin d'illustrer l'utilisation et l'efficacité de la stratégie de maintenance prévisionnelle proposée. La stratégie proposée a pour objectif d'offrir plus de flexibilité dans la prise de décision de maintenance. Elle doit permettre de réaliser des économies significatives en terme de coût de maintenance par rapport aux stratégies existantes.

La suite de ce chapitre est organisée de la manière suivante. La section 4.2 est consacrée à l'analyse de la structure du système étudié à l'aide du facteur d'importance structurel de Birnbaum. Les règles de décision de maintenance correspondant à la stratégie proposée, dans laquelle la maintenance préventive est basée sur le facteur d'importance structurel et la maintenance corrective groupée est basée sur l'exploitation des opportunités de maintenance, sont présentées dans la section 4.3. D'après la structure de décision proposée dans la section 4.3, un modèle mathématique du coût global de maintenance ainsi qu'une procédure de simulation numérique sont élaborés dans la section 4.4. Ils permettent d'évaluer et d'optimiser la performance de cette stratégie. Ensuite, pour illustrer l'utilisation et les avantages de la stratégie de maintenance proposée, un système cohérent de 12 composants est considéré dans la section 4.5. Quelques résultats numériques associés à des études de sensibilité sont également présentés ici. Enfin, la section 4.6 présente quelques conclusions issues de l'étude de ce chapitre.

## 4.2 Analyse de structure complexe par le facteur d'importance de Birnbaum

Comme nous l'avons mentionné dans la sous-section 2.2.2, la mesure d'importance structurelle d'un composant, également appelée facteur d'importance structurel ou mesure de Birnbaum, dépend de la structure du système et de l'emplacement du composant dans cette structure. Ce facteur sera intégré à la prise de décision de maintenance préventive dans ce chapitre. Ce paragraphe est consacré essentiellement à décrire le facteur d'importance structurel.

**Définition 12** : *Facteur d'importance structurel, noté  $I_B^{(i)}$ , d'un composant mesure la probabilité que une panne du composant conduit à une panne du système à l'instant donné.*

Il convient de noter que le facteur de l'importance structurel a été et appliqué successivement pour des buts divers [170, 153]. Récemment, une extension de la mesure de Birnbaum appelée « Differential Importance Measure (DIM) » [41, 94] a été proposée. En fait, la DIM a été conçue pour aborder la sensibilité du système par rapport aux caractéristiques de probabilités de défaillance des composants. Dans le cas de changements uniformes sur les probabilités de panne des composants, la mesure de Birnbaum est un cas particulier de la DIM.

Le facteur d'importance structurel exprime la proportion relative des vecteurs d'état pour

### 4.3. Stratégie par l'utilisation de facteur de Birnbaum avec maintenance corrective groupée

lesquels le composant  $i$  est critique par rapport aux  $2^{n-1}$  valeurs possibles du vecteur d'état du système [220],  $n$  étant le nombre de composants le constituant. Le composant  $i$  est considéré comme critique pour une configuration donnée du vecteur d'état si un changement dans la valeur de  $y^{(i)}$  conduit à un changement de la valeur de la fonction de structure du système  $\phi(\mathbf{y})$ . Le facteur  $I_B^{(i)}$  est donc déterminé pour le composant  $i$  comme suit :

$$I_B^{(i)} = \frac{\eta_\phi(i)}{2^{n-1}}, \quad (4.1)$$

où :

- $\eta_\phi(i)$  est le nombre total de vecteurs d'état pour lesquels le composant  $i$  est critique, c'est-à-dire

$$\eta_\phi(i) = \sum_{(i, \mathbf{y})} [\phi(1_i, \mathbf{y}) - \phi(0_i, \mathbf{y})] \quad (4.2)$$

(d'où  $1 \leq \eta_\phi(i) \leq 2^{n-1}$ );

- $(\cdot, \mathbf{y})$  représente les  $2^{n-1}$  valeurs possibles du vecteur d'état lorsque l'état du composant  $i$  est fixé.

À titre d'exemple, on reprend le système à 5 composants présenté dans la figure 3.2 du chapitre 3. Selon cette structure du système, les composants 1 et 5 sont des composants critiques. Ils sont donc plus importants que les composants 2, 3 ou 4 qui sont non-critiques. En outre, le composant 2 est plus important que les composants 3 et 4, car si les composants 1 et 5 sont encore en marche, le composant 2 peut devenir un composant critique lorsque seulement le composant 3 ou le composant 4 est en panne. Ce classement suivant l'importance des composants peut également être obtenu selon les valeurs des mesures d'importance structurelle qui sont rapportées dans le tableau 4.1. La mesure d'importance structurelle  $I_B^{(i)}$  est considérée dans la prise de

TABLE 4.1 – Valeurs de mesure d'importance structurelle de composants.

| Component   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $I_B^{(i)}$ | 0.3125 | 0.1875 | 0.0625 | 0.0625 | 0.3125 |

décision de maintenance préventive qui sera décrite dans la section suivante de ce chapitre.

### 4.3 Stratégie de maintenance prévisionnelle par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum avec maintenance corrective groupée : stratégie $(T, R_p^{(i)})$

Tous les composants survivants de l'ensemble  $S_D \subset \Omega$  sont régulièrement inspectés aux dates  $T_k$  ( $k \in \mathbb{N}$  et  $T_0 = 0$ ) avec un intervalle d'inter-inspection  $T$ . Ce paramètre constitue

la première variable de décision de maintenance à optimiser dans cette stratégie. Grâce aux opérations d'inspection, le niveau de dégradation de chaque composant peut être mesuré. Plus précisément, à une date d'inspection  $T_k = kT$ , le niveau de dégradation  $X_{T_k}^{(i)} = x_{T_k}^{(i)}$  est obtenu pour chaque composant survivant  $i \in S_D$ .

Rappelons que la panne d'un composant est auto-décelable, donc instantanément révélée à son instant d'occurrence. L'idée principale de la stratégie de maintenance proposée est la suivante :

- Opérations de remplacement correctif : un composant non-critique défaillant  $i$  ne peut être remplacé correctivement qu'à des instants d'opportunités de maintenance. Les opportunités sont des dates d'inspection ou des dates auxquelles la panne du composant  $j \neq i$  implique l'arrêt du système (le composant  $j$  est soit critique soit critique temporaire). Chaque fois que le système tombe en panne à cause de la panne d'un composant critique, ce composant critique est immédiatement remplacé ainsi que les autres composants défaillants à cet instant (composants non-critique en panne). Lorsque la panne du système est consécutive à la panne d'un composant critique temporaire, le remplacement correctif n'est effectué que sur les composant antérieurement en panne (composants non-critique défaillants). Le composant critique temporaire défaillant est retenu afin d'attendre l'arrivée de la prochaine opportunité ;
- Opérations de remplacement préventif : un remplacement préventif ne peut être effectué qu'aux dates d'inspections. Afin de déterminer la liste des composants à remplacer préventivement, on utilise les règles de décisions qui seront précisées ci-après. Elles prennent en compte à la fois le facteur d'importance structurel  $I_B^{(i)}$  et la fiabilité prévisionnelle  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k)$  estimée à l'instant  $T_k$  pour les composants survivants.

Cette stratégie est une combinaison des deux sous-stratégies : (i) la sous-stratégie de maintenance corrective basée sur les opportunités (ou maintenance corrective groupée) et (ii) la sous-stratégie de maintenance préventive basée sur le facteur d'importance structurel et la fiabilité prévisionnelle. Elles sont présentées successivement dans les sous-sections suivantes.

### 4.3.1 Stratégie de maintenance corrective groupée basée sur les opportunités de maintenance : sous-stratégie O

La sous-stratégie de maintenance corrective basée sur les opportunités d'action est appelée « sous-stratégie O ». Le but de cette stratégie est :

- d'éviter des commandes urgentes de composants non-critiques ou critique temporaires défaillants qui ont un impact peu important sur le fonctionnement du système ;
- de grouper des composants défaillants à remplacer en même temps (opération de maintenance corrective groupée) afin d'économiser des coûts de mise en œuvre  $c_{ms}$ .

Une telle stratégie de remplacement correctif est déterminée comme suit :

- Si un *composant non-critique* tombe en panne, on le laisse en l'état étant donné que cette panne n'affecte pas le fonctionnement du système. Ceci permet une préparation économe complémentaire (non-urgente) des ressources de maintenance. Ce composant sera remplacé correctivement dès la prochaine opportunité ;
- Si un *composant critique temporaire*  $i$  tombe en panne, il cause l'arrêt du système. Ceci constitue une opportunité de maintenance pour remplacer tous les composants non-critiques précédemment défectueux (et pour lesquels les ressources de maintenance ont donc été préparées). Grâce à ce remplacement des composants non-critiques défectueux, la panne du système est traitée et le composant  $i$  redevient non-critique. On peut donc le laisser en état de panne pour éviter un coût de demande urgente ;
- Si un *composant critique* tombe en panne, cela cause également l'arrêt du système. On doit remplacer immédiatement ce composant pour que le système puisse continuer à fonctionner. Cette opération encourt un coût de demande urgente supplémentaire  $c_e^{(i)}$ . La panne du système constitue une opportunité pour remplacer les composants non-critiques défectueux précédents.

Les instants d'inspection sont aussi considérés comme des instants d'opportunités de maintenance corrective. À ces dates, on remplace les composants non-critiques défectueux (maintenance corrective retardée) s'ils ne sont pas encore remplacés précédemment. Il est important de noter que, à chaque date d'inspection, plusieurs composants survivants peuvent être remplacés préventivement selon des règles du remplacement préventif qui seront présentées dans la section suivante.

### 4.3.2 Stratégie de maintenance préventive basée sur le facteur d'importance structurel : sous-stratégie IB

Le facteur d'importance structurel peut fournir une évaluation de l'importance des composants vis à vis de la structure du système. Il permet donc leur hiérarchisation. Cependant, ce facteur ne peut pas prendre en compte leur fiabilité. Ainsi, dans cette sous-stratégie, on est amené à considérer conjointement le facteur d'importance structurel de chaque composant et sa fiabilité prévisionnelle estimée aux dates d'inspection. Sur la base de ces deux indicateurs, il est possible de construire des règles de décision de remplacement préventif. Ces règles vont permettre de sélectionner les composants survivants à remplacer préventivement. Un seuil limite de fiabilité, noté  $R_p^{(i)}$  avec  $0 \leq R_p^{(i)} \leq 1$ , est introduit pour chaque composant  $i$  du système. Plus précisément, à la date d'inspection  $T_k = kT$ , la fiabilité prévisionnelle de tous les composants survivants dans le système est évaluée. Les règles de décision suivantes sont appliquées :

- si  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}$ , le composant  $i$  est préventivement remplacé ;

○ si  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) > R_p^{(i)}$ , aucune action de maintenance n'est effectuée sur le composant  $i$ . Le seuil du remplacement préventif  $R_p^{(i)}$  du composant  $i$  est fixé à l'aide du facteur d'importance de Birnbaum. Il s'exprime sous la forme :

$$R_p^{(i)} = \min(\Phi_p(I_B^{(i)}), 1). \quad (4.3)$$

où la fonction  $\Phi_p(I_B^{(i)})$  est supposée linéaire par rapport à  $I_B^{(i)}$ . La fonction  $\Phi_p(I_B^{(i)})$  dans l'équation (4.3) est choisie sous la forme :

$$\Phi_p(I_B^{(i)}) = \omega_p I_B^{(i)} \text{ avec } 0 \leq \omega_p \leq \frac{1}{\min_{i=1,\dots,n} (I_B^{(i)})}. \quad (4.4)$$

Le coefficient  $\omega_p$  est donc unique pour tous les composants du système.  $I_B^{(i)}$  est le facteur d'importance structurel du composant  $i$ , calculé à partir de l'équation (4.1). Il ne dépend que de la configuration (ou structure) du système et est inchangé aux dates d'inspection car à ces dates l'ensemble des composants défaillants est remplacé.

Le paramètre  $\omega_p$  est la deuxième variable de décision de la stratégie de maintenance prévisionnelle proposée. Le seuil optimal du remplacement préventif  $R_p^{(i)*}$  pour chaque composant  $i$  peut donc être déterminé à partir de la valeur optimale  $\omega_p^*$  déterminée par optimisation du critère.

La stratégie de maintenance prévisionnelle proposée avec deux variables de décision est appelée la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . Afin d'évaluer et d'optimiser la performance économique de cette stratégie, un modèle mathématique de coût de maintenance est construit et présenté dans la section 4.4.

Pour mieux faciliter dans la comparaison de performances entre la stratégie de maintenance proposée et des stratégies alternatives, cette stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est aussi appelée la «stratégie IB-O». Les lettres «IB» et «O» indiquent respectivement la mise en place des opérations de maintenance préventive basées sur le facteur d'importance structurel et des opérations de maintenance corrective groupée basées sur les opportunités.

## 4.4 Optimisation de la stratégie de maintenance proposée

Le but de cette section vise à développer un modèle mathématique permettant d'évaluer et d'optimiser les performances de la stratégie de maintenance proposée.

### 4.4.1 Critère de performance économique

On utilise le coût moyen asymptotique comme critère d'évaluation. Soit  $C(u_t)$  la fonction de coût de maintenance du système entier cumulé 'a l'usage  $u_t$  correspondant à l'instant  $t$ . Le

coût moyen asymptotique peut être défini généralement comme :

$$C_{\infty}(T, R_p^{(i)}) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[C(u_t)]}{u_t}. \quad (4.5)$$

Selon la théorie de renouvellement [224] et par application du théorème de renouvellement [255], l'équation (4.5) peut être réécrite comme suit :

$$C_{\infty}(T, R_p^{(i)}) = \frac{E[C(H)]}{E[H]}, \quad (4.6)$$

où,  $H$  est la longueur du premier cycle de renouvellement, c-à-d. du premier cycle de vie du système complet jusqu'à sa remise à l'état neuf. Pour illustrer la façon de calculer le coût moyen asymptotique  $C_{\infty}(T, R_p^{(i)})$ , on suppose que le système est complètement remplacé à l'instant  $H = T_{rem}$ . Cela signifie que tous les composants du système sont remplacés à l'instant  $T_{rem}$ . Remarquons que la preuve d'existence de cet instant est difficile et reste à élaborer d'un point de vue théorique.

Soit  $N_b$  le nombre total de cycles d'inspection réalisés pendant la première mission du système. Le coût moyen asymptotique est déterminé par :

$$C_{\infty}(T, R_p^{(i)}) = \frac{E[\sum_{k=1}^{N_b} C_k]}{E[T_{rem} - D(T_{rem})]}, \quad (4.7)$$

où  $C_k$  est le coût total du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection  $(T_{k-1}, T_k]$ , incluant les coûts de remplacements correctifs et/ou préventifs, de mise en œuvre de maintenance, d'inspection, de commande urgente, d'arrêt planifié et/ou non-planifié du système).  $D(T_{rem})$  est le temps total d'indisponibilité cumulée du système 'a l'instant  $T_{rem}$ .

#### 4.4.2 Modèle mathématique d'évaluation de maintenance

Le coût total du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection s'exprime comme suit :

$$C_k = C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr} + C_k^{corr} + C_k^{prev} + C_k^{insp}, \quad (4.8)$$

où :

- $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr}$  est le coût cumulé associé aux actions de remplacement correctif, de mise en œuvre, de commande urgente et à l'arrêt non-planifié du système pendant l'intervalle de temps  $(T_{k-1}, T_k)$ . Pendant cet intervalle, toutes les actions de remplacement correctif sont effectuées aux dates d'opportunité de maintenance ;
- $C_k^{corr}$  est le coût associé aux actions de remplacement correctif qui sont effectuées à l'instant d'inspection  $T_k$  ;
- $C_k^{prev}$  est le coût associé aux activités de remplacement préventif et à l'arrêt planifié du système à l'instant d'inspection  $T_k$  ;

- $C_k^{insp}$  est le coût associé aux activités d'inspection sur les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  à l'instant d'inspection  $T_k$ .

Avant de construire les coûts partiels du modèle, les notations complémentaires suivantes sont introduites :

- $M_k \in \mathbb{N}$  est le nombre total de pannes du système pendant l'intervalle de temps  $(T_{k-1}, T_k]$  ( $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection).  $M_k = 0$  signifie que le système n'a aucune défaillance dans cet intervalle ;
- $\tau_{k,j}^S$ , avec  $1 \leq j \leq M_k$ , représente le  $j^{\text{ème}}$  instant de panne du système (instant de panne d'un composant critique ou critique temporaire) dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection si  $M_k \neq 0$ . Si  $M_k = 0$ ,  $\tau_{k,q}^S = \emptyset$  (c-à-d. que  $\tau_{k,q}^S$  n'existe pas) ;
- $i_{\tau_{k,j}^S}$  est l'indice du composant dont la panne cause à l'arrêt du système à l'instant  $\tau_{k,j}^S$  (c-à-d. le composant qui tombe en panne à l'instant  $\tau_{k,j}^S$ , c-à-d.  $\tau^{(i)} = \tau_{k,j}^S$ ) ;
- $S_{k,j}$ , avec  $j = 1, \dots, M_k + 1$ , est l'ensemble de tous les composants dans l'état de panne aux instants  $\tau_{k,j}^S$ , avec  $j = 1, \dots, M_k$ , et  $T_k$  (cf. figure 4.1).  $S_{k,j}$  est donc appelé  $j^{\text{ème}}$  ensemble défaillant dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection ;
- $|S|$  est le cardinal de l'ensemble  $S$ .

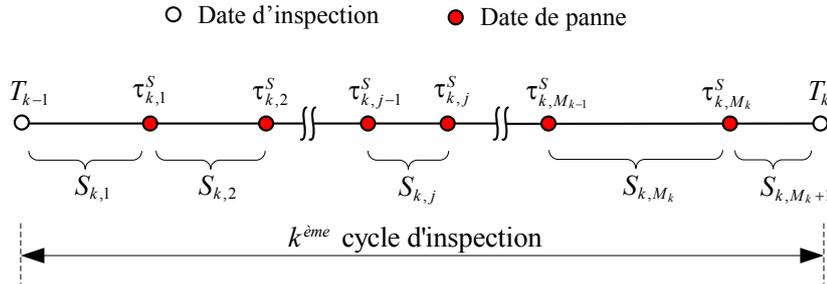


FIGURE 4.1 – Illustration de la sous-stratégie de maintenance corrective basée sur les opportunités du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection.

### Coût du remplacement correctif pendant l'intervalle $(T_{k-1}, T_k)$ , $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr}$

Selon la stratégie proposée, les ensembles « défaillants »  $S_{k,1}, \dots, S_{k,M_k}$  et  $S_{k,M_k+1}$  sont remplacés correctivement respectivement aux instants  $\tau_{k,1}^S, \dots, \tau_{k,M_k}^S$  (sauf le composant  $i_{\tau_{k,j}^S}$  à l'instant  $\tau_{k,j}^S$  si il est le composant critique temporaire) et à l'instant  $T_k$ . Le remplacement d'un ensemble défaillant engage seulement un coût unitaire de mise en œuvre  $c_{ms}$ . Le coût  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr}$  comprend les coûts de remplacement correctif, de mise en œuvre, de commande urgente et d'arrêt non-planifié du système sur les ensembles défaillants  $S_{k,1}, \dots, S_{k,M_k}$ . Il faut noter que chaque fois le système est restauré immédiatement à chaque défaillance. En conséquence  $D(T_{rem}) = 0$  et le taux de coût d'indisponibilité  $c_d$  n'intervient pas dans ce modèle. Finalement,

si le système ne tombe pas en panne entre  $T_{k-1}$  et  $T_k$  (c-à-d.  $M_k = 0$ ), alors  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr} = 0$ . Sinon,  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr}$  est formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
 C_{(T_{k-1}, T_k)}^{corr} = & \sum_{j=1}^{M_k} \left[ \underbrace{\mathcal{I}_{\{i_{\tau_{k,j}^S} \text{ est critique}\}} [c_e^{(i_{\tau_{k,j}^S})} + \sum_{i \in S_{k,j}} (c_c^{(i)} + c_{ms})]}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k,j}} + \underbrace{\mathcal{I}_{\{i_{\tau_{k,j}^S} \text{ est criti. temporaire}\}} \sum_{i \in S_{k,j} \setminus \{i_{\tau_{k,j}^S}\}} (c_c^{(i)} + c_{ms})}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k,j} \text{ sauf le composant } i_{\tau_{k,j}^S}} \right. \\
 & \left. + c_{usd} - \underbrace{c_{ms} [ |S_{k,j}| - (1 + \mathcal{I}_{\{i_{\tau_{k,j}^S} \text{ criti. temporaire}\}})]}_{\text{profit économique aux dates de panne } \tau_{k,j}^S : \text{PED}} \right], \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

où,  $S_{k,j} \setminus \{i_{\tau_{k,j}^S}\}$  est l'ensemble défaillant  $S_{k,j}$  privé du composant  $i_{\tau_{k,j}^S}$ .

#### Coût du remplacement correctif à l'instant $T_k$ , $C_k^{corr}$

À l'instant  $T_k$ , tous les composants non-critiques défaillants de l'ensemble  $S_{k, M_k+1}$  sont remplacés correctivement. Dans ce cas, le coût de commande urgente  $c_e^{(i)}$  et le coût d'arrêt non-planifié du système  $c_{usd}$  ne sont pas engendrés. Par conséquent,

- si l'ensemble  $S_{k, M_k+1} \neq \emptyset$ , le coût du remplacement correctif  $C_k^{corr}$  à  $T_k$  est :

$$\begin{aligned}
 C_k^{corr} = & \underbrace{\sum_{i \in S_{k, M_k+1}} (c_c^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{i \in S_{k, M_k+1}\}}}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k, M_k+1}} - \underbrace{c_{ms} (|S_{k, M_k+1}| - 1)}_{\text{profit économique à } T_k : \text{PED}}; \quad (4.10)
 \end{aligned}$$

- sinon  $C_k^{corr} = 0$ .

#### Coût d'inspection à l'instant $T_k$ , $C_k^{insp}$

À l'instant  $T_k$ , l'opération d'inspection n'est effectuée que sur les composant survivants de l'ensemble  $S_D$ . Le coût d'inspection  $C_k^{insp}$  à l'instant  $T_k$  est alors calculé par :

$$C_k^{insp} = c_{ins} (n - |S_A| - \sum_{i \in S_D \cap S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}\}}). \quad (4.11)$$

#### Coût du remplacement préventif à l'instant $T_k$ , $C_k^{prev}$

Dans cette stratégie, les composants sélectionnés pour la maintenance préventive sont simultanément maintenus ce qui permet d'économiser les coûts de mise en œuvre. Cela peut cependant conduire à un arrêt (planifié) du système si la maintenance préventive est réalisée sur un composant critique ou critique temporaire ou sur un groupe critique. Un coût d'arrêt planifié

$c_{psd}$  est alors comptabilisé (dépendance économique négative). Pour terminer, si aucune action n'est requise à l'instant  $T_k$ , alors  $C_k^{prev} = 0$ . Sinon, le coût de remplacement préventif  $C_k^{prev}$  sur le système à l'instant  $T_k$  est formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
 C_k^{prev} = & \sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} (c_p^{(i)} + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}) \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}} \\
 & - c_{ms} \left( \underbrace{\sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}} - \mathcal{I}_{\{S_{k, M_k+1} = \emptyset\}}}_{\text{profit économique à } T_k : \text{PED}} \right) \\
 & - c_{psd} \left( \underbrace{\sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_k \text{ est un groupe critique}\}}}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé à } T_k : \text{NED ou PED}} \right).
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

### Coût total du $k^{\text{ème}}$ cycle d'inspection, $C_k$

Si les activités de remplacement préventif et de remplacement correctif sont effectuées simultanément, le coût de mise en œuvre  $c_{ms}$  peut être partagé. En conséquence, le coût total du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection  $C_k$  est la somme de tous les coûts déterminés dans les équations (4.9) à (4.12). Il s'écrit :

$$\begin{aligned}
 C_k = & \sum_{j=1}^{M_k} \left[ \underbrace{\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique}\}} [c_e^{(i_{\tau_{k,j}^S})} + \sum_{i \in S_{k,j}} (c_c^{(i)} + c_{ms})]}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k,j}} + \underbrace{\mathcal{I}_{\{i_{\tau_{k,j}^S} \text{ est criti. temporaire}\}} \sum_{i \in S_{k,j} \setminus \{i_{\tau_{k,j}^S}\}} (c_c^{(i)} + c_{ms})}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k,j} \text{ sauf le composant } i_{\tau_{k,j}^S}} \right] \\
 & + c_{usd} - c_{ms} \left[ |S_{k,j}| - (1 + \mathcal{I}_{\{i_{\tau_{k,j}^S} \text{ est criti. temporaire}\}}) \right] + c_{ins} \left( n - |S_A| - \underbrace{\sum_{i \in S_D \cap S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}\}}}_{\text{coût d'inspection à } T_k} \right) \\
 & + \underbrace{\sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} (c_p^{(i)} + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}) \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}}}_{\text{coût de PR à } T_k} \\
 & + \underbrace{\sum_{i \in S_{k, M_k+1}} (c_c^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{i \in S_{k, M_k+1}\}} - c_{ms} (|S_{k, M_k+1}| + \sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}} - 1)}_{\text{coût de CR sur l'ensemble } S_{k, M_k+1} \text{ et profit économique total à } T_k : \text{PED}} \\
 & - c_{psd} \left( \underbrace{\sum_{i \in \Omega \setminus S_{k, M_k+1}} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}\}} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_k \text{ est un groupe critique}\}}}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé à } T_k : \text{NED ou PED}} \right).
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

### 4.4.3 Détermination des paramètres optimaux de la règle de décision de maintenance optimaux

Finalement, le coût moyen asymptotique  $C_\infty(T, R_p^{(i)})$  de la stratégie proposée est obtenu en introduisant l'équation (4.13) à l'équation (4.7). Les paramètres optimaux de décision de maintenance peuvent être obtenus par minimisation de la fonction du coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini  $C_\infty(T, R_p^{(i)})$  :

$$C_\infty(T^*, R_p^{(i)*}) = \min_{T, R_p^{(i)}} C_\infty(T, R_p^{(i)}) \quad (4.14)$$

sous les contraintes :  $0 < T$ ,

$$0 \leq \omega_p \leq \frac{1}{\min_{i=1, \dots, n} (I_B^{(i)})} \quad (4.15)$$

$$R_p^{(i)} = \min(\omega_p I_B^{(i)}, 1).$$

La résolution numérique du problème (4.14)-(4.15) peut-être effectuée par une technique de simulations de Monte Carlo. Les seuils optimaux de remplacement préventif  $R_p^{(i)*}$  correspondant à chaque composant sont directement dérivés de la valeur optimale du coefficient de maintenance préventive  $\omega_p^*$ . La procédure de simulation est illustrée sur la figure 4.2 dont l'objet est de décrire brièvement le process de décision de maintenance pour évaluer le coût global de maintenance de la stratégie proposée (stratégie IB-O ou stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ ).

## 4.5 Application numérique et analyse des performances de la stratégie proposée

Le but de ce paragraphe est d'illustrer comment et quand la stratégie IB-O proposée peut-être utilisée pour la prise de décision de maintenance sur des systèmes à structure complexe. Le cas d'un système composé de 12 composants ( $\Omega = \{1, \dots, 12\}$ ) est étudié. La structure du système envisagé, voir pp. 145 de [220], est donnée sur la figure 4.3.

Il convient de noter que cette structure a été choisie de sorte à permettre une analyse de l'effet de la structure du système lorsque des opérations de maintenance sont prioritaires. Pour chaque composant  $i$ , le comportement de dégradation est décrit par un processus stochastique Gamma homogène  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$  de paramètre de forme  $\alpha^{(i)}$  et de paramètre d'échelle  $\beta^{(i)}$ . Le seuil de défaillance associé est  $Z^{(i)}$ .

Tous les paramètres de coûts d'interventions liés aux l'inspections, remplacements, commandes urgentes de pièces de rechange, arrêts du système, dégradation des composants sont

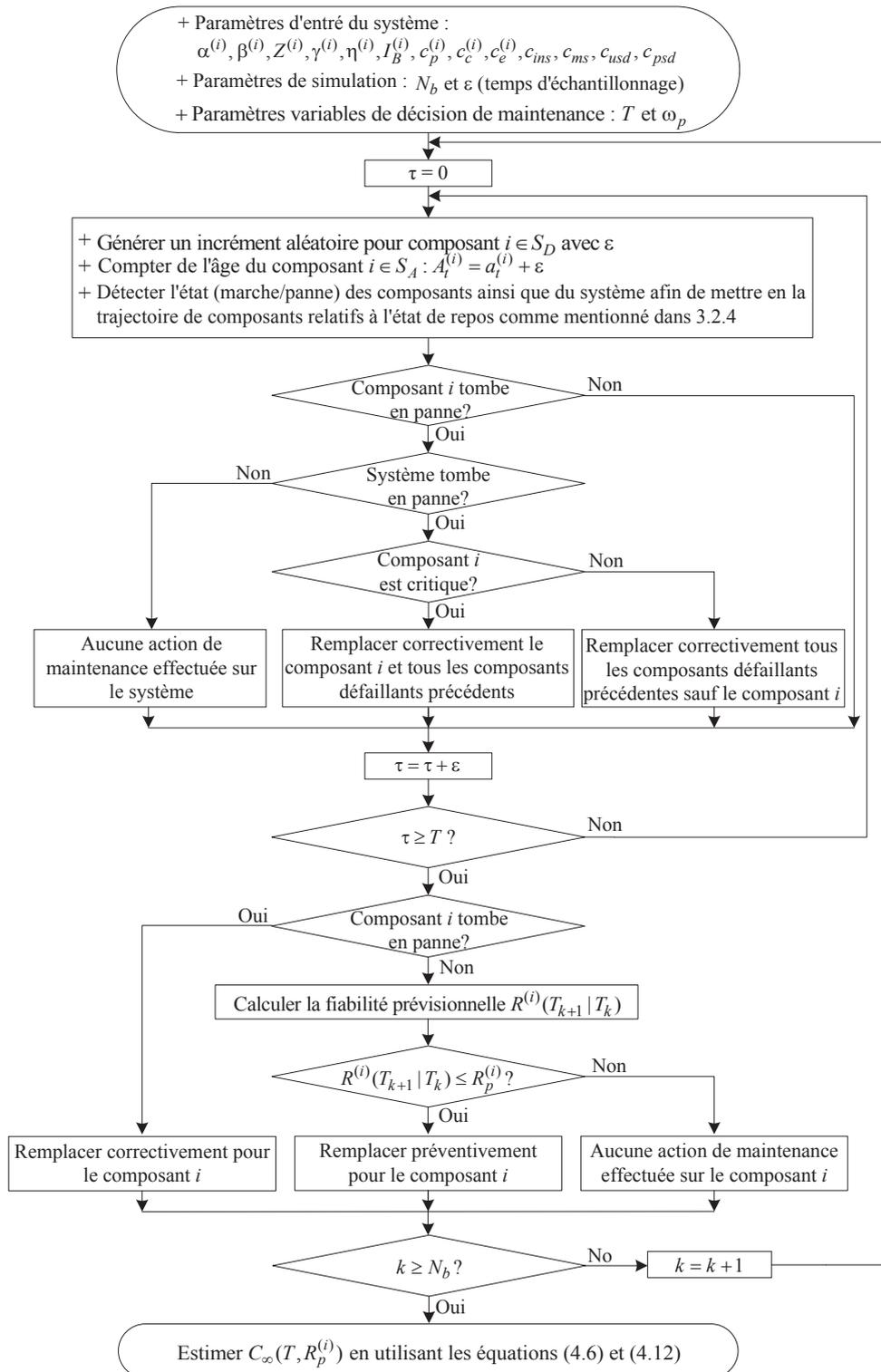


FIGURE 4.2 – Logigramme du processus de décision de maintenance et la procédure de simulation pour l'évaluation du coût global de la stratégie IB-O.

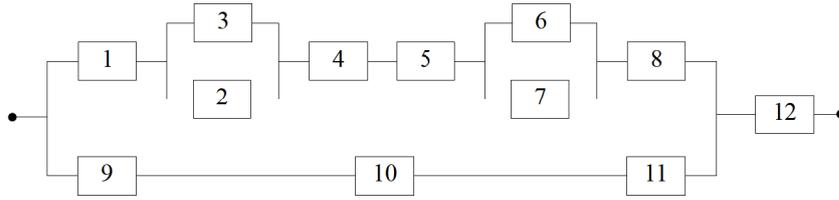


FIGURE 4.3 – Diagramme de fiabilité du système étudié de 12 composant.

listés dans le tableau 4.2, ainsi que les valeurs des facteurs d'importance structural pour chaque composant. Le facteur d'importance structural de chaque composant est calculé à partir de la structure du système en utilisant l'équation (4.1). Les composants du système sont stochastiquement indépendants et leurs paramètres ont été arbitrairement choisis pour réaliser les études numériques suivantes. Les durées de vies de chaque composants sont choisies de même ordre de grandeur.

TABLE 4.2 – Paramètres d'entrée liés à la dégradation et aux coûts du système.

| $c_{ins} = 5, c_{ms} = 15, c_e^{(1)} = c_e^{(2)} = \dots = c_e^{(12)} = c_e = 20, c_{usd} = 200, c_{psd} = 20$ |                |               |           |             |             |             |
|--|----------------|---------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Composant  | $\alpha^{(i)}$ | $\beta^{(i)}$ | $Z^{(i)}$ | $c_p^{(i)}$ | $c_c^{(i)}$ | $I_B^{(i)}$ |
| 1  | 0.8            | 1             | 40        | 150         | 165         | 0.02637190  |
| 2  | 1              | 1.5           | 38        | 120         | 132         | 0.01464844  |
| 3  | 1              | 1.2           | 38        | 120         | 132         | 0.01464844  |
| 4  | 0.4            | 0.9           | 42        | 100         | 120         | 0.02637190  |
| 5  | 0.4            | 0.8           | 39        | 120         | 132         | 0.02637190  |
| 6  | 1.1            | 1.7           | 37        | 140         | 154         | 0.01464844  |
| 7  | 1.1            | 1.8           | 37        | 140         | 154         | 0.01464844  |
| 8  | 0.7            | 1             | 28        | 150         | 165         | 0.02637190  |
| 9  | 0.5            | 1.5           | 40        | 170         | 187         | 0.12744141  |
| 10   | 0.65           | 1.5           | 31        | 170         | 187         | 0.12744141  |
| 11   | 0.45           | 0.9           | 36        | 160         | 176         | 0.12744141  |
| 12   | 0.3            | 1             | 40        | 200         | 220         | 0.15576172  |

Afin de souligner séparément l'impact des sous-stratégies que sont la sous-stratégie IB (maintenance préventive basée sur le facteur d'importance structural  $I_B^{(i)}$ ) et la sous-stratégie O (maintenance corrective groupée basée sur les opportunités), la stratégie proposée IB-O est étudiée et comparée avec les trois variantes suivantes, dérivées des sous-stratégies IB et O :

- *Stratégie NIB-O* : le facteur d'importance structural n'est pas pris en compte dans la prise de décision de maintenance préventive. Des approches similaires peuvent être trouvées dans [160, 134, 204, 110];

- *Stratégie IB-NO* : la sous-stratégie de maintenance corrective groupée basée sur les opportunités n'est pas considérée dans la prise de décision de maintenance corrective ;
- *Stratégie NIB-NO* : aucune des deux sous-stratégies IB et O n'est considérée. Cette stratégie est équivalente à la stratégie présentée dans l'article [21].

Des descriptions plus détaillées des trois stratégies variantes seront données dans la sous-section 4.5.2.

En outre, plusieurs analyses de sensibilité liées aux paramètres de coûts du système (tels que le coût de mise en œuvre, le coût de commande urgente, le coût d'inspection, le coût d'arrêt planifié et non-planifié du système) sont menées pour les quatre stratégies.

### 4.5.1 Optimisation de maintenance basée sur la stratégie proposée

Pour trouver les paramètres optimaux que sont le cycle optimal d'inspection  $T^*$  et les seuils optimaux  $R_p^{*(i)}$  ( $i = 1, \dots, n$ ) de remplacement préventif correspondant aux  $n$  composants du système, le coût moyen asymptotique sur un horizon infini  $C_\infty(T, R_p^{(i)})$  est évalué pour différentes valeurs de  $T$  et de  $\omega_p$  comme décrit précédemment et selon la procédure de simulation donnée dans 4.2. Finalement, le coût moyen asymptotique  $C_\infty(T, R_p^{(i)})$  est obtenu en fonction de  $T$  et de  $\omega_p$  et représenté sur la figure 4.4. Le résultat obtenu fait clairement apparaître une

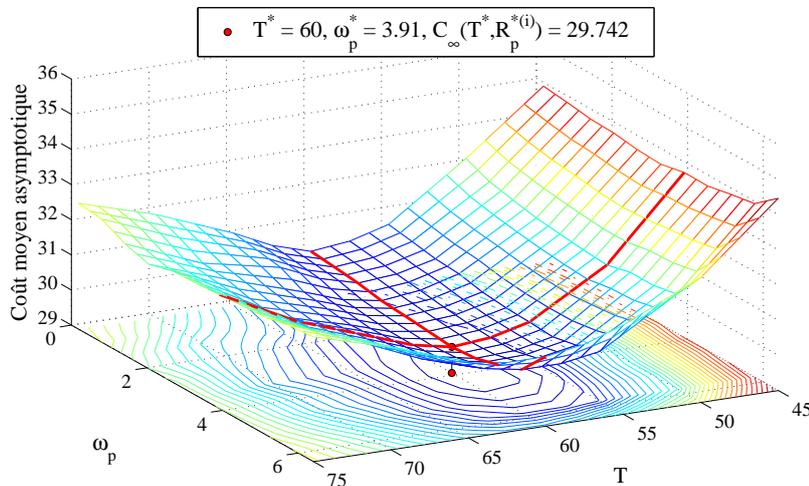


FIGURE 4.4 – Coût moyen asymptotique par unité de temps  $C_\infty(T, R_p^{(i)})$  de la stratégie proposée en fonction de  $T$  et  $R_p^{(i)}$ .

surface de coût de maintenance de forme convexe. Cela signifie que la solution optimale existe et l'optimum pour la stratégie de maintenance proposée peut être trouvé facilement. Le coût moyen optimal asymptotique  $C_\infty(T^*, R_p^{(i)*}) = 29.742$  correspond au cycle optimal d'inspection  $T^* = 60$  unités de temps et aux seuils optimaux de remplacement préventif  $R_p^{(i)*}$  des 12

composants obtenus pour  $\omega_p^* = 3.91$  et donnés dans le tableau 4.3. Ces résultats confirment que

TABLE 4.3 – Les seuils optimaux de remplacement préventif de 12 composants du système.

| Composant   | 1   | 2    | 3    | 4   | 5   | 6    | 7    | 8   | 9   | 10  | 11  | 12   |
|---|-----|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| $T^* = 60, \omega_p^* = 3.91, C_\infty(T^*, R_p^{(i)*}) = 29.742, i = 1, \dots, 12$ |     |      |      |     |     |      |      |     |     |     |     |      |
| $R_p^{(i)*}$  | 0.1 | 0.06 | 0.06 | 0.1 | 0.1 | 0.06 | 0.06 | 0.1 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.61 |

le seuil optimal de remplacement préventif des composants les plus importants est supérieur à celui des composants moins importants.

#### 4.5.2 Analyses de performance de la stratégie proposée

Pour évaluer l'efficacité la stratégie proposée, différentes comparaisons sont faites avec :

- d'une part la stratégie NIB-NO dans laquelle les sous-stratégie IB et O ne sont pas considérées dans la prise de décision de maintenance préventive et corrective ;
- d'autre part les deux stratégies variantes NIB-O et IB-NO qui ont été définies précédemment.

Ces comparaisons ont en partie pour but d'étudier séparément les influences de la sous-stratégie IB et de la sous-stratégie O. Plus précisément :

- La stratégie NIB-O : dans cette stratégie, la sous-stratégie O est envisagée dans la prise de décision de maintenance corrective mais le facteur d'importance structurel n'est pas pris en compte dans le processus de décision de maintenance préventive. Ceci peut-être facilement effectué en fixant le facteur  $I_B^{(i)}$  de tous les composants à 1. Le seuil de remplacement préventif de tous les composants est alors le même :  $R_p^{(i)} = \omega_p$  avec  $i = 1, 2, \dots, 12$  et  $0 < \omega_p \leq 1$  ;
- La stratégie IB-NO : le facteur d'importance structurel des composants est intégré à la prise de décision de maintenance préventive (le seuil de remplacement préventif de composants  $R_p^{(i)}$  est déterminé comme dans la stratégie IB-O proposée. Pourtant, la sous-stratégie O n'est pas appliquée. Ceci signifie que, pendant l'intervalle d'inter-inspection, lorsque un composant tombe en panne, il est remplacé immédiatement.

Les résultats numériques pour les trois stratégies (NIB-NO, IB-NO, NIB-O) sont obtenus en utilisant les techniques de simulation numérique avec les données indiquées dans le tableau 4.2. Les paramètres optimaux de décision de maintenance de chaque stratégie sont synthétisés dans le tableau 4.4.

TABLE 4.4 – Résultats optimaux de toutes quatre stratégies.

|                    | $T^*$ | $\omega_p^*$ | $C_\infty^*$ |
|--------------------|-------|--------------|--------------|
| Stratégie proposée | 60    | 3.91         | 29.742       |
| Stratégie NIB-O    | 60    | 0.415        | 30.59        |
| Stratégie IB-NO    | 24    | 5.15         | 35.61        |
| Stratégie NIB-NO   | 25    | 0.71         | 35.793       |

Ces résultats montrent tout d'abord que le facteur d'importance structurel a une influence significative sur le coût de maintenance. En effet, les coûts moyens asymptotiques des stratégies avec IB (IB-O et IB-NO) sont inférieurs à celui sans IB (NIB-O et NIB-NO), respectivement. Plus précisément, le coût moyen asymptotique de la stratégie IB-NO est inférieur à celui de la stratégie NIB-NO et le coût moyen asymptotique de la stratégie complète proposée est inférieur à celui de la stratégie NIB-O. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une prise en compte de la sous-stratégie IB permet de réduire les remplacements précoces pour les composants moins importants et les pannes pour les composants plus importants. Cela signifie que les composants plus importants sont fréquemment maintenues (car leur seuil de remplacement préventif est supérieur au seuil de remplacement préventif de composants moins importants). Au contraire, pour les stratégies non basées sur la sous-stratégie IB, la fréquence de maintenance de tous les composants est la même (parce que leur seuil de remplacement préventif est le même pour les tous composants dans le système).

De plus, les résultats présentés dans le tableau 4.4 montrent que l'utilisation de la sous-stratégie O peut réduire considérablement le coût total de maintenance. Le coût moyen asymptotique de la stratégie NIB-O est beaucoup plus faible que celui de la stratégie NIB-NO et le coût moyen asymptotique de la stratégie IB-O est beaucoup plus faible que celui de la stratégie IB-NO. Bien sûr, les impacts de la sous-stratégie IB ainsi que de la sous-stratégie O peuvent dépendre des coûts d'intervention tels que le coût de mise en œuvre, le coût de commande urgente, le coût d'arrêt non-planifié/planifié et le coût d'inspection.

Le reste de ce chapitre est consacré à la présentation des analyses diverses de sensibilité par rapport à ces coûts afin de démontrer l'efficacité de la stratégie IB-O proposée.

- (a) *Analyse de sensibilité des stratégies par rapport au coût de mise en œuvre de maintenance* : Afin d'étudier la sensibilité de maintenance vis à vis du coût de mise en œuvre, le coût moyen asymptotique optimal correspondant à chaque stratégie ci-dessus est calculé avec des valeurs différentes du coût de mise en œuvre  $c_{ms}$ . À cet effet, le coût  $c_{ms}$  varie de 0 à 75 avec un pas égal à 15 unités de coût alors que les autres paramètres de coût donnés dans le tableau 4.2 restent inchangé. Les résultats obtenus sont représentés sur la

figure 4.5.

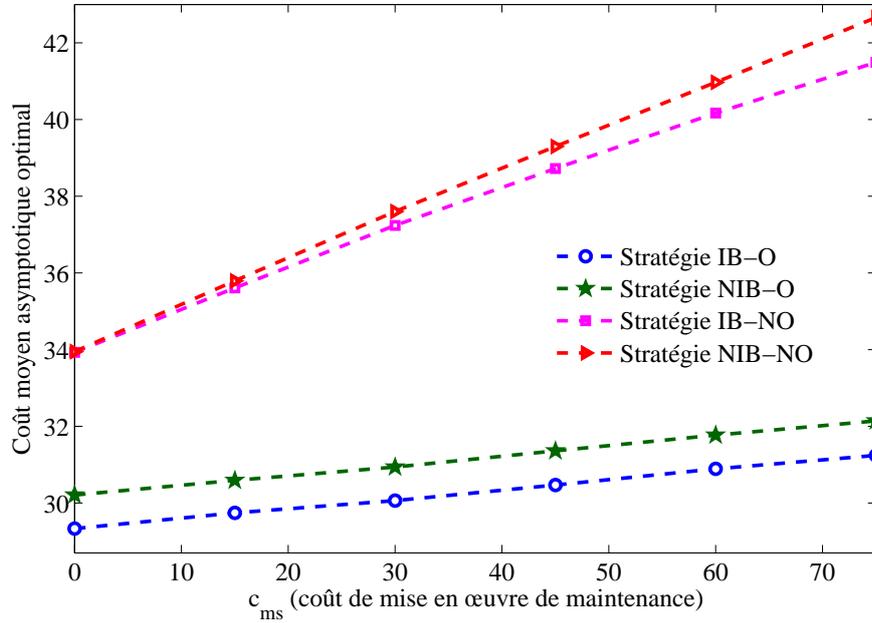


FIGURE 4.5 – Effet du coût de mise en œuvre  $c_{ms}$  sur les quatre stratégies de maintenance.

Les résultats montrent que pour les quatre stratégies, les coûts de maintenance augmentent proportionnellement à la croissance du coût de mise en œuvre. Pour les stratégies non basées sur la sous-stratégie O (stratégies IB-NO et NIB-NO) le coût moyen asymptotique est très sensible aux variations de  $c_{ms}$ . Cette sensibilité est moindre avec les stratégies basées sur la sous-stratégie O (stratégies IB-O et stratégies NIB-O).

Lorsque  $c_{ms}$  est égal à zéro, les stratégies non basées sur la sous-stratégie O donnent le même coût moyen asymptotique de 33,95 tandis que le coût moyen asymptotique de la stratégie proposée est 29,33. Ceci conduit à un gain relatif (profit économique) de maintenance de 13,6% (en utilisant l'équation 4.16). Ce gain est beaucoup plus élevé lorsque le coût de mise en œuvre augmente.

$$GR = \frac{C_{\infty}^{NIB-NO}(T^*, R_p^{(i)*}) - C_{\infty}^{IB-O}(T^*, R_p^{(i)*})}{C_{\infty}^{NIB-NO}(T^*, R_p^{(i)*})} \cdot 100\%, \quad (4.16)$$

En résumé, d'après les résultats présentés dans la figure 4.5, il est clair que la stratégie de maintenance proposée IB-O est plus performante que les trois autres du point de vue de la variation du coût de mise en œuvre.

- (b) *Analyse de sensibilité des stratégies par rapport au coût de commande urgente* : Dans ce paragraphe, l'analyse de sensibilité consiste à étudier l'impact du coût de commande

urgente  $c_e$  sur les quatre stratégies de maintenance. Pour ce faire, une variation de  $c_e$  entre zéro et 100 unités de coût est envisagée. Les autres paramètres de coût donnés dans le tableau 4.2 sont inchangés. Les résultats obtenus sont donnés dans la figure 4.6. Comme

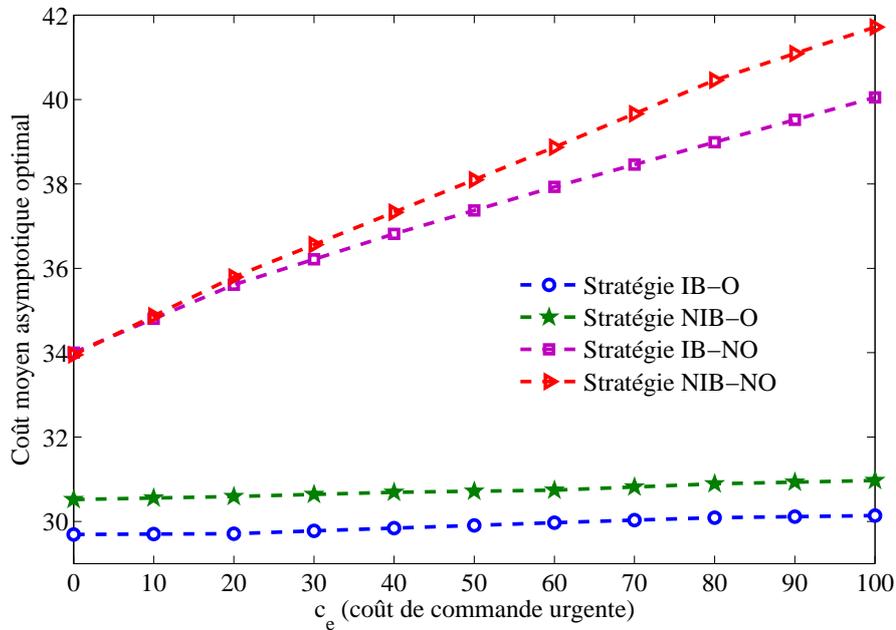


FIGURE 4.6 – Effet du coût de commande urgente  $c_e$  sur les quatre stratégies de maintenance.

attendu, pour les quatres stratégies, les coûts moyens asymptotiques sont les fonctions croissantes du coût de commande urgente. Pourtant, il est important de noter que le coût moyen asymptotique des stratégies incluant la sous-stratégie O augmente légèrement, tandis que celui des stratégies sans la sous-stratégie O augmente nettement avec  $c_e$ . Cela signifie que la sous-stratégie O peut aider à anticiper la croissance du coût de maintenance par rapport au coût unitaire  $c_e$ .

- (c) *Analyse de sensibilité des stratégies par rapport au coût d'arrêt non-planifié du système :* Les influences du coût d'arrêt non-planifié du système  $c_{usd}$  sont contraires à celles du coût du bon de commande urgente  $c_e$  ainsi que du coût de mise en œuvre. Plus précisément, le coût  $c_{usd}$  a un impact significatif sur le coût de maintenance des stratégies basées sur la sous-stratégie O comme montré sur la figure 4.7, tandis que  $c_e$  ou  $c_{ms}$  ont un impact significatif sur le coût des stratégies sans la sous-stratégie O.

Pour les stratégies basées sur la sous-stratégie O, les composants non-critiques défailants sont laissés dans l'état de panne afin de réduire les commandes urgentes et de renforcer l'impact positif de la dépendance économique positive. Ceci peut cependant conduire à une augmentation de la probabilité de panne du système. En conséquence, le coût de

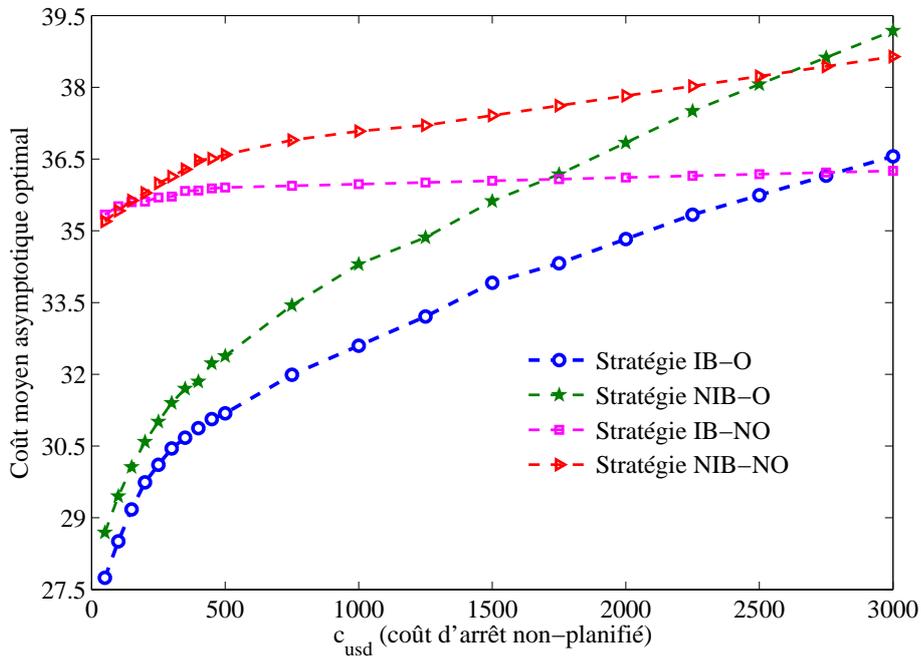


FIGURE 4.7 – Effet du coût d’arrêt non-planifié du système  $c_{usd}$  sur les quatre stratégies de maintenance.

maintenance des stratégies basées sur la sous-stratégie O (stratégies IB-O et stratégie NIB-O) augmente sensiblement avec le coût d’arrêt non-planifié du système quand il varie de 50 à 500 unités de coût. En revanche, dans le cas des stratégies sans la sous-stratégie O (c-à-d. les stratégies IB-NO et NIB-NO), les composants non-critiques défaillants sont immédiatement remplacés à leur instant de panne. Ainsi, le coût moyen asymptotique de maintenance des stratégies IB-NO et NIB-NO augmente lentement avec la croissance du coût d’arrêt non-planifié du système.

Le seuil optimal de remplacement préventif des composants augmente et le cycle optimal d’inspection décroît pour les quatre stratégies. Par conséquent, les composants du système sont remplacés plus tôt (par rapport à leur âge) pour diminuer des coûts de pénalité dus à la panne du système.

Pour les valeurs faibles de  $c_{usd}$ , la rentabilité (gain relatif) des stratégies basées sur la sous-stratégie O est plus élevée par rapport aux stratégies sans basées sur la sous-stratégie O, respectivement. Cependant, cette rentabilité décroît quand le coût  $c_{usd}$  augmente.

La figure 4.7 montre aussi que les stratégies basées sur la sous-stratégie O deviennent plus mauvaises que les stratégies sans la sous-stratégie O pour les valeurs les plus élevées de  $c_{usd}$ . Plus précisément, le coût de maintenance de la stratégie NIB-O surpasse celui de stratégie NIB-NO pour  $c_{usd} \geq 2600$  et le coût de maintenance de la stratégie

IB-O surpasse celui de la stratégie IB-NO pour  $c_{usd} \geq 2800$ . Ceci est lié au fait que le profit économique obtenu avec la sous-stratégie O par la réduction du nombre de commandes urgentes et d'actions de maintenance corrective groupées, n'est pas suffisamment important pour compenser les coûts de pénalité dus aux arrêts non-planifiés du système. Si le coût de commande urgente  $c_e$  ou le coût de mise en œuvre de maintenance sont plus faibles que leurs valeurs courants (c-à-d.  $c_e = 20$ ,  $c_{ms} = 15$ ), le point de coupure entre les coûts moyens asymptotiques des stratégies IB-O et IB-NO (respectivement des stratégies NIB-O et NIB-NO) se déplace vers les valeur plus faible de  $c_{usd}$ .

Il est également possible de constater que le coût d'arrêt non-planifié du système est étroitement lié au coût de commande urgente et au coût de mise en œuvre de maintenance. Pour des valeurs élevées de  $c_e$  ainsi que de  $c_{ms}$  et des valeurs faibles de  $c_{usd}$ , les stratégies basées sur la sous-stratégie O sont plus efficace que les stratégies non basées sur la sous-stratégie O du point de vue du coût de maintenance global.

(d) Analyse de sensibilité des stratégies par rapport au coût d'arrêt planifié du système :

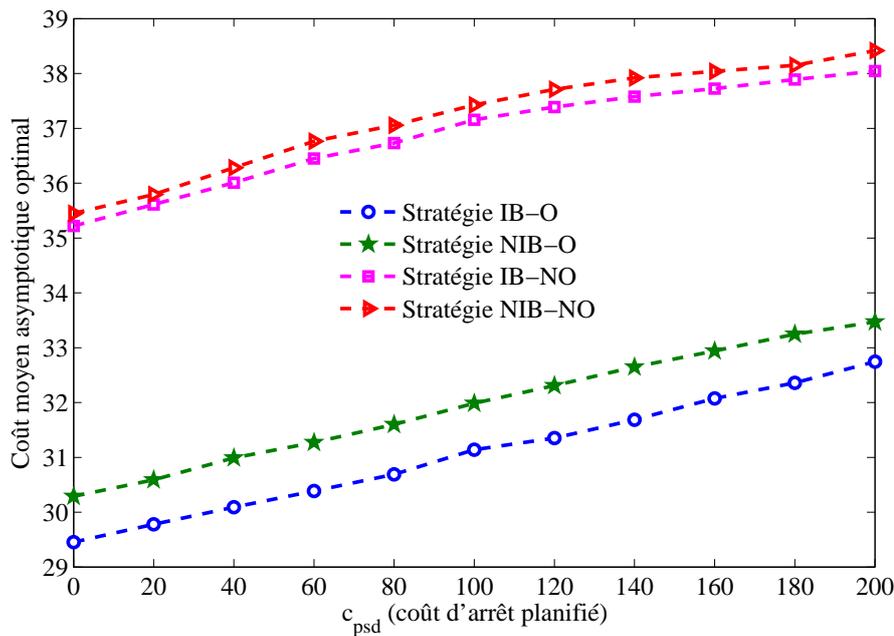


FIGURE 4.8 – Effet du coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$  sur les quatre stratégies de maintenance.

D'après les résultats obtenus et illustrés par la figure 4.8, le coût moyen asymptotique augmente régulièrement pour les quatre stratégies quand le coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$  augmente de zéro à 200 unités de coût. Ces résultats montrent également que la stratégie IB-O donne le meilleur résultat tandis que la stratégie NIB-NO donne le plus mauvais résultat. Les paramètres de décision de maintenance pour les stratégies IB-O

et NIB-NO sont très proches les uns des autres. Les seuils optimaux de remplacement préventif décroissent substantiellement et le cycle optimal d'inspection augmente légèrement).

Aux dates de maintenance préventive optimales, les opérations de maintenance préventive et corrective conduisent à un arrêt planifié du système avec une forte probabilité. Ceci est lié aux interventions sur des coupes minimales ou des composants critiques. Par conséquent, le coût d'arrêt planifié du système est systématiquement imputé à ces dates. Il n'y a donc pas de changement soudain dans les quatre coûts moyens asymptotiques optimaux correspondant aux quatre stratégies.

(e) *Analyse de sensibilité des stratégies par rapport au coût d'inspection :*

Pour considérer les influences du coût d'inspection  $c_{ins}$  sur les quatre stratégies de maintenance, l'analyse de sensibilité est effectuée. On fait varier  $c_{ins}$  sur un intervalle assez large de 1 à 15 avec un incrément de 2 unités de coût. Les autres paramètres de coût sont fixés ( $c_{ms} = 15$ ,  $c_e = 20$ ,  $c_{usd} = 200$ ,  $c_{psd} = 20$ ).

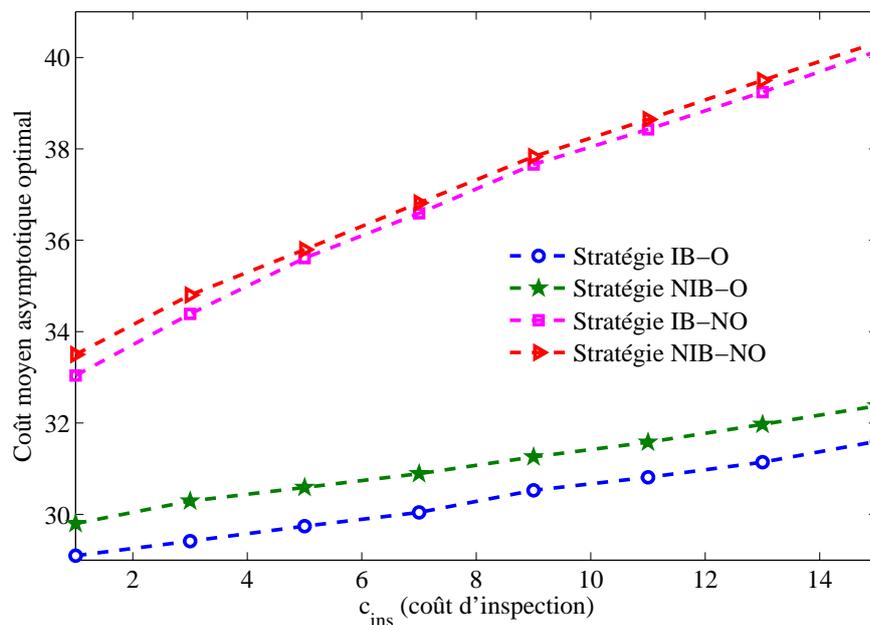


FIGURE 4.9 – Effet du coût d'inspection  $c_{ins}$  sur les quatre stratégies de maintenance.

Les résultats optimaux du cycle d'inspection pour les quatre stratégies obtenus en effectuant l'analyse de sensibilité montrent que l'intervalle optimal d'inter-inspection des stratégies basées sur la sous-stratégie O est toujours beaucoup plus élevé que celui des stratégies non basées sur la sous-stratégie O. Cela signifie également que le nombre d'inspections des stratégies non basées sur la sous-stratégie O est supérieur à celui des straté-

gies basées sur la sous-stratégie O durant la mission du système.

En outre, les stratégies basées sur la sous-stratégie O peuvent avoir plus de composants défaillants aux dates d'inspection que celles non basées sur la sous-stratégie O. En effet, le dernier ensemble de composants défaillants  $S_{k,M+1}$  (qui a été défini dans la sous-section 4.4.2) est laissé dans l'état de panne jusqu'à ces dates pour les stratégies basées sur la sous-stratégie O. Il convient de rappeler ici que, aux dates d'inspection, tous composants du système sont inspectés sauf les composants défaillants. Il n'est pas donc surprenant que le coût de maintenance des stratégies basées sur la sous-stratégie O augmente fortement, tandis que celui de stratégies sans la sous-stratégie O augmente avec  $c_{ins}$ . Ceci est montré sur la figure 4.9.

## 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle stratégie de maintenance prévisionnelle est développée pour la maintenance de systèmes à composants multiples, en particulier des systèmes avec structure complexe. Les mesures d'importance structurelle des composants et leurs fiabilités prévisionnelles ou RUL conditionnelles sont étudiées et incorporées simultanément dans la prise de décisions de maintenance préventive. Les résultats numériques obtenus démontrent que cette prise en compte conjointe semble être un outil efficace pour la sélection individuelle des composants à maintenir préventivement. Il y a un intérêt certain à intégrer ces indicateurs dans des modèles de maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe.

De plus, dans cette stratégie, les activités de maintenance corrective groupées basées sur les opportunités sont proposées et l'exécution de ces activités prend également en compte les composants principaux du point de vue fiabiliste (c-à-d. les composants critiques ou critiques temporaires). De telles procédures de décision de maintenance corrective permettent à la stratégie de profiter efficacement les opportunités de maintenance afin

- (i) de remplacer plusieurs composants défaillants en même temps (renforcer l'impact positif d'opérations de regroupement de maintenance pour économiser des coûts de mise en œuvre)
- (ii) de diminuer les commandes urgentes (pour économiser des coûts de commande urgente).

Une telle stratégie de maintenance permet de réduire significativement le coût de maintenance global par comparaison avec des stratégies de maintenance efficaces traditionnelles.

En outre, afin d'évaluer et optimiser la performance de la stratégie de maintenance proposée, un modèle mathématique de coût ainsi qu'une procédure de simulation sont construits. À travers eux, les paramètres optimaux de décision de maintenance pour la stratégie proposée sont numériquement déterminés en utilisant des techniques de simulations de Monte Carlo.

Les résultats et les analyses de sensibilité soulignent l'efficacité de la stratégie proposée dans différentes situations.



# Chapitre 5

## Stratégie de maintenance prévisionnelle pour des systèmes à composants multiples en utilisant le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, une nouvelle stratégie de maintenance prévisionnelle avec une prise de décision multi-niveaux est proposée pour la maintenance de systèmes à composants multiples avec structure complexe. Pour cette nouvelle stratégie, La prise de décision de maintenance est considérée sur deux niveaux : au niveau du système et au niveau du composant. Le but des règles de décision au niveau du système est d'adresser la nécessité d'opérations de maintenance préventives du point de vue de la fiabilité prévisionnelle du système. Au niveau du composant, les règles de décision visent à constituer le groupe de composants qui doivent être remplacés préventivement si la maintenance préventive est déclenchée par la décision prise au niveau du système. La sélection des composants s'appuie sur un « facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût » qui prend en compte la fiabilité prévisionnelle ou RUL conditionnelle de chaque composant, les dépendances économiques ainsi que la structure du système. En effet, un choix pertinent de groupe de composants doit se baser non seulement sur les effets positifs de regroupement d'actions de maintenance tels que l'économie de coûts de mise en oeuvre et d'arrêt planifié, mais il doit également considérer les impacts négatifs de ce regroupement sur le fonctionnement du système. Pour évaluer et optimiser la performance de la stratégie proposée, un modèle mathématique de coût de maintenance est construit. Il permet de déterminer les paramètres de décision optimaux. Finalement, un système complexe de 14 composants est utilisé

pour illustrer l'utilisation et l'efficacité de cette stratégie. Différentes analyses de sensibilité sont également proposées et commentées.

Le suite de ce chapitre est organisé de manière suivante. La section 5.2 est consacrée à étendre un facteur d'importance de fiabilité à un facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût pour aider à la prise de décision de maintenance préventive (au niveau du composant). La section 5.3 présente une description du processus de décision multi-niveaux en maintenance suivant la stratégie proposée. Sur la base de cette structure de décision de maintenance, dans la section 5.4, un modèle mathématique de coût de maintenance est construit pour permettre d'évaluer et d'optimiser la performance de la stratégie proposée. Afin d'illustrer l'utilisation et les avantages de la stratégies proposée, un système cohérent complexe de 14 composants est introduit dans la section 5.5. De plus, pour démontrer l'efficacité de cette stratégie, différentes comparaisons de performances avec une stratégie efficace existante ainsi qu'une analyse de sensibilité sont présentées. Enfin, la dernière section 5.6 présente quelques conclusions issues de ce chapitre.

## 5.2 Extension d'un facteur d'importance probabiliste

Afin d'améliorer la fiabilité du système, la mesure d'importance d'amélioration de la fiabilité, qui est définie comme la différence de la fiabilité du système quand un composant est remplacé par un nouveau [220], semble être un indicateur intéressant. Il doit cependant être noté que cette mesure d'importance ne prend pas en compte de coût lié à l'opération de maintenance. D'un point de vue pratique, un « haut » niveau d'amélioration de la fiabilité avec un coût de maintenance très élevé ne peut pas être un bon choix pour l'optimisation de maintenance et un niveau « suffisant » d'amélioration avec un coût de maintenance modéré peut-être plus approprié. D'autre part, pour des raisons économiques ou techniques, il est souvent préférable que plusieurs composants soient maintenus préventivement en même temps plutôt qu'à différents instants [95, 99]. Néanmoins, les mesures actuelles d'amélioration de la fiabilité ne prennent pas en compte l'impact du remplacement simultané de plusieurs composants tels que, par exemple, des dépendances économiques entre composants ou des impacts d'amélioration conjoints. C'est la raison pour laquelle, dans ce chapitre, une extension de la mesure (ou facteur) d'importance de la fiabilité à un facteur qui est appelé le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût est proposée. Ce nouveau facteur, noté  $C_{G_l}^{GIF}$ , est proposée dans une optique d'aide à la prise de décision de maintenance préventive groupée (regroupement d'opérations de maintenance). Le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût est défini comme suit à l'instant  $s$  ( $s < t$ ) pour le groupe  $G_l$ , constitué de  $|G_l|$  composants ( $1 \leq |G_l| \leq n$ ) :

$$C_{G_l}^{GIF}(s) = \frac{R^{S,G_l}(t|s) - R^S(t|s)}{C_p^{(G_l)}}, \quad (5.1)$$

où :

- $R^{S, G_l}(t|s)$  indique que la fiabilité prévisionnelle du système est calculée à l'instant  $t$  ( $t > s$ ) sachant que tous les composants du groupe sélectionné  $G_l$  sont préventivement remplacés à l'instant  $s$  ;
- $C_p^{(G_l)}$  est le coût lié à l'opération de maintenance préventive effectuée sur le groupe  $G_l$ . Ce coût est déterminé comme dans l'équation (3.18).

Par cette définition, le facteur  $C_{G_l}^{GIF}(s)$  prend conjointement en compte certaines informations concernant :

- le comportement de la fiabilité prévisionnelle de tous les composants du système,
- les coûts liés à la maintenance préventive des composants maintenus (composants du groupe  $G_l$ ),
- les dépendances économiques positive ou négative entre composants dans le système,
- la structure du système (la dépendance d'état entre les composants).

L'utilisation du facteur  $C_{G_l}^{GIF}(s)$  pour sélectionner un groupe optimal de composants à remplacer préventivement sera décrite dans la section 5.3 suivante.

### 5.3 Stratégie de maintenance prévisionnelle proposée : stratégie $(T, R_p^S)$

Le système est régulièrement inspecté aux instants  $T_k = kT$  ( $k \in \mathbb{N}, T_0 = 0$ ). L'inspection effectuée sur un composant  $i \in S_D \subset \Omega$ , ( $\Omega$  étant l'ensemble de tous les composants du système) à l'instant  $T_k$  permet de connaître exactement son état courant  $X_{T_k}^{(i)} = x_{T_k}^{(i)}$ . Il convient de noter que les deux actions de remplacements correctif et préventif ne peuvent être effectuées qu'aux dates d'inspection  $T_k$ .  $T$  est le premier paramètre de décision de cette stratégie.

L'idée principale dans l'élaboration de cette stratégie est que les fiabilités prévisionnelles (ou RUL conditionnelles) du système et de ses composants, la structure du système ainsi que les dépendances économiques entre composants doivent être considérées conjointement dans la prise de décision de maintenance préventive aussi bien au niveau du système que du composant. Le processus de décision est présenté dans la figure 5.1.

- (a) *Au niveau du système* : un seuil de fiabilité, noté  $R_p^S$  ( $0 \leq R_p^S \leq 1$ ), est introduit.  $R_p^S$  est aussi un paramètre de décision de cette stratégie. La fiabilité prévisionnelle du système  $R^S(T_{k+1}|T_k)$  à la date prochaine d'inspection est d'abord prédite en considérant que tous les composants défaillants sont déjà remplacés. Ensuite, les règles de décision au niveau du système sont les suivantes :
- si  $R^S(T_{k+1}|T_k) > R_p^S$ , aucune action de maintenance préventive n'est exigée ;
  - si  $R^S(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^S$ , les activités de maintenance préventive sont planifiées. Le

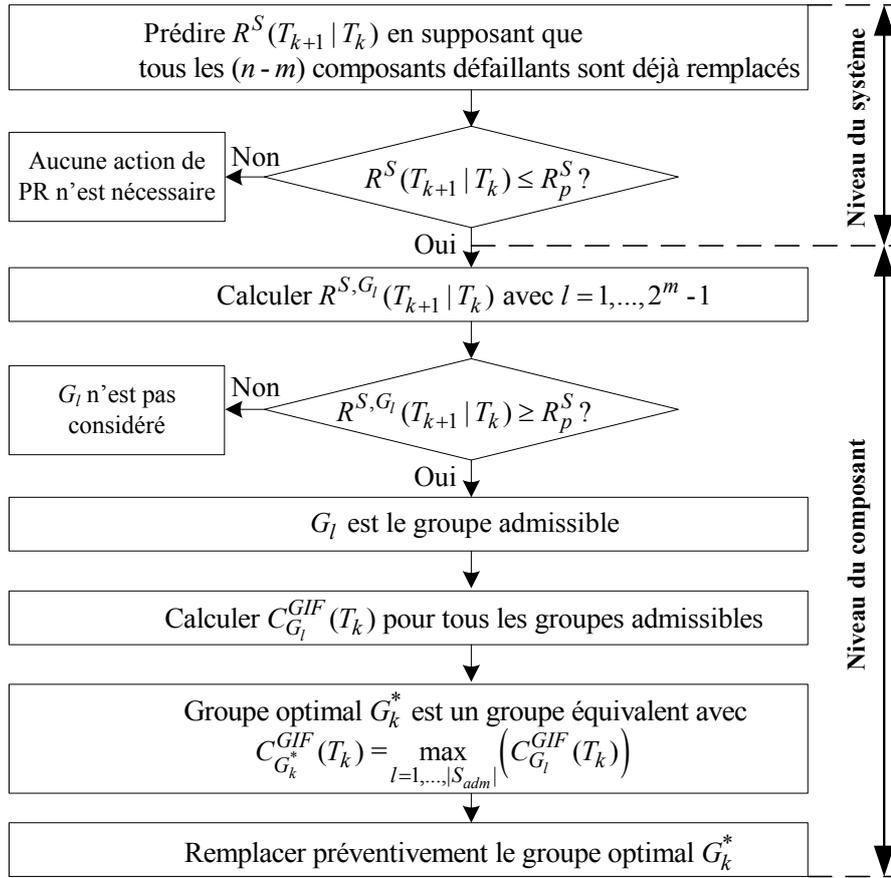


FIGURE 5.1 – Procédure de la prise de décision de maintenance préventive multi-niveaux.

groupe de composants bénéficiant de cette maintenance préventive doit alors être déterminé. Les décisions suivantes sont faites au niveau du composant.

- (b) *Au niveau du composant* : les règles de décision de maintenance préventive construites sont basées sur le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût pour chercher un groupe optimal de plusieurs composants survivants à remplacer. Plus précisément, à l'instant  $T_k$ ,  $m$  composants sont survivants ( $0 \leq m \leq n$ ). Un groupe est dit « admissible » si le remplacement de tous les composants de ce groupe peut améliorer la fiabilité prévisionnelle du système au seuil  $R_p^S$ . Sur la base de l'ensemble de tous les groupes admissibles, noté  $S_{adm}$ , un groupe optimal est déterminé comme le groupe qui a la plus grande valeur du facteur  $C^{GIF}(T_k)$ . Sans perte de généralité, il est supposé que  $G_k^*$  est le groupe optimal qui est obtenu à la date d'inspection  $T_k$ . Le groupe  $G_k^*$  est déterminé par :

$$C_{G_k^*}^{GIF}(T_k) = \max_{l=1, \dots, |S_{adm}|} \left\{ C_{G_l}^{GIF}(T_k) \mid R^{S,G_l}(T_{k+1} | T_k) > R_p^S \right\}, \quad (5.2)$$

où  $R^{S,G_l}(T_{k+1} | T_k)$  représente la fiabilité du système après la maintenance préventive effectuée sur le groupe  $G_l$ .

Rappelons qu'il existe une dépendance économique positive entre composants dans le système, c'est-à-dire que les activités de maintenance réalisées en même temps mutualisent leur coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$  qui est alors compté une seule fois. Ainsi,  $c_{ms}$  n'est pas ajouté à  $C_p^{(G_l)}$  s'il y a au moins un composant défaillant  $j$  qui doit être correctivement remplacé à l'instant  $T_k$ . De plus, si une panne du système apparaît à l'instant  $\tau_k^S \leq T_k$  et après la date d'inspection  $T_{k-1}$  ( $\tau_k^S$  est la variable aléatoire décrivant le temps de panne du système dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection), alors  $c_{psd}$  n'est ajouté non plus à  $C_p^{(G_l)}$ . Par conséquent, le coût lié au remplacement préventif du groupe  $G_l$  qui a été formulé par l'équation (3.18) est réécrit comme suit :

$$C_p^{(G_l)} = \sum_{i \in G_l} C_p^{(i)} - \underbrace{c_{ms} (|G_l| - \mathcal{I}_{\{\text{Aucun composant défaillant à } T_k\}})}_{\text{profit économique : PED}} - \underbrace{c_{psd} \left[ \sum_{i \in G_l} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_l \text{ est un groupe critique}\}} \prod_{j \in \Omega \setminus G_l} \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} \neq \tau_k^S\}} \right]}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé : PED ou NED}}, \quad (5.3)$$

où  $\Omega \setminus G_l$  est l'ensemble de tous les composants du système qui ne font pas partie du groupe  $G_l$  (donc  $j \neq i$ ) et :

- $\mathcal{I}_{\{\text{Aucun composant défaillant à } T_k\}} = 1$  s'il n'y a aucun composant défaillant dans l'ensemble  $\Omega$  à l'instant  $T_k$ , sinon  $\mathcal{I}_{\{\text{Aucun composant défaillant à } T_k\}} = 0$  ;
- $\prod_{j \in \Omega \setminus G_l} \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} \neq \tau_k^S\}} = 1$  si la panne d'un composant dans l'ensemble  $\Omega \setminus G_l$  ne conduit pas à la panne du système, sinon  $\prod_{j \in \Omega \setminus G_l} \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} \neq \tau_k^S\}} = 0$ .

Finalement, le facteur  $C_{G_l}^{GIF}(T_k)$  est obtenu en introduisant l'équation (5.3) dans l'expression (5.1).

Il est important de noter que pour la stratégie de maintenance proposée, les deux paramètres de décision de maintenance  $T$  (l'intervalle d'inter-inspection ou le cycle d'inspection) et  $R_p^S$  (le seuil de maintenance préventive du système) doivent être optimisés. Pour insister sur les rôles de ces paramètres dans cette stratégie, on l'appelle stratégie  $(T, R_p^S)$ . Dans la section suivante, on va construire un modèle de coût de maintenance afin de déterminer les valeurs optimales de  $T$  et  $R_p^S$ .

## 5.4 Optimisation de la stratégie de maintenance proposée

### 5.4.1 Critère de performance économique

De même qu'au chapitre 4, considérons la fonction  $C(u_t)$  de coût globale de maintenance du système cumulé jusqu'à l'usage  $u_t$  (où l'instant  $t$ ). Le critère de performance économique

utilisé est le coût moyen asymptotique :

$$C_{\infty}(T, R_p^S) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C(u_t)}{u_t}. \quad (5.4)$$

D'une manière identique à ce qui a été présentée dans la section 4.4 du chapitre 4, le coût moyen asymptotique de la stratégie proposée donné par l'équation (5.4) s'exprime comme suit :

$$C_{\infty}(T, R_p^S) = \frac{E[\sum_{k=1}^{N_b} C_k]}{E[T_{rem} - D(T_{rem})]}, \quad (5.5)$$

où :

- $C_k$  est le coût total d'exploitation du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection  $(T_{k-1}, T_k]$ , comprenant les coûts des remplacements, les coûts des pièces de rechange, les coûts d'inspection, les coûts de mise en œuvre de maintenance, les coûts d'indisponibilité. Il est imputé à la date d'inspection  $T_k$  ;
- $N_b$  est le nombre total de cycles d'inspection dans l'intervalle  $[0, T_{rem}]$  ;
- $D(T_{rem})$  est le temps total d'indisponibilité cumulé du système à l'instant  $T_{rem}$ .

## 5.4.2 Modèle mathématique d'évaluation et l'optimisation de maintenance

Le coût de maintenance associé au  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection  $C_k$  inclut les coût suivants :

$$C_k = C_k^{insp} + C_k^{corr} + C_k^{prev}, \quad (5.6)$$

où :

- $C_k^{insp}$  est le coût lié aux activités d'inspection sur les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  à l'instant  $T_k$  ;
- $C_k^{corr}$  est le coût lié aux activités de remplacement correctif effectuées sur les composants défectueux à l'instant  $T_k$  (il inclut le coût de mise en œuvre de maintenance et le coût d'indisponibilité du système) ;
- $C_k^{prev}$  est le coût lié aux activités de remplacement préventif effectuées sur le groupe optimal de composants survivants  $G_k^*$  à l'instant  $T_k$  (il inclut le coût de mise en œuvre de maintenance et le coût d'arrêt planifié du système).

### Coût d'inspection à l'instant $T_k$ , $C_k^{insp}$

Comme l'opération d'inspection est seulement réalisée sur les composants survivants à l'instant  $T_k$  de l'ensemble  $S_D$ , le coût d'inspection à  $T_k$  s'exprime donc par :

$$C_k^{insp} = c_{ins} (n - |S_A| - \sum_{j \in \Omega \setminus (G_k^* \cup S_A)} \mathcal{I}_{\{x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}\}}). \quad (5.7)$$

**Coût du remplacement correctif à l'instant  $T_k$ ,  $C_k^{corr}$** 

S'il n'y a aucun composant défaillant entre l'intervalle  $(T_{k-1}, T_k]$ , le coût lié aux activités de remplacement correctif  $C_k^{corr}$  vaut  $C_k^{corr} = 0$ . Sinon, sur la base de l'équation (3.17),  $C_k^{corr}$  est calculé par :

$$C_k^{corr} = \sum_{j \in \Omega \setminus G_k^*} (c_c^{(j)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(j)} = x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}) \vee (A_{T_k}^{(j)} = a_{T_k}^{(j)} \geq \tau^{(j)})\}} + \underbrace{[(T_k - \tau_k^S) c_d + c_{usd}] \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} = \tau_k^S\}}}_{\text{coût d'indisponibilité du système pendant } (T_{k-1}, T_k]},$$

$$- c_{ms} \left( \underbrace{\sum_{j \in \Omega \setminus G_k^*} \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(j)} = x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}) \vee (A_{T_k}^{(j)} = a_{T_k}^{(j)} \geq \tau^{(j)})\}} - 1}_{\text{profit économique à } T_k : \text{PED}} \right) \quad (5.8)$$

où  $\mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(j)} = x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}) \vee (A_{T_k}^{(j)} = a_{T_k}^{(j)} \geq \tau^{(j)})\}} = 1$  si le composant  $j$  est déjà tombé en panne, 0 sinon.

**Coût du remplacement préventif à l'instant  $T_k$ ,  $C_k^{prev}$** 

De la même manière, le coût lié aux activités de remplacement préventif  $C_k^{prev}$  est déterminé comme suit : si aucune action de remplacement préventif n'est effectuée l'instant  $T_k$ , alors  $C_k^{prev} = 0$ . Sinon, à partir de l'équation (3.16),  $C_k^{prev}$  est donné par :

$$C_k^{prev} = \sum_{i \in G_k^*} C_p^{(i)} - \underbrace{c_{ms} (|G_k^*| - \mathcal{I}_{\{\text{Aucun composant défaillant à } T_k\}})}_{\text{profit économique à } T_k : \text{PED}}$$

$$- c_{psd} \left[ \underbrace{\sum_{i \in G_k^*} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_k^* \text{ est un groupe critique}\}} \prod_{j \in \Omega \setminus G_k^*} \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} \neq \tau_k^S\}}}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé à } T_k : \text{PED ou NED}} \right]. \quad (5.9)$$

**Coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini  $C_\infty(T, R_p^S)$** 

Finalement, à partir des équations (5.5), (5.7), (5.8) et (5.9), le coût moyen asymptotique du système pendant sa mission peut-être déterminé comme suit :

$$C_\infty(T, R_p^S) = \frac{1}{E[T_{rem} - \sum_{k=1}^{N_b} (T_k - \tau_k^S)]} E \left\{ \sum_{k=1}^{N_b} \left[ c_{ins} (n - |S_A| - \sum_{j \in \Omega \setminus (G_k^* \cup S_A)} \mathcal{I}_{\{x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}\}}) + \sum_{i \in G_k^*} C_p^{(i)} \right. \right.$$

$$+ \sum_{j \in \Omega \setminus G_k^*} (c_c^{(j)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(j)} = x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}) \vee (A_{T_k}^{(j)} = a_{T_k}^{(j)} \geq \tau^{(j)})\}} + \underbrace{[(T_k - \tau_k^S) c_d + c_{usd}] \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} = \tau_k^S\}}}_{\text{coût d'indisponibilité pendant } (T_{k-1}, T_k]}$$

$$- c_{ms} \left( \underbrace{\sum_{j \in \Omega \setminus G_k^*} \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(j)} = x_{T_k}^{(j)} \geq Z^{(j)}) \vee (A_{T_k}^{(j)} = a_{T_k}^{(j)} \geq \tau^{(j)})\}} + |G_k^*| - 1}_{\text{profit économique à } T_k : \text{PED}} \right)$$

$$\left. - c_{psd} \left[ \sum_{i \in G_k^*} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_k^* \text{ est un groupe critique}\}} \prod_{j \in \Omega \setminus G_k^*} \mathcal{I}_{\{\tau^{(j)} \neq \tau_k^S\}} \right] \right\}. \quad (5.10)$$

coût d'arrêt planifié économisé à  $T_k$  : PED ou NED

### Détermination des paramètres optimaux de décision de maintenance

Les paramètres optimaux de  $T^*$  et  $R_p^{S*}$  de la règle de décision de maintenance pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  peuvent être obtenus en minimisant le coût moyen asymptotique  $C_\infty(T, R_p^S)$  dans l'équation (5.10) :

$$C_\infty(T^*, R_p^{S*}) = \min_{T, R_p^S} \left\{ C_\infty(T, R_p^S) \mid 0 < T, 0 \leq R_p^S \leq 1 \right\}. \quad (5.11)$$

## 5.5 Application numérique et analyse des performances de la stratégie proposée

Afin d'illustrer le comportement de la stratégie de maintenance prévisionnelle proposée du point de vue de la rationalisation de la maintenance de systèmes à structure complexe, on reprend l'exemple du système de 14 composants présenté dans la Figure 2.6 du chapitre 2. La structure de ce système peut-être n'importe quelle combinaison de structures classique séries, parallèle, série-parallèle ou parallèle-séries,  $k$ -sur- $n$ , ou même plus généralement n'importe quelle structure pour laquelle la fiabilité du système peut-être calculée à partir de la fiabilité de ses composants.

La performance de la stratégie proposée est soulignée par une comparaison avec une stratégie de maintenance prévisionnelle de type opportuniste, appelée stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ , qui a été récemment introduite pour des systèmes séries dans l'article [251] puis pour des systèmes  $k$ -sur- $n$  dans l'article [145]. La stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  dans cette étude est développée et appliquée pour le système complexe de 14 composants. La stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  est basée sur trois paramètres de décision : l'intervalle d'inter-inspection  $T$ , le seuil de remplacement préventif  $R_p$  et le seuil de remplacement préventif opportuniste  $R_{op}$  ( $0 \leq R_p < R_{op} \leq 1$ ) fixés pour tous les composants du système. Une description de cette stratégie de maintenance prévisionnelle opportuniste est présentée dans l'annexe A.

Afin de comparer la performance entre deux stratégies, le gain relatif entre la performance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  et celle de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  est utilisé comme un critère d'évaluation. Il est noté  $GR$  et s'exprime :

$$GR = \frac{C_\infty(T^*, R_p^*, R_{op}^*) - C_\infty(T_{TR}^*, R_p^{S*})}{C_\infty(T^*, R_p^*, R_{op}^*)} \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

où :  $T^*$ ,  $R_p^*$  et  $R_{op}^*$  ( $T_{TR}^*$  et  $R_p^{S*}$ , respectivement) sont les paramètres de décision optimaux de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  (respectivement de la stratégie  $(T, R_p^S)$ ). Selon cette définition,

- si  $GR < 0$ , ceci signifie que la stratégie  $(T, R_p^S)$  est moins profitable que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  ;
- si  $GR > 0$ , la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus profitable que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  ;

- si  $GR = 0$ , on dit que les deux stratégies ont le même profit.

Dans cette section, le comportement de dégradation de chaque composant  $i$  est décrit par le processus stochastique Gamma homogène  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$  ( $i = 1, 2, \dots, 14$ ). L'incrément de dégradation entre deux instants  $T_k$  et  $T_{k+1}$  suit une loi de probabilité de densité Gamma avec des paramètres de forme  $\alpha^{(i)} (T_{k+1} - T_k) \in \mathbb{R}^{+*}$  et des paramètres d'échelle  $\beta^{(i)} \in \mathbb{R}^{+*}$ . Le seuil de défaillance pour le composant  $i$  est noté  $Z^{(i)}$ . De cette façon, la fiabilité provisionnelle du composant  $i$  est prédite en utilisant l'équation (3.7). La fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle du système  $R^S(T_{k+1}|x_{T_k}^{(1:14)})$  est alors obtenue en utilisant l'équation (3.12) ou (3.13).

Finalement, on considère le système caractérisé par l'ensemble des données rassemblées dans le tableau 5.1.

TABLE 5.1 – L'ensemble de données du système cohérent de 14 composants.

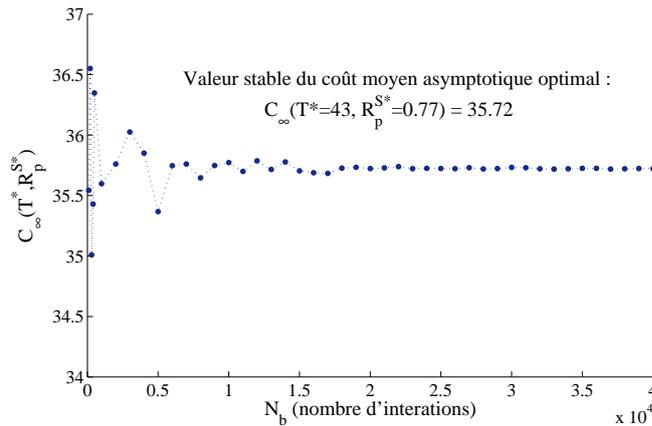
| $c_{ins} = 5, c_{ms} = 30, c_d = 325, c_{usd} = c_{psd} = 160$ |                |               |           |             |             |           |                |               |           |             |             |
|--|----------------|---------------|-----------|-------------|-------------|-----------|----------------|---------------|-----------|-------------|-------------|
| Composant  | $\alpha^{(i)}$ | $\beta^{(i)}$ | $Z^{(i)}$ | $c_p^{(i)}$ | $c_c^{(i)}$ | Composant | $\alpha^{(i)}$ | $\beta^{(i)}$ | $Z^{(i)}$ | $c_p^{(i)}$ | $c_c^{(i)}$ |
| 1  | 0.5            | 1             | 30        | 130         | 195         | 8         | 1.1            | 1.5           | 35        | 140         | 210         |
| 2  | 0.5            | 1             | 30        | 130         | 195         | 9         | 1.4            | 1.7           | 42        | 130         | 195         |
| 3  | 0.4            | 1.5           | 32        | 250         | 375         | 10        | 0.85           | 1.2           | 38        | 100         | 150         |
| 4  | 0.55           | 0.9           | 34        | 180         | 270         | 11        | 1              | 1             | 40        | 100         | 150         |
| 5  | 0.6            | 1.1           | 27        | 150         | 275         | 12        | 0.65           | 1.4           | 28        | 200         | 300         |
| 6  | 0.7            | 1.1           | 27        | 150         | 275         | 13        | 0.8            | 1.5           | 31        | 210         | 315         |
| 7  | 0.3            | 1.2           | 20        | 120         | 180         | 14        | 0.7            | 1.25          | 30        | 180         | 270         |

### 5.5.1 Optimisation de la stratégie proposée et de la stratégie $(T, R_p, R_{op})$

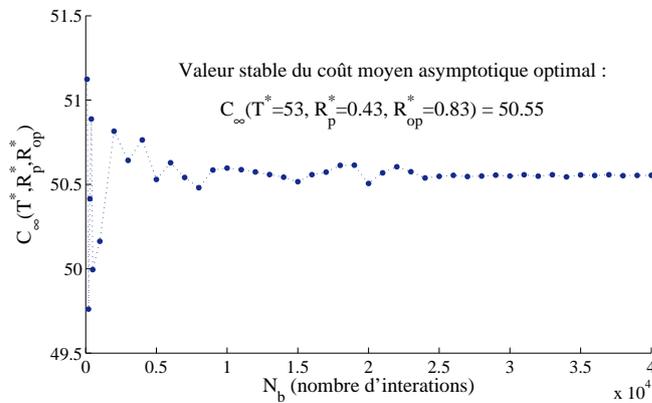
Pour évaluer le coût moyen asymptotique de chaque stratégie, un grand nombre de réalisations de simulation est généré. Les coûts moyens asymptotiques des stratégies  $(T, R_p^S)$  et  $(T, R_p, R_{op})$  sont évalués pour différentes valeurs de  $\{T, R_p^S\}$  et de  $\{T, R_p, R_{op}\}$  en utilisant les équations (5.10) et (A.1) (voir la section A.2 de l'annex A), respectivement. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  : le coût moyen asymptotique minimal  $C_\infty(T^*, R_p^{S*}) = 35.7216$  correspond à l'intervalle d'inter-inspection optimal  $T^* = 43$  et le seuil optimal de maintenance préventive du système  $R_p^{S*} = 0.77$ .
- Pour la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  : le coût moyen asymptotique minimal  $C_\infty(T^*, R_p^*, R_{op}^*) = 50.5536$  correspond à l'intervalle d'inter-inspection optimal  $T^* = 53$  et le seuil optimal de maintenance préventive  $R_p^* = 0.43$  et le seuil optimal de maintenance opportuniste  $R_{op}^* = 0.83$ .

La convergence du coût moyen asymptotique par rapport au nombre d'itérations de simulation de deux stratégies est illustrée sur la figure 5.2. La sous-figure 5.2(a) montre que la convergence



(a) Stratégie  $(T, R_p^S)$



(b) Stratégie  $(T, R_p, R_{op})$

FIGURE 5.2 – Évaluation de convergence des coûts moyens asymptotiques minimaux de deux stratégies, où : (a) la stratégie  $(T, R_p^S)$  considérant à  $T^* = 43$  et  $R_p^{S*} = 0.77$  et (b) la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  considérant à  $T^* = 53$ ,  $R_p^* = 0.43$  et  $R_{op}^* = 0.83$ .

du coût moyen asymptotique optimal de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est stable à partir de  $N_b \geq 18,000$  cycles d'inspection, tandis que celui de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ , sur la sous-figure 5.2(b), est stable à partir de  $N_b \geq 26,000$  cycles d'inspection. L'optimisation de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est assez simple à mener à bien car elle se base sur seulement deux variables de décision  $T$  et  $R_p^S$ , tandis que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  nécessite l'optimisation des trois variables de décision  $T$ ,  $R_p$  et  $R_{op}$ . La convergence de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  est plus lente que celle de la stratégie  $(T, R_p^S)$ .

Selon les résultats obtenus, le gain relatif est d'environ  $GR \simeq 29.34\%$ . Ceci signifie que la stratégie de maintenance proposée est significativement plus efficace que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ . Ceci peut-être expliqué par le fait que la prise de décision de maintenance basée au niveau du système et le regroupement des activités en maintenance préventive basée sur le facteur d'amé-

lioration de fiabilité basé sur le coût conduisent à une réduction significative du coût de maintenance.

Pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ , le coût moyen asymptotique avec différentes valeurs de  $T$  et  $R_p^S$  est tracé dans la figure 5.3. Il apparaît clairement que la surface de coût de maintenance a une forme

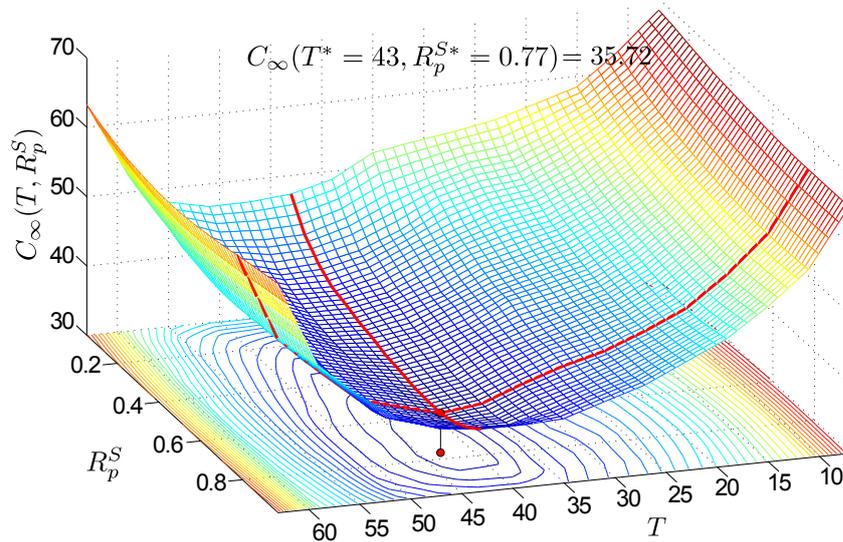


FIGURE 5.3 – Coût moyen asymptotique de la stratégie proposée en fonction de  $T$  et  $R_p^S$ .

convexe et la solution optimale globale existe. Les impacts de la maintenance préventive sur la fiabilité prévisionnelle du système sont illustrés dans la figure 5.4 dans le cas  $T^* = 43$  et  $R_p^{S*} = 0.77$ . Les résultats montrent que quand la fiabilité prévisionnelle du système tombe sous le seuil

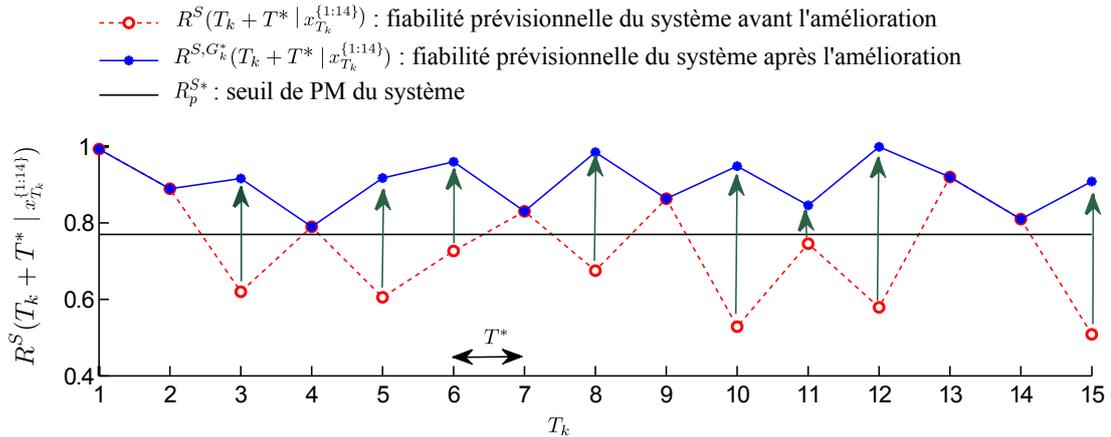


FIGURE 5.4 – Relation de la fiabilité prévisionnelle du système avant et après les opérations d'amélioration.

optimal de maintenance préventive  $R_p^{S*} = 0.77$  (à l'instant  $T_k^-$ ), l'exigence d'amélioration du système est déclenchée. Un groupe optimal  $G_k^*$  est alors sélectionné pour le remplacement

préventif. Par conséquent, la fiabilité du système après la maintenance préventive est augmentée à une valeur supérieure au seuil  $R_p^{S*}$ .

Une comparaison courte de deux stratégies  $(T, R_p, R_{op})$  et  $(T, R_p^S)$  sera également proposée pour un système à structure séries dans la sous-section 5.5.3. Le gain relatif entre deux stratégies peut dépendre des paramètres du système et notamment des coûts d'opération tels que le coût d'inspection, le coût de mise en œuvre de maintenance, le coût d'arrêt planifié/non-planifié du système et le taux du coût d'indisponibilité. Dans les sous-sections suivantes, différentes analyses de sensibilité pour les deux stratégies de maintenance sont menées.

### 5.5.2 Étude de sensibilité aux deux stratégies de maintenance

Afin d'observer la tendance du gain relatif entre le coût de maintenance des deux stratégies, cette sous-section est consacrée à la présentation de différentes analyses de sensibilité aux paramètres de coûts mentionnés ci-dessus. La performance de la stratégie proposée est comparée à celle de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ . L'analyse de sensibilité est effectuée séparément sur chaque paramètre de coût considéré en le faisant varier, tandis que les autres restent fixés. Les résultats numériques obtenus sont présentés dans la Figure 5.5 pour le coût de mise en œuvre et le coût d'arrêt planifié, et la Figure 5.6 pour le coût d'inspection et le taux du coût d'indisponibilité. Pour ces figures, chaque point des courbes du gain relatif est obtenu à partir de coûts moyens asymptotiques respectifs de deux stratégies. Les analyses de sensibilité sont résumées comme suit : Pour considérer l'impact du coût d'inspection  $c_{ins}$  sur les deux stratégies, on le fait varier dans un intervalle assez large de zéro à 100 avec un pas égal à 5 en fixant  $c_{ms} = 15$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_e = 20$ ,  $c_d = 400$  et  $c_{usd} = 200$ .

- La sous-figure 5.5(a) est obtenue en faisant varier le coût de mise en œuvre  $c_{ms}$  sur un intervalle assez large de zéro à 90 unités de coût avec un pas égal à 15 et fixant les paramètres restants du système comme dans le Tableau 5.1 ;
- La sous-figure 5.5(b) est obtenue en faisant varier le coût d'arrêt planifié  $c_{psd}$  (noté ici que  $c_{usd} = c_{psd}$ ) sur un intervalle de zéro à 640 avec un pas égal à 80 et fixant les paramètres restants du système comme dans le Tableau 5.1 ;
- La sous-figure 5.6(a) est obtenue en faisant varier le coût d'inspection  $c_{ins}$  sur un intervalle assez large de 1 à 19 unités de coût avec un pas égal à 2 et fixant les paramètres restants du système comme dans le Tableau 5.1 ;
- La sous-figure 5.6(b) est obtenue en faisant varier le taux du coût d'indisponibilité  $c_d$  dans un intervalle assez large de 0 à 1000 unités de coût avec un pas égal à 100 et fixant les paramètres restants du système comme dans le Tableau 5.1 ;

**Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre de maintenance et au coût d'arrêt planifié du système :**

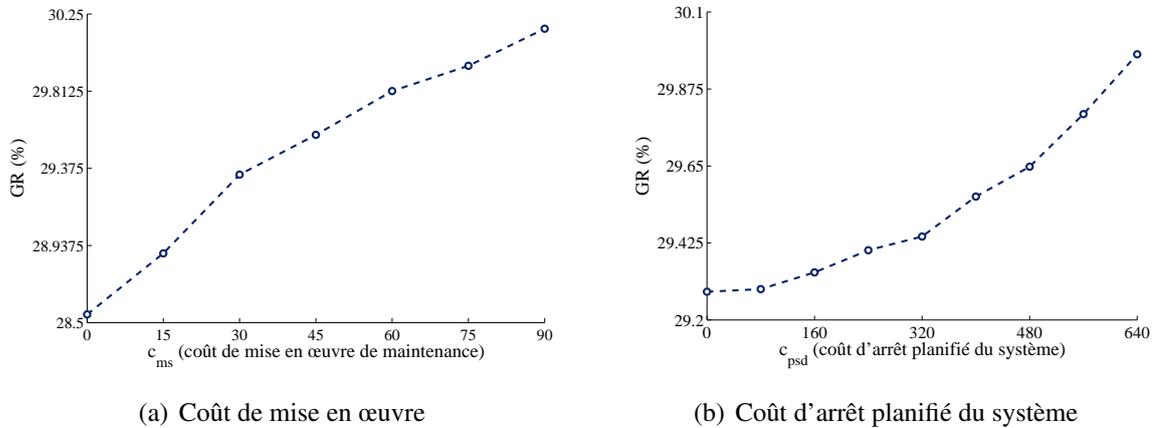


FIGURE 5.5 – Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre et au coût d'arrêt planifié du système.

Comme montré dans la Figure 5.5, les deux gain relatifs augmentent lorsque le coût de mise en œuvre et le coût d'arrêt planifié du système augmentent, respectivement.

- (a) *Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$*  : la sous-figure 5.5(a) montre l'impact du coût de mise en œuvre sur le coût de maintenance des deux stratégies. Quand  $c_{ms}$  augmente, le coût de maintenance des deux stratégies augmente aussi. Cependant, la vitesse d'augmentation du coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  est plus rapide que celle de la stratégie  $(T, R_0)$ . En d'autres termes, plus le coût de mise en œuvre est important, plus le gain relatif est élevé. En effet, la stratégie  $(T, R_0)$  permet éviter des opérations de maintenance inutiles sur le système grâce à la prise de décisions au niveau du système. Elle exploite plus les opportunités que l'autre pour remplacer préventivement certains groupes de composants afin d'économiser le coût de mise en œuvre. Cela démontre l'efficacité de la stratégie de regroupement de maintenance de la stratégie proposées  $(T, R_0)$ .
- (b) *L'analyse de sensibilité au coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$*  : la sous-figure 5.5(b) montre l'influence du coût d'arrêt planifié du système sur le coût de maintenance pour les deux stratégies. L'impact de  $c_{psd}$  est similaire à celui de  $c_{ms}$ . Le coût  $c_{psd}$  est pris en compte pour constituer les groupes optimaux de composants à remplacer préventivement à l'instant d'inspection par le biais du facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût. Cela permet à la stratégie  $(T, R_0)$  d'éviter activement des arrêts planifiés inutiles (réduisant le dépendance économique négative) dus à des interventions de maintenance préventive sur des coupes minimales du système. En conséquence, la stratégie  $(T, R_0)$  est plus rentable que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  quand  $c_{psd}$  augmente. En effet, on peut voir à nouveau dans la sous-figure 5.5(b) que le gain relatif augmente rapidement avec  $c_{psd}$ .

Ceci montre un avantage important de la stratégie proposée ( $T, R_0$ ) lorsque la coût d'arrêt planifié du système est élevé.

Ces deux études de cas (c-à-d. l'influence du coût de mise en œuvre de maintenance et du coût d'arrêt planifié du système sur les deux stratégies de maintenance) montrent que le contrôle des paramètres de décision de la stratégie proposée est meilleur que celui de l'autre stratégie pour le système à composants multiples avec structure complexe envisagé. Elle permet de mieux exploiter des interactions entre composants par un renforcement des effets positifs de la dépendance économique positive et une réduction de la dépendance économique positive entre composants du système.

**Analyse de sensibilité au coût d'inspection et au taux du coût d'indisponibilité du système :**

La Figure 5.6 montre l'influence du coût d'inspection et du taux du coût d'indisponibilité du système qui est opposée à celle du coût de mise en œuvre et du coût d'arrêt planifié du système. En d'autres termes, le gain relatif est une fonction décroissante de  $c_{ins}$  et de  $c_d$ , respectivement.

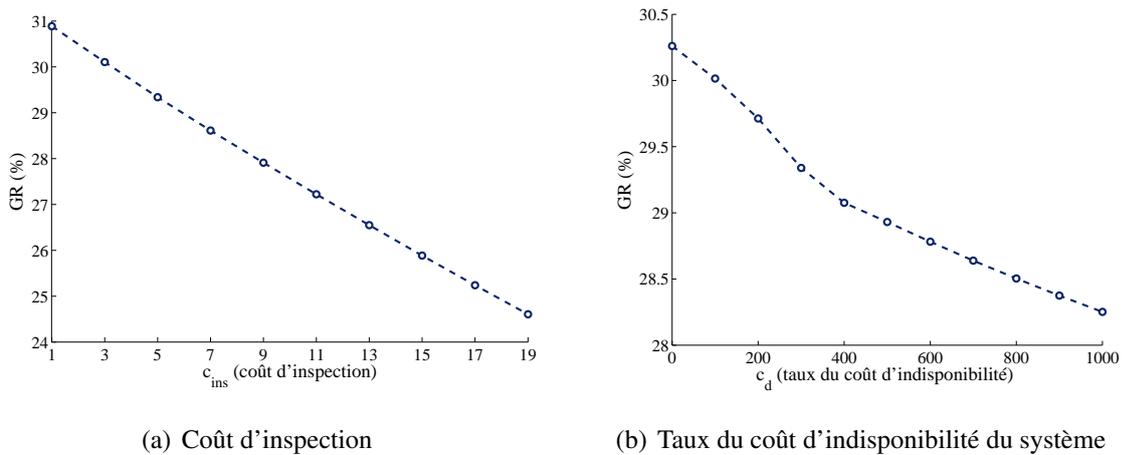


FIGURE 5.6 – Analyse de sensibilité au coût d'inspection et au taux du coût d'indisponibilité du système.

(a) *L'analyse de sensibilité au coût d'inspection  $c_{ins}$*  : Les résultats montrés par la sous-figure 5.6(a) peuvent être expliquée par le coût d'inspection. Lorsqu'il augmente, l'intervalle inter-inspections optimal des deux stratégies est élevé pour éviter des inspections trop fréquentes. Les résultats obtenus après l'optimisation de performances des deux stratégies montrent que l'intervalle inter-inspection optimal pour la stratégie ( $T, R_p, R_{op}$ ) ( $T^* = 53$  par exemple) est toujours beaucoup plus grand que celui de la stratégie ( $T, R_p^S$ ) ( $T^* = 43$  par exemple). Le nombre d'inspections de la stratégie ( $T, R_p^S$ ) est donc supérieur à celui de la stratégie ( $T, R_p, R_{op}$ ) durant la mission du système. En conséquence, le

coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  augmente plus rapidement, et la fonction du gain relatif est donc une fonction décroissante comme illustré sur la sous-figure 5.6(a).

- (b) *L'analyse de sensibilité au taux du coût d'indisponibilité du système  $c_d$*  : Les résultats obtenus sur les analyses de sensibilité au taux du coût d'indisponibilité du système  $c_d$  montrent que les coûts de maintenance des deux stratégies augmentent fortement avec l'augmentation de  $c_d$ . Lorsque  $c_d$  augmente, les seuils de maintenance préventive (c-à-d.  $R_p, R_{op}, R_p^S$ ) des deux stratégies augmentent et les intervalle d'inter-inspection décroissent. Cela signifie que les composants du système sont remplacés plus tôt (par rapport à leur niveau de dégradation courant) pour éviter des coûts de pénalité en raison de la panne du système. Le gain relatif dans ce cas est une fonction décroissante de  $c_d$  comme indiquée dans la sous-figure 5.6(b). Comme mentionné précédemment, ceci peut s'expliquer par le fait que la stratégie  $(T, R_p^S)$  tend à retarder les réparations des composants moins critiques jusqu'au instants d'inspections. La viabilité du système peut n'est pas assuré autant qu'avec la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ . En conséquence, l'augmentation de  $C_\infty(T, R_0)$  est plus rapide que celle de  $C_\infty(T, R_p, R_{op})$  lorsque  $c_d$  augmente.

### 5.5.3 Evaluation des performances des deux stratégies effectuée sur le système en série

Afin d'étudier l'influence de la structure du système sur les deux stratégies, un sous-système en série de 5 composants (les composants 7, 8, 9, 10, 11) est extrait du système donné dans la figure 2.6 du chapitre 2. Sa perte de production peut être inférieure à celle du système entier complexe. Dans cette sous-section, les paramètres de coûts considérés sont plus faibles que précédemment :  $c_d = 90$ ,  $c_{usd} = c_{psd} = 45$ . Le processus d'optimisation et d'analyses de sensibilité est similaire à celui proposé dans les sous-sections 5.5.1 et 5.5.2.

#### Optimisation des deux stratégies :

Les coûts moyens asymptotiques de la stratégie  $(T, R_p^S)$  et de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  sont évalués respectivement avec les différentes valeurs de  $\{T, R_p^S\}$  et de  $\{T, R_p, R_{op}\}$  en utilisant les équations (5.10) et (A.1) (voir la section A.2 de l'annexe A). Les résultats obtenus sont les suivants :

- Pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  : le coût moyen asymptotique minimal est  $C_\infty(T^*, R_p^{S*}) = 20.551$  ; l'intervalle inter-inspection optimal est  $T^* = 34$  et le seuil optimal de maintenance préventive du système est  $R_p^{S*} = 0.116$  ;
- Pour la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  : le coût moyen asymptotique minimal est  $C_\infty(T^*, R_p^*, R_{op}^*) = 20.458$  ; l'intervalle inter-inspection optimal est  $T^* = 34$ , le seuil optimal de maintenance

préventive et le seuil optimal de maintenance opportuniste sont respectivement  $R_p^* = 0.55$  et  $R_{op}^* = 0.85$ .

Le gain relatif obtenu dans ce cas est environ  $-0.454\%$  qui montre que la stratégie  $(T, R_p^S)$  semble être moins performante économiquement que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ . L'influence de certains paramètres de coût du système (le coûts d'inspection, le coût de mise en œuvre, le coût d'arrêt planifié du système ainsi que le taux de coût d'indisponibilité) sur le gain relatif sera étudiée ci-après à travers différentes analyses de sensibilité.

### Analyse de sensibilité aux paramètres de coût :

L'analyse de sensibilité par rapport à chaque paramètre de coût considéré est réalisée en faisant varier un paramètre tandis que les autres paramètres du sous-système sont fixés. Les résultats numériques obtenus à partir des quatre paramètres sont présentés dans la Figure 5.7, où :

- la sous-figure 5.7(a) est obtenue en faisant varier le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$  de 0 à 90 avec un pas égal à 15 unités de coût et en prenant  $c_{ins} = 5$ ,  $c_d = 90$ ,  $c_{usd} = c_{psd} = 45$  ;
- la sous-figure 5.7(b) est obtenue en faisant varier le coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$  de 0 à 180 avec un pas égal à 22.5 unités de coût et en assignant  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 30$ ,  $c_d = 90$  (noté ici que  $c_{usd} = c_{psd}$ ) ;
- la sous-figure 5.7(c) est obtenue en faisant varier le coût d'inspection  $c_{ins}$  de 1 à 19 avec un pas égal à 2 unités de coût et en considérant  $c_{ms} = 30$ ,  $c_d = 90$ ,  $c_{usd} = c_{psd} = 45$  ;
- la sous-figure 5.7(d) est obtenue en faisant varier le coût unitaire d'indisponibilité  $c_d$  de 0 à 300 avec un pas égal à 30 unités de coût et en assignant  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 30$ ,  $c_{usd} = c_{psd} = 45$ .

Tous les autres paramètres sont fixés dans le tableau 5.1.

La figure 5.7 montre que tous les gains relatifs sont légèrement négatifs. Ceci confirme à nouveau que la stratégie  $(T, R_p^S)$  est légèrement moins rentable que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  dans le cas du système en série. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'un système à composants multiples en série n'est jamais plus fort que son lien/nœud le plus faible. Donc, on ne devrait pas investir trop de ressources de maintenance afin d'améliorer la fiabilité de la plupart de composants dans le système alors que seul un composant est responsable du niveau très bas de fiabilité. La stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  prend les décisions de maintenance au niveau du composant en combinaison avec la maintenance opportuniste et tous les composants du système sont considérés au même niveau de priorité pour l'amélioration de fiabilité. Elle est plus appropriée pour des structures en séries que la stratégie  $(T, R_p^S)$ . En somme, pour des systèmes à composants multiples en séries, utiliser le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût pour la prise de décisions

### 5.5. Application numérique et analyse des performances de la stratégie proposée

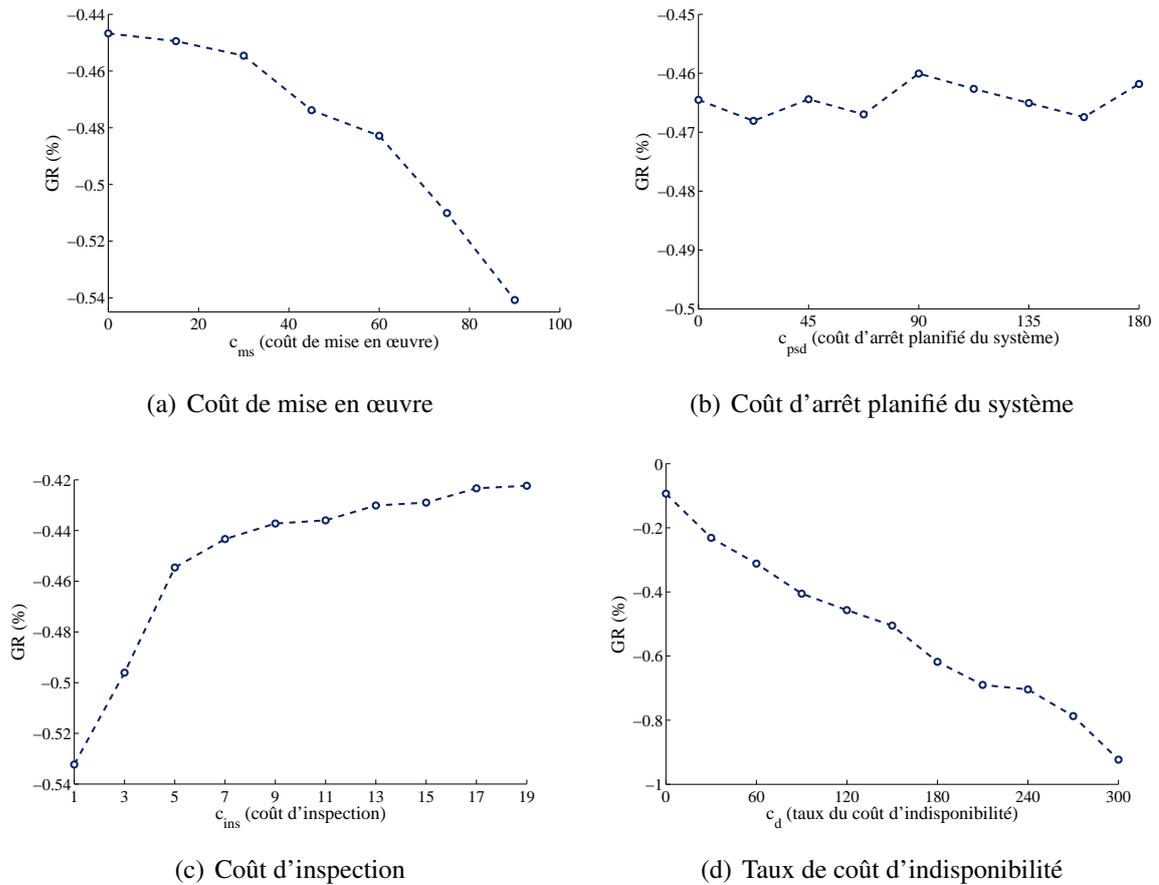


FIGURE 5.7 – Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre de maintenance, au coût d'arrêt planifié du système, au coût d'inspection au taux de coût d'indisponibilité.

de maintenance est inutile. La stratégie de maintenance à considérer devrait décider des actions de maintenance au niveau du composant et combiner avec la maintenance opportuniste. Cette conclusion a également été tirée par Li dans l'article [172].

Les quelques conclusions supplémentaires suivantes sont issues de différentes comparaisons des performances obtenues pour les deux stratégies à partir de plusieurs ensembles de paramètres de coût d'opération, d'une part sur un système en série et d'autre part sur un système à structure complexe,. Dans le cas de systèmes en série, le gain relatif  $GR$  est légèrement négatif (de l'ordre de  $-0.5\%$ ) pour tous les cas de test. En revanche, dans le cas général de systèmes à structure complexe, le gain relatif est très positive (plus de  $20\%$ ) dans la grande majorité des cas de test. La stratégie  $(T, R_p^S)$ , basée sur la prise de décisions de maintenance préventive au niveau du système, a prouvé son efficacité d'intégration d'informations sur la structure du système dans le processus de décision. La stratégie proposée est efficace du point de vue de la dépendance économique positive et évite activement des arrêts inutiles du système du point de vue la dépendance économique négative. Plus les coûts  $c_s$  et  $c_{psd}$  sont importants,

plus la stratégie  $(T, R_p^S)$  est rentable. Le choix des groupes de composants pour la maintenance préventive est réalisé non seulement sur la base de leur fiabilité, mais aussi sur les coûts engagés vis à vis de la capacité à améliorer la fiabilité du système. Cela permet avec la stratégie  $(T, R_p^S)$  de remplacer préventivement des composants plus importants, et de mettre en attente des composants moins importants (composants dont la capacité d'amélioration de la fiabilité est faible, mais le coût de remplacement très cher, par exemple). Ainsi, la stratégie  $(T, R_p^S)$  permet plus d'économies dans le coût de maintenance que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$ , principalement si  $c_{insp}$  et  $c_d$  sont faibles.

Il est important de noter que la stratégie de maintenance proposée est assez simple à mettre en œuvre puisque seulement deux variables de décision  $T$  et  $R_p^S$  doivent être considérées, alors que la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  nécessite l'optimisation des trois variables de décision.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle stratégie de maintenance prévisionnelle avec une approche de décision multi-niveaux est proposée. Elle est développée pour des systèmes à composants multiples avec structure complexe. La fiabilité prévisionnelle, les dépendances économiques positive et négative ainsi que la structure du système sont prises en compte dans le processus de prise de décisions qui est structuré suivant deux niveaux : un niveau système et un niveau composant. Le premier niveau vise à déclencher des interventions de maintenance préventive sur le système, tandis que le deuxième niveau adresse la sélection optimale du groupe de plusieurs composants à maintenir préventivement. Pour cela, le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût est utilisé chaque fois qu'une exigence d'amélioration du système est déclenchée. Grâce au processus de décision à deux niveaux, la stratégie de maintenance proposée est plus flexible et efficace pour des systèmes à structure complexe, au moins par comparaison avec une stratégie de maintenance efficace existante. Par ailleurs, les résultats numériques obtenus montrent que dans le cas particulier de systèmes avec structure en série, la performance de la stratégie de maintenance proposée est légèrement inférieure à celle de la stratégie existante spécifiquement adaptée. Néanmoins, le nombre de variables de décision reste très faible. Ce point peut être considéré comme un avantage pour le processus d'optimisation de maintenance.

# Chapitre 6

## Comparaison de performance de deux stratégies de maintenance proposées

### 6.1 Introduction

À la différence de la plupart des stratégies de maintenance conditionnelle existantes, les fiabilités prévisionnelles du système et de ses composants est exploitée pour proposer respectivement :

- dans le chapitre 4, une stratégie de maintenance prévisionnelle, qui est appelée stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , dans laquelle la fiabilité prévisionnelle et le facteur d'importance structurel sont exploités pour construire les règles de décision de maintenance préventive. L'importance des composants et leur criticité, temporaire ou non, sont également envisagés pour le regroupement des opérations de maintenance corrective ;
- dans le chapitre 5, une autre stratégie de maintenance prévisionnelle, qui est appelée stratégie  $(T, R_p^S)$ , dans laquelle les fiabilités prévisionnelles du système et de ses composants, le facteur d'amélioration de fiabilité basé sur le coût sont utilisés pour la construction des règles de décision de maintenance préventive.

L'efficacité de chaque stratégie a été démontrée par comparaison avec des stratégies de maintenance conditionnelle efficaces « classiques ».

Dans ce chapitre, l'objectif est de comparer les performances des deux stratégies proposées et de montrer les avantages et désavantages de chaque stratégie. Les deux stratégies sont appliquées pour la maintenance d'un même système complexe. Ce chapitre est organisé de façon suivante. D'abord, des caractéristiques importantes et une comparaison qualitative de deux stratégies de maintenance sont présentées dans la section 6.2. Ensuite, le cas d'étude d'un système complexe avec ses paramètres caractéristiques est proposé dans la section 6.3. La section 6.4 s'intéresse à l'optimisation de performances du système pour les deux stratégies. La section 6.5

propose des analyses de sensibilité de deux stratégies par rapport aux paramètres du système. Finalement, nous présentons dans la section 6.6 quelques conclusions et perspectives issues de cette étude.

## 6.2 Rappel des caractéristiques importantes et comparaison qualitative de deux stratégies de maintenance proposées

Les deux stratégies sont sujets à l'inspection périodique et prennent en compte dans la prise de décision de maintenance prévisionnelle :

- des informations conditionnelles de pronostic (fiabilité prévisionnelle/RUL conditionnelle) de tous les composants ;
- la structure du système et la dépendance structurelle entre composants du point de vue de la fiabilité (dans le sens où les composants contribuent à la défaillance du système selon la structure du système considéré) ;
- la dépendance d'états (marche/panne) entre composants dans le système ;
- les aspects positifs de regroupement tels que l'économie de coûts de mise en oeuvre et d'arrêt planifié (la PED) et les impacts négatifs du regroupement sur le fonctionnement du système qui dépendent de la structure du système (la NED).

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle des systèmes multi-composants, l'utilisation de la fiabilité prévisionnelle au lieu du niveau de dégradation pour prendre des décisions de maintenance peut permettre de construire un modèle de maintenance plus efficace et robuste par rapport aux erreurs de mesure [148], facile à optimiser [145]. En conséquence les deux stratégies proposées devraient être recommandées pour la maintenance des systèmes à composants multiples, notamment des systèmes avec un grand nombre de composants et une structure complexe.

Hormis les caractéristiques générales mentionnées ci-dessus, chaque stratégie possède ses caractéristiques propres. Ainsi, dans des applications réelles, le meilleur choix entre la stratégie  $(T, R_p^S)$  ou la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  doit se baser sur leur caractéristiques spécifiques présentées dans le Tableau 6.1.

## 6.3 Cas d'étude

Nous reprenons le système à 12 composants présenté sur la figure 4.3 du chapitre 4. Les hypothèses liées à la détérioration de chaque composant sont été présentées dans la section 4.5 (du chapitre 4). Les paramètres caractéristiques des 12 composants du système tels que les paramètres de forme  $\alpha^{(i)}$  et de d'échelle  $\beta^{(i)}$ , le seuil fixé de défaillance  $Z^{(i)}$ , le coût de rem-

TABLE 6.1 – Caractéristiques spécifiques de deux stratégies de maintenance proposées

| Stratégie $(T, R_p^{(i)})$   | Stratégie $(T, R_p^S)$  |
|--|---|
| <p>À la date d'inspection :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ la prise de décisions de PM ne considère que le niveau du composant, donc le regroupement d'activités de maintenance (la PED) est plus ou moins efficace ;</li> <li>○ le choix de composants pour la PM est simple, car un composant est sélectionné sur la base du facteur d'importance structurel et de la fiabilité conditionnelle ;</li> <li>○ cette stratégie peut éviter passivement des arrêts planifiés du système (NED) ;</li> </ul> <p>L'opération de maintenance corrective est groupée à partir des opportunités de panne du système. La stratégie permet de minimiser le temps d'indisponibilité du système ;</p> <p>Deux paramètres de décision doivent être optimisés : <math>T</math> et <math>\omega_p</math>.<br/>L'optimisation est aisée ;</p> <p>Cette stratégie est moins flexible et moins robuste ;</p> | <p>À la date d'inspection :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ la prise de décisions de PM se base sur les deux niveaux (système et composant), donc le regroupement d'activités de maintenance (PED) est plus efficace ;</li> <li>○ le choix de composants pour la PM est plus complexe à travers l'algorithme de recherche du meilleur groupe de composants, notamment pour les systèmes avec un grand nombre de composants ;</li> <li>○ cette stratégie peut éviter activement des arrêts planifiés du système (NED) ;</li> </ul> <p>L'opération de maintenance corrective est retardée jusqu'à la date d'inspection. Donc, minimiser la durée d'indisponibilité du système devient difficile ;</p> <p>Deux paramètres de décision doivent être optimisés : <math>T</math> et <math>R_p^S</math>. Cependant, l'optimisation reste complexe en raison de la complexité de la procédure de recherche du groupe optimal ;</p> <p>Cette stratégie est plus flexible et robuste grâce à un meilleur contrôle de la fiabilité du système. Le choix des composants pour la PM basé sur le facteur d'amélioration basé sur coût.</p> |

placement préventif  $c_p^{(i)}$  et correctif  $c_c^{(i)}$ , la valeur du facteur d'importance structurel  $I_B^{(i)}$  ainsi que le coût d'inspection  $c_{ins}$ , le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$ , le coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$ , le coût d'arrêt non-planifié du système  $c_{usd}$ , le coût de commande urgente  $c_e$  sont inchangés comme les donnés dans le tableau 4.2 (du chapitre 4) et le taux de coût d'indisponibilité  $c_d = 400$ .

Les paramètres liés aux coûts d'opération du système qui seront utilisés dans l'analyse de sensibilité sont rappelés dans le Tableau 6.2.

TABLE 6.2 – Paramètres liés aux coûts d'intervention du système.

| $c_{ins}$ | $c_{ms}$ | $c_e$ | $c_d$ | $c_{usd}$ | $c_{psd}$ |
|-----------|----------|-------|-------|-----------|-----------|
| 5         | 15       | 20    | 400   | 200       | 20        |

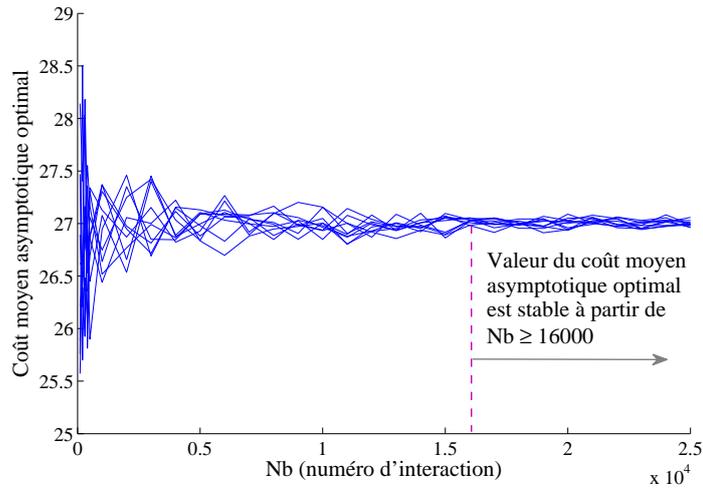
## 6.4 Optimisation de maintenance de deux stratégies proposées

Afin d'évaluer le coût moyen asymptotique de chaque stratégie, un grand nombre de réalisations de simulation doit être simulé.

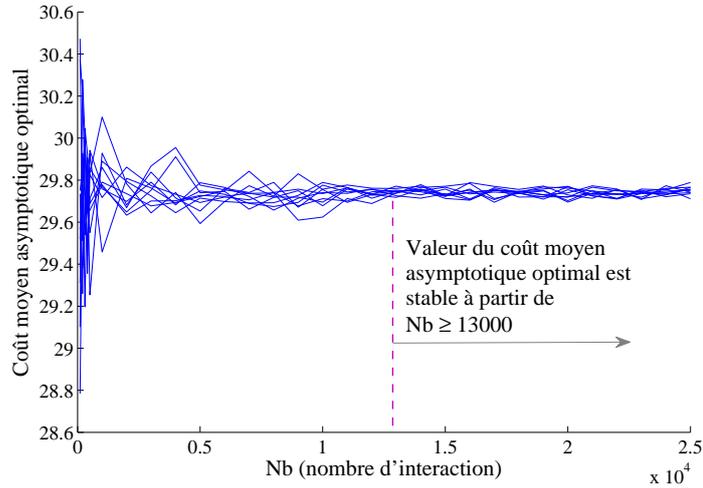
- Pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , le processus d'évaluation a été présenté dans le paragraphe 4.5.1 et les résultats optimaux suivants obtenus : le coût moyen asymptotique minimal est 29.742 unités de coût. Il correspond à l'intervalle d'inter-inspection optimal  $T^* = 60$  unités de temps et au coefficient de PM optimal  $\omega_p^* = 3.91$ . Les seuils optimaux de PM pour les composants sont déterminés à partir du coefficient  $\omega^*$ . Ils sont donnés dans le tableau 4.3) du chapitre 4.
- Pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ , le coût moyen asymptotique est évalué pour différentes valeurs de l'intervalle inter-inspection  $T$  et du seuil de maintenance préventive du système  $R_p^S$  en utilisant l'équation (5.10). Le coût moyen asymptotique minimal obtenu, en utilisant l'équation (5.11), est de 27.011 unités de coût. Il correspond aux valeurs optimales de l'intervalle d'inter-inspection  $T^* = 49$  et du seuil de maintenance préventive du système  $R_p^{S*} = 0.864$ .

La figure 6.1 montre la convergence du coût moyen asymptotique optimal de chaque stratégie par rapport au nombre d'itérations de simulation. La sous-figure 6.1(a) montre que la convergence de  $C_\infty(T^*, R_p^{S*})$  de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est atteinte à partir de  $N_b \geq 16,000$  itérations, tandis que celle de  $C_\infty(T^*, R_p^{(i)*})$  de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , donnée dans la sous-figure 6.1(b), est atteinte à partir de  $N_b \geq 13,000$  itérations. Ceci est dû au processus de sélection du meilleur groupe de composants à remplacer préventivement de la stratégie  $(T, R_p^S)$  qui est plus complexe que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . Plus précisément, le groupe optimal de composants de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est déterminé en utilisant l'algorithme de recherche de groupe optimal, tandis que la détermination du groupe optimal de composants de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  n'est basé que sur le résultat de comparaison entre la fiabilité de chaque composant et son seuil de PM optimal.

D'une manière identique à ce qui a été présenté dans la chapitre 5, les performances des deux stratégies de maintenance proposées sont comparées. Le gain relatif de la stratégie  $(T, R_p^S)$  par



(a) Stratégie  $(T, R_p^S)$



(b) Stratégie  $(T, R_p^{(i)})$

FIGURE 6.1 – Illustration de convergence des coûts moyens asymptotiques minimaux de deux stratégies : (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$  considérant à  $T^* = 49$  et  $R_p^{S*} = 0.864$  ; (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  considérant à  $T^* = 60$  et  $\omega_p^* = 3.91$ .

rapport à la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est utilisé comme un critère de comparaison économique. Il est noté  $GR$  et s'exprime en pourcentage par :

$$GR = 100 \cdot \frac{C_\infty(T^*, R_p^{(i)*}) - C_\infty(T^*, R_p^{S*})}{C_\infty(T^*, R_p^{(i)*})}. \quad (6.1)$$

Selon cette définition,

- si  $GR < 0$ , cela signifie que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est moins performante que la stratégie

$(T, R_p^{(i)})$ ;

- si  $GR > 0$ , la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus efficace que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ ;
- si  $GR = 0$ , on dit que les deux stratégies apportent le même profit.

Les coûts de maintenance optimaux des stratégies  $(T, R_p^{(i)})$  et  $(T, R_p^S)$  sont respectivement de 29.742 et 27.011 unités de coût. Le gain relatif associé est de 9.18%. Ceci montre que la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus profitable que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . Ce gain peut être expliqué comme suit :

- dans la sélection des composants à remplacer préventivement, la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus appropriée que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  dans le sens où sa capacité d'amélioration de la fiabilité du système est évaluée par rapport au coût de maintenance encouru. Ceci permet à la stratégie  $(T, R_p^S)$  de réduire significativement les coûts de remplacement préventif ;
- le contrôle de la fiabilité du système par la stratégie  $(T, R_p^S)$  est meilleur que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . Ceci est lié à l'intégration de la fiabilité du système dans la prise de décision de maintenance. Elle permet à la stratégie  $(T, R_p^S)$  de réduire le nombre d'arrêts non-planifiés et en conséquence de réduire les coût d'arrêt non-planifié du système.

On peut voir dans le tableau 6.3 la liste des coûts constituant le coût total de maintenance de chaque stratégie.

TABLE 6.3 – Coûts partiels du coût moyen asymptotique optimal de deux stratégies.

| Coût partiel                                   | Stratégie $(T, R_p^S)$ | Stratégie $(T, R_p^{(i)})$ |
|--|------------------------|----------------------------|
| Coût d'inspection                              | 1.002                  | 0.9167                     |
| Coût de CR entre deux dates $T_{k-1}$ et $T_k$ | 0                      | 2.935                      |
| Coût de CR à la date $T_k$                     | 5.3983                 | 3.1325                     |
| Coût de commande urgente                       | 0                      | 0.058                      |
| Coût de PR                                     | 18.3725                | 19.6739                    |
| Coût de mise en œuvre                          | 0.2951                 | 0.4317                     |
| Coût d'arrêt planifié                          | 0.2761                 | 0.3258                     |
| Coût d'indisponibilité                         | 1.4686                 | 0                          |
| Coût d'arrêt non-planifié                      | 0.1984                 | 2.2664                     |
| <b>Coût total</b>                              | <b>27.011</b>          | <b>29.742</b>              |

La figure 6.2 présente l'évolution du coût moyen asymptotique de deux stratégies en fonction de  $T$ , pour le seuil de PM optimal du système  $R_p^{S*} = 0.864$  dans le cas de la stratégie  $(T, R_p^S)$  et le coefficient de PM optimal de composants  $\omega_p^* = 3.91$  pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ .

Les résultats obtenus montrent que :

- la courbe de coût de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  présente deux minimas locaux. Ceci correspond aux manques des opportunités de remplacements préventifs lorsque la prise de décision de

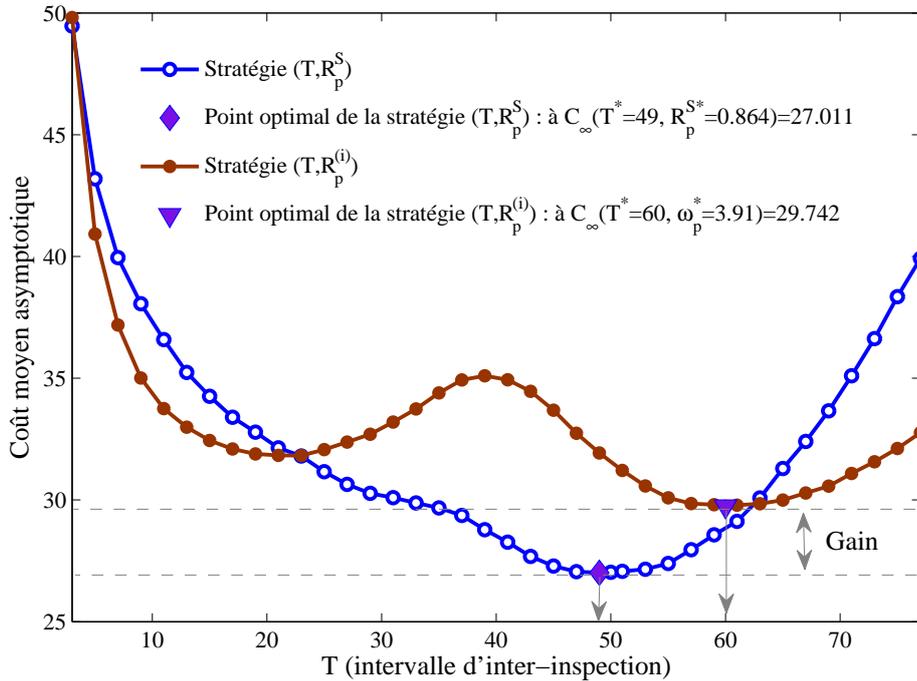


FIGURE 6.2 – Relation entre le coût moyen asymptotique de deux stratégies comme une fonction de  $T$  considérée à  $R_p^{S*} = 0.864$  pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  et à  $\omega_p^* = 3.91$  (aux seuils optimaux de tous les composants donnés dans le tableau 4.3) pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ .

remplacement préventif n'est basée que au niveau composant (sur le seuil de dégradation ou de fiabilité, par exemple). On peut voir la référence [137] pour expliquer plus en détail ce phénomène ;

- la courbe de coût de la stratégie  $(T, R_p^S)$  présente un minimum unique (optimum global). Ceci montre que la prise de décision de maintenance multi-niveaux et la sélection de composants à maintenir préventivement à partir du facteur  $C^{GIF}$  d'amélioration de fiabilité basé sur le coût permettent à la stratégie  $(T, R_p^S)$  de remplacer ou de retenir un composant aux dates d'inspection de manière plus flexible que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ .

De plus, dans l'intervalle d'inter-inspection  $23 \leq T \leq 62$ , le coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est significativement inférieur à celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . L'opposé se produit si l'intervalle d'inter-inspection  $T$  est inférieur 23 ou supérieur à 62 unités de temps. Supposons par exemple que, à cause de quelque raisons que ce soit, la maintenance préventive est retardée par rapport à la date optimale (c-à-d. que l'intervalle d'inter-inspection est  $T > T^*$ ). Alors le coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  augmente rapidement et cette stratégie devient moins performante que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  lorsque  $T > 63$  unités de temps.

Finalement, le gain relatif entre les deux stratégies peut dépendre naturellement des paramètres du système tels que le coût d'inspection  $c_{ins}$ , le coût de mise en œuvre de maintenance

$c_{ms}$ , le coût d'arrêt planifié  $c_{psd}$ , le coût de commande urgente  $c_e$ , le taux de coût d'indisponibilité  $c_d$  et le coût d'arrêt non-planifié  $c_{usd}$ . La suite de ce chapitre est consacrée à différentes analyses de sensibilité par rapport à ces coûts afin d'analyser la performance des deux stratégies de maintenance proposées.

## 6.5 Études de sensibilité de deux stratégies de maintenance

Afin d'analyser la sensibilité de deux stratégies de maintenance aux coûts d'interventions qui ont été mentionnés dans le tableau 6.2, on fait varier respectivement le coût d'inspection  $c_{ins}$ , le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$ , le coût d'arrêt planifié  $c_{psd}$ , le coût de commande urgente  $c_e$ , le taux de coût d'indisponibilité  $c_d$ , le coût d'arrêt non-planifié  $c_{usd}$ , et on observe les évolutions correspondantes des coûts moyens asymptotiques, des paramètres de décision ainsi que du gain relatif entre deux stratégies. Les études portent sur le même système que dans la section 6.3.

### 6.5.1 Analyse de sensibilité au coût d'inspection

Pour considérer l'impact du coût d'inspection  $c_{ins}$  sur les deux stratégies, on le fait varier dans un intervalle assez large de zéro à 100 avec un pas égal à 5 en fixant  $c_{ms} = 15$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_e = 20$ ,  $c_d = 400$  et  $c_{usd} = 200$ .

La variabilité de paramètres de décision optimaux, les évolutions de coûts de maintenance et de gain relatif sont présentées respectivement dans les sous-figures 6.3a, 6.3b et 6.3c. Les résultats obtenus montrent que les valeurs optimales d'intervalle d'inter-inspection de deux stratégies sont croissantes en fonction de  $c_{ins}$ , alors que celles des seuils de PM sont décroissantes. Ceci permet d'éviter un trop grand nombre d'inspections et de changer plus de composants défectueux à l'instant d'inspection. Pourtant, malgré la décroissance rapide de  $T^*$ , la valeur optimale du seuil de PM de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  n'est pas donc toujours décroissante. Plus précisément, elle augmente à nouveau à partir de  $c_{ins} > 45$  pour éviter les coûts de pénalité dû à la panne du système lorsque  $T^*$  est trop élevé.

Avec la sous-stratégie O (c-à-d. que le système défectueux est immédiatement restauré à sa date de panne), la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  provoque une forte augmentation de l'intervalle d'inter-inspection optimal par rapport à la stratégie  $(T, R_p^S)$ . En effet, la variation de  $T^*$  quand  $c_{ins}$  augmente de zéro à 100 pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  est de 5 unités de temps (cf. la sous-figures 6.3a), tandis que pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  il est de 15 unités de temps (cf. la sous-figures 6.3b), ce qui est significativement plus élevé. Par conséquent, la croissance du coût de maintenance est plus rapide pour la stratégie  $(T, R_p^S)$  que pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  (cf. la sous-figure 6.3c). Le gain relatif est une fonction décroissante de  $c_{ins}$ . La sous-figure 6.3c montre également que la

## 6.5. Études de sensibilité de deux stratégies de maintenance

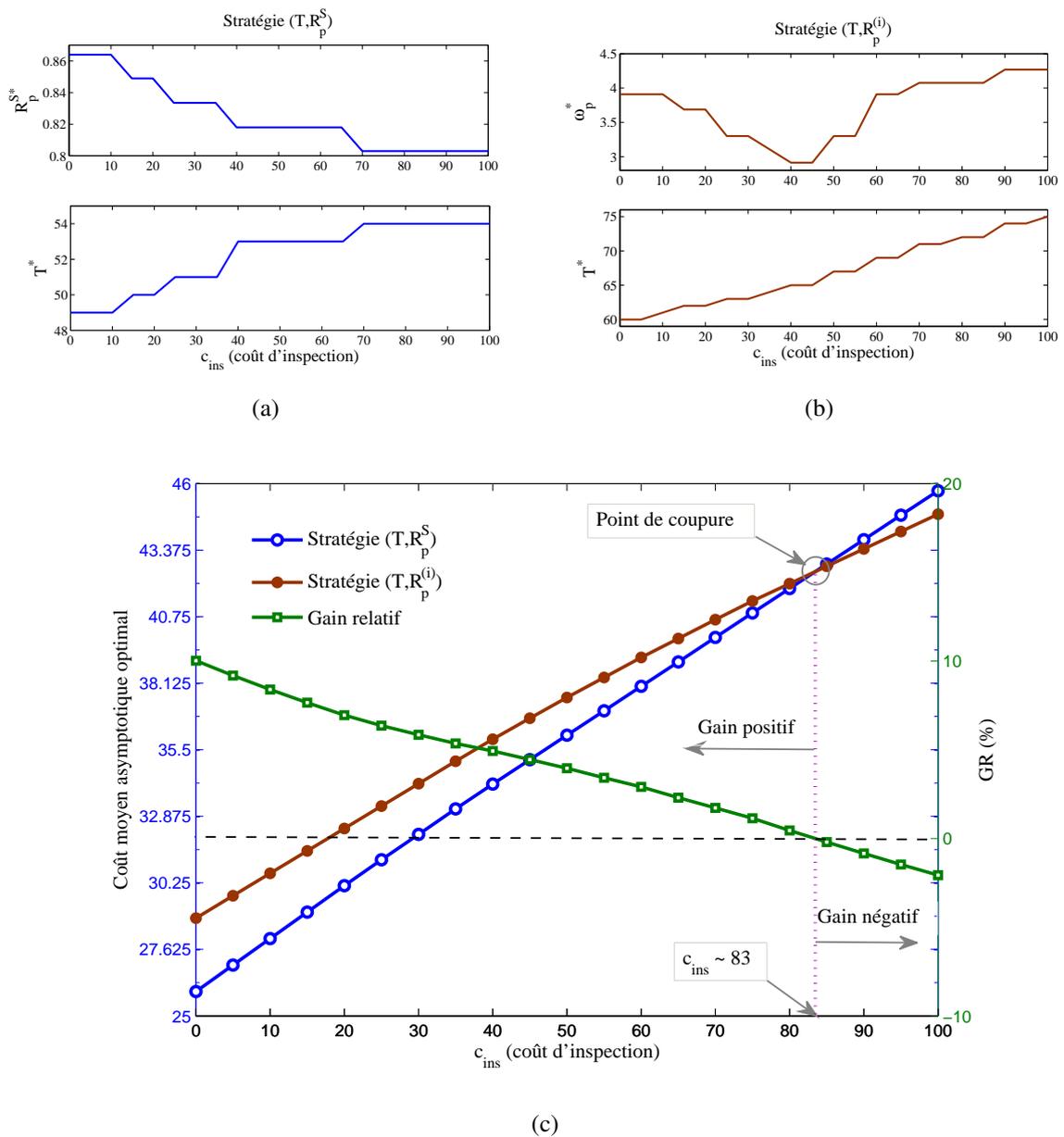


FIGURE 6.3 – Étude de sensibilité lorsque le coût d’inspection  $c_{ins}$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^i)$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

stratégie  $(T, R_p^S)$  devient moins performante que la stratégie  $(T, R_p^i)$  pour des valeurs élevées de  $c_{ins}$ . Plus précisément, le coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  surpasse celui de la stratégie  $(T, R_p^i)$  à partir de  $c_{ins} \geq 83$  (la valeur du gain relatif est négative comme montré dans la sous-figure 6.3c).

### 6.5.2 Analyse de sensibilité au coût de mise en œuvre de maintenance

De la même manière que l'étude précédente, l'influence du coût de mise en œuvre  $c_{ms}$  est observée pour les deux stratégies. On assigne  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_e = 20$ ,  $c_d = 400$  et  $c_{usd} = 200$  et on fait varier  $c_{ms}$  dans un intervalle assez large de zéros à 150 avec un pas égal à 15.

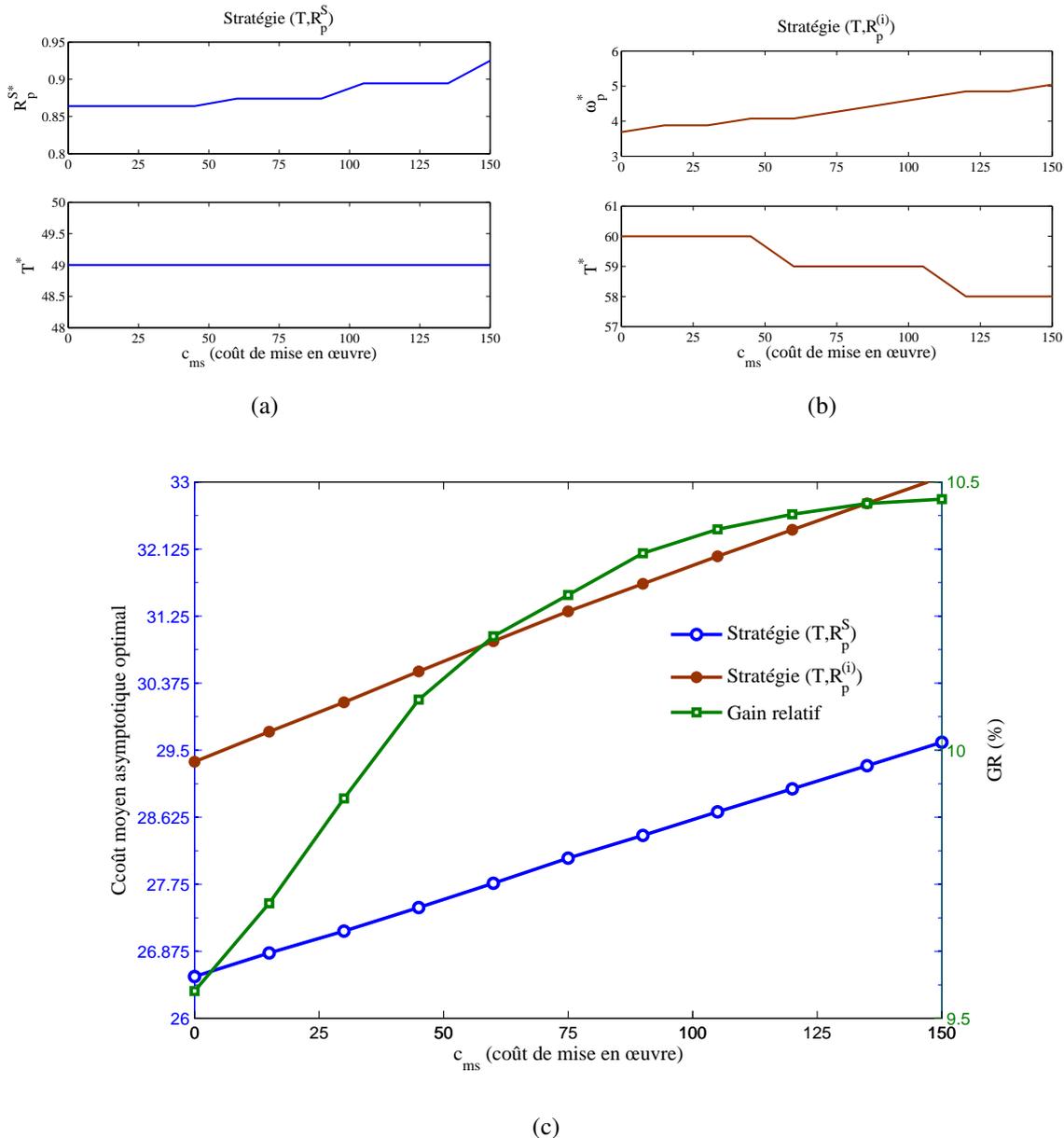


FIGURE 6.4 – Étude de sensibilité lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

Quand  $c_{ms}$  augmente de zéro à 150, les évolutions des paramètres de décision des deux stratégies sont relativement différentes comme montré dans les sous-figures 6.4a et 6.4b. La croissance des seuils optimaux de PM des deux stratégies augmente l'impact des PED (opportunités de remplacement préventif de plusieurs composants ensemble) et permet d'économiser les coûts de mise en œuvre. L'intervalle inter-inspection optimal de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est toujours inchangé, alors que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  décroît doucement et permet de diminuer les pannes du système pour lesquelles des coûts de mise en œuvre supplémentaires sont engendrés (entre deux inspections consécutives) en raison d'opérations de maintenance corrective groupées.

Sur la sous-figure 6.4c, on constate que le coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est moins sensible que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  avec  $c_{ms}$ . Autrement dit,  $c_{ms}$  a une influence positive sur la stratégie  $(T, R_p^S)$ . Il faut noter que pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ , le coût de mise en œuvre maximal encouru est égal à  $c_{ms}$  dans un cycle d'inspection, alors qu'il peut être supérieur à  $c_{ms}$  pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  pour laquelle les activités de maintenance corrective groupées sont appliquées dans en cas de panne du système. En plus, comme mentionné dans le chapitre 5, la stratégie  $(T, R_p^S)$  peut éviter activement des interventions inutiles sur le système grâce à la prise de décision de maintenance multi-niveaux. Elle exploite plus d'opportunités que l'autre de remplacer préventivement plusieurs composants ensemble. Par ailleurs,  $c_{ms}$  est aussi pris en compte dans le facteur d'amélioration  $C^{GIF}$  pour sélectionner les meilleurs composants à remplacer préventivement. Donc, il n'est pas surprenant que le gain relatif soit une fonction croissante de  $c_{ms}$ .

### 6.5.3 Analyse de sensibilité au coût d'arrêt planifié du système

L'influence du coût d'arrêt planifié du système  $c_{psd}$  est analysée en le faisant varier dans un intervalle assez large de zéro à 500. Les paramètres de coût restants sont fixés à  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 15$ ,  $c_e = 20$ ,  $c_d = 400$  et  $c_{usd} = 200$ . Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 6.5. Les variations des paramètres de décision optimaux des stratégies sont très proches l'une de l'autre. Les intervalles d'inter-inspection optimaux sont inchangés et les seuils de PM optimaux décroissent. Cette décroissance des seuils de PM correspond à une diminution des interventions de PM et des arrêts planifiés du système.

Les résultats obtenus dans la sous-figure 6.5c montrent que le gain relatif est une fonction croissante de  $c_{psd}$ . Le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^S)$  augmente lentement, tandis que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  augmente rapidement avec  $c_{psd}$ . L'influence de la dépendance économique négative sur la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est plus forte que sur la stratégie  $(T, R_p^S)$ . Cela peut être expliqué par le fait que, pour un même coût de mise en œuvre, la stratégie  $(T, R_p^S)$  prend  $c_{psd}$  en compte dans le facteur d'amélioration  $C^{GIF}$  pour sélectionner les meilleurs composants à remplacer préventivement. Ceci permet à la stratégie  $(T, R_p^S)$  de éviter

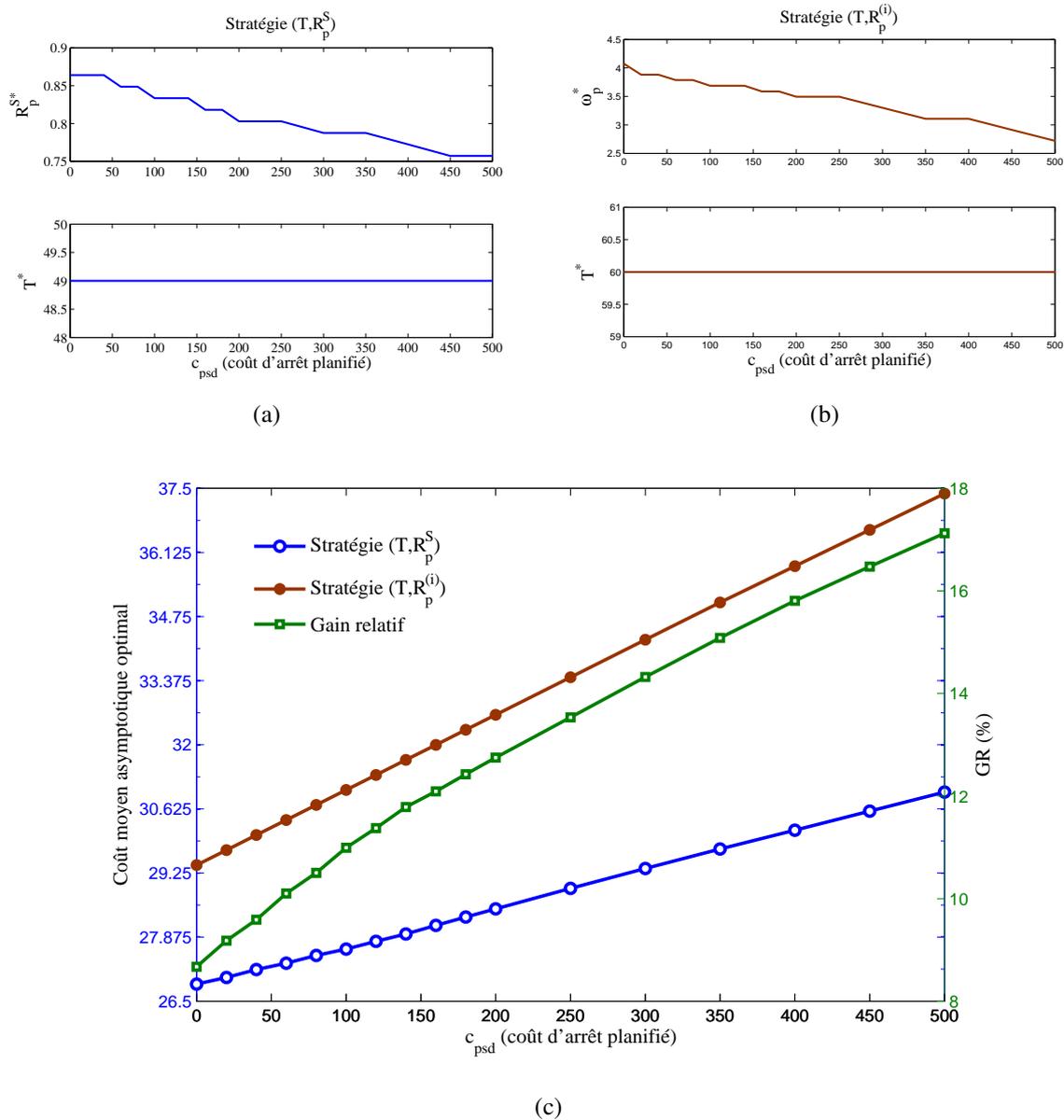


FIGURE 6.5 – Étude de sensibilité lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{psd}$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

des arrêts inutiles du système dûs à l'intervention de maintenance préventive sur les coupes minimales du système. En conséquence, la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus performante que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  lorsque  $c_{psd}$  augmente.

### 6.5.4 Analyse de sensibilité au taux de coût d'indisponibilité et coût de commande urgente

Dans ce paragraphe, la sensibilité au taux de coût d'indisponibilité par unité de temps  $c_d$  et au coût de commande urgente  $c_e$  sont analysées sur les deux stratégies proposées. L'étude est effectuée comme suit :

- (a) *L'analyse de sensibilité au  $c_e$*  : on fait varier  $c_e$  entre zéros à 400 unités de coût en fixant  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 15$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_d = 400$  et  $c_{usd} = 200$ . Les évolutions des paramètres de décision optimaux, du coûts moyen asymptotique optimal et du gain relatif sont montrées respectivement dans les sous-figures 6.6a, 6.6b et 6.6c.
- (b) *L'analyse de sensibilité au  $c_d$*  : on fait varier  $c_d$  sur un intervalle assez grand de zéros à 5000 unités de coût pour  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 15$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_e = 20$  et  $c_{usd} = 200$ . Les évolutions des paramètres de décision optimaux, du coût moyen asymptotique optimal et du gain relatif sont montrées respectivement dans les sous-figures 6.7a, 6.7b et 6.7c.

Il convient de rappeler ici que, pour les deux stratégies, les ressources de maintenance (pièces de rechange des composants, dépanneurs, etc.) sont toujours supposées disponibles aux dates d'inspection  $T_k$ .

Lorsque le système tombe en panne entre deux dates d'inspection consécutives :

- pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , il est restauré à l'état de fonctionnement sans délai. Alors, le coût  $c_e$  est engendré si le composant défaillant ayant causé la panne du système est un composant critique. Le taux de coût d'indisponibilité  $c_d$  n'est pas encouru dans tous les cas de panne du système ;
- pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ , il est laissé dans l'état de panne jusqu'à la date d'inspection la plus proche. Le coût unitaire  $c_d$  est encouru pour chaque unité de temps passée dans l'état de panne. Le coût  $c_e$  n'est pas engendré dans tous les cas de panne du système.

En conséquence, le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  ne dépend pas de la variabilité de  $c_d$  et le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^S)$  ne dépend pas de la variabilité de  $c_e$  comme tracés dans la sous-figure 6.6c et la sous-figure 6.7c, respectivement.

Quand  $c_e$  augmente de zéro à 400, il n'est pas surprenant que le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  augmente. Par suite, le gain relatif est une fonction croissante de  $c_e$ , car le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est inchangé (voir la sous-figure 6.6c). Il convient de noter que la croissance du coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est relativement lente parce qu'il n'y a qu'un composant critique dans le système considéré. Pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , le seuil optimal de maintenance préventive augmente et l'intervalle d'inspection optimal décroît (cf. la sous-figure 6.6b). Ceci signifie que les composants critiques seront remplacés préventivement plus tôt afin d'anticiper la croissance du coût de maintenance quand  $c_e$  évolue. Les paramètres de décision optimaux de la stratégie  $(T, R_p^S)$  restent inchangés

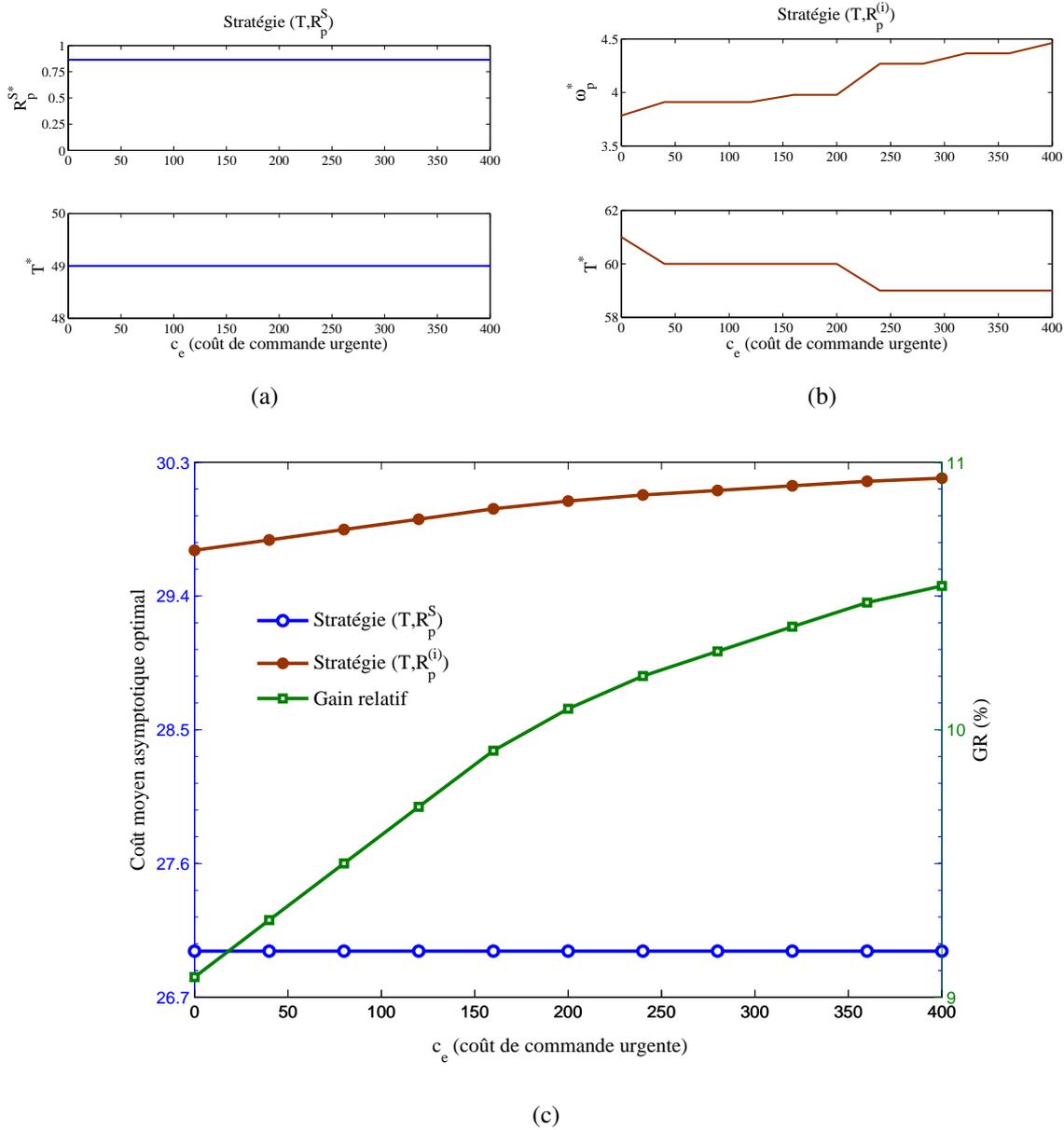


FIGURE 6.6 – Étude de sensibilité lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_e$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

comme montré sur la sous-figure 6.6a.

De même de  $c_e$ , quand  $c_d$  augmente de zéro à 5000, le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^S)$  augmente et le gain relatif est une fonction décroissante de  $c_d$ . En effet le coût moyen asymptotique de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est inchangé (voir la sous-figure 6.7c). Pour des valeurs très élevées de  $c_d$ , la stratégie  $(T, R_p^S)$  devient moins efficace que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ . Plus précisément, le gain relatif est négatif à partir de  $c_d \geq 3700$ . Pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ , le

## 6.5. Études de sensibilité de deux stratégies de maintenance

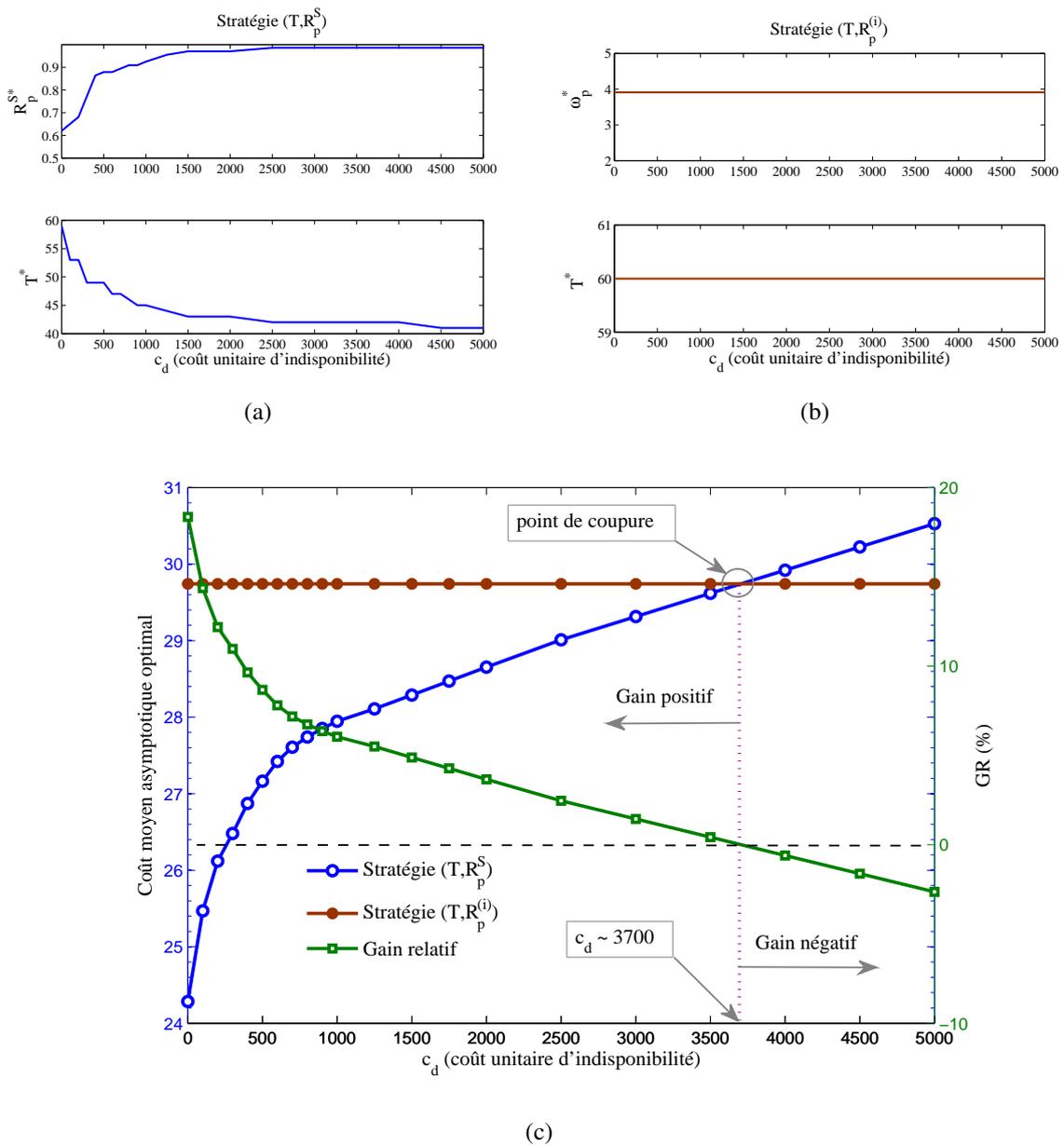


FIGURE 6.7 – Étude de sensibilité lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_d$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

seuil de maintenance préventive optimal augmente rapidement et l'intervalle d'inter-inspection optimal décroît rapidement (voir la sous-figure 6.7a). Ceci signifie que les composants du système sont remplacés préventivement plus tôt pour éviter des coûts de pénalité dû à la panne du système. Lorsque le seuil  $R_p^{S*}$  est fixé à une valeur proche de 1, la vitesse de croissance de coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus lente. Le système devient plus robuste. Les pa-

paramètres de décision optimaux de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  restent inchangés comme montrés dans la sous-figure 6.6b parce que cette stratégie est indépendante de  $c_d$ .

### 6.5.5 Analyse de sensibilité au coût d'arrêt non-planifié du système

Finalement, l'impact du coût d'arrêt non-planifié du système  $c_{usd}$  est observé pour les deux stratégies. On fait varier  $c_{usd}$  dans un intervalle assez large de zéro à 2000 et fixant  $c_{ins} = 5$ ,  $c_{ms} = 15$ ,  $c_{psd} = 20$ ,  $c_e = 20$  et  $c_d = 400$ . Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6.8.

La sous-figure 6.8c, montre l'augmentation des deux coûts moyens asymptotiques avec  $c_{usd}$ . Pourtant, il est important de noter que le coût de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^S)$  augmente doucement, tandis que celui de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  augmente plus rapidement. Ceci peut être expliqué par le contrôle de fiabilité du système et le choix des composants à remplacer préventivement plus flexible et plus approprié. La stratégie  $(T, R_p^S)$  permet un meilleur équilibre entre le coût de pénalité (dû à la panne du système) et le coût de maintenance préventive que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ .

Quand  $c_{usd}$  augmente, les variations des paramètres de décision optimaux de deux stratégies sont très proches l'un de l'autre (voir les sous-figures 6.8a et 6.8b). Plus précisément, les seuils de PM optimaux augmentent rapidement et les intervalles d'inter-inspection optimaux décroissent rapidement pour diminuer les coûts de pénalité dû à l'arrêt non-planifié du système.

## 6.6 Conclusion et perspectives

Afin de comparer l'efficacité entre les deux stratégies de maintenance prévisionnelle proposées et développées respectivement dans les chapitres 4 et 5), elles ont été mises en appliquées sur un même système complexe (présenté dans le chapitre 4).

Les avantages des deux stratégies proposées par rapport aux stratégies de maintenance efficaces existantes ont été montrés respectivement dans les chapitres 4 pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  et 5 pour la stratégie  $(T, R_p^S)$ . À travers les résultats numériques présentés dans ce chapitre, chaque stratégie proposée montre ses avantages et inconvénients par rapport à l'autre. En particulier :

- la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  est plus efficace économiquement que la stratégie  $(T, R_p^S)$  aux valeurs très élevées de coût d'inspection et de taux de coût d'indisponibilité. Elle est appropriée pour des systèmes de production où l'inspection est très onéreuse ou la perte de production très coûteuse par unité de temps (l'arrêt d'une ligne de raffinerie de pétrole de Dung Quat (au Vietnam) avec une capacité de 6.5 millions de tonnes par an correspond à une perte de 4 millions dollars par jour, par exemple) ;

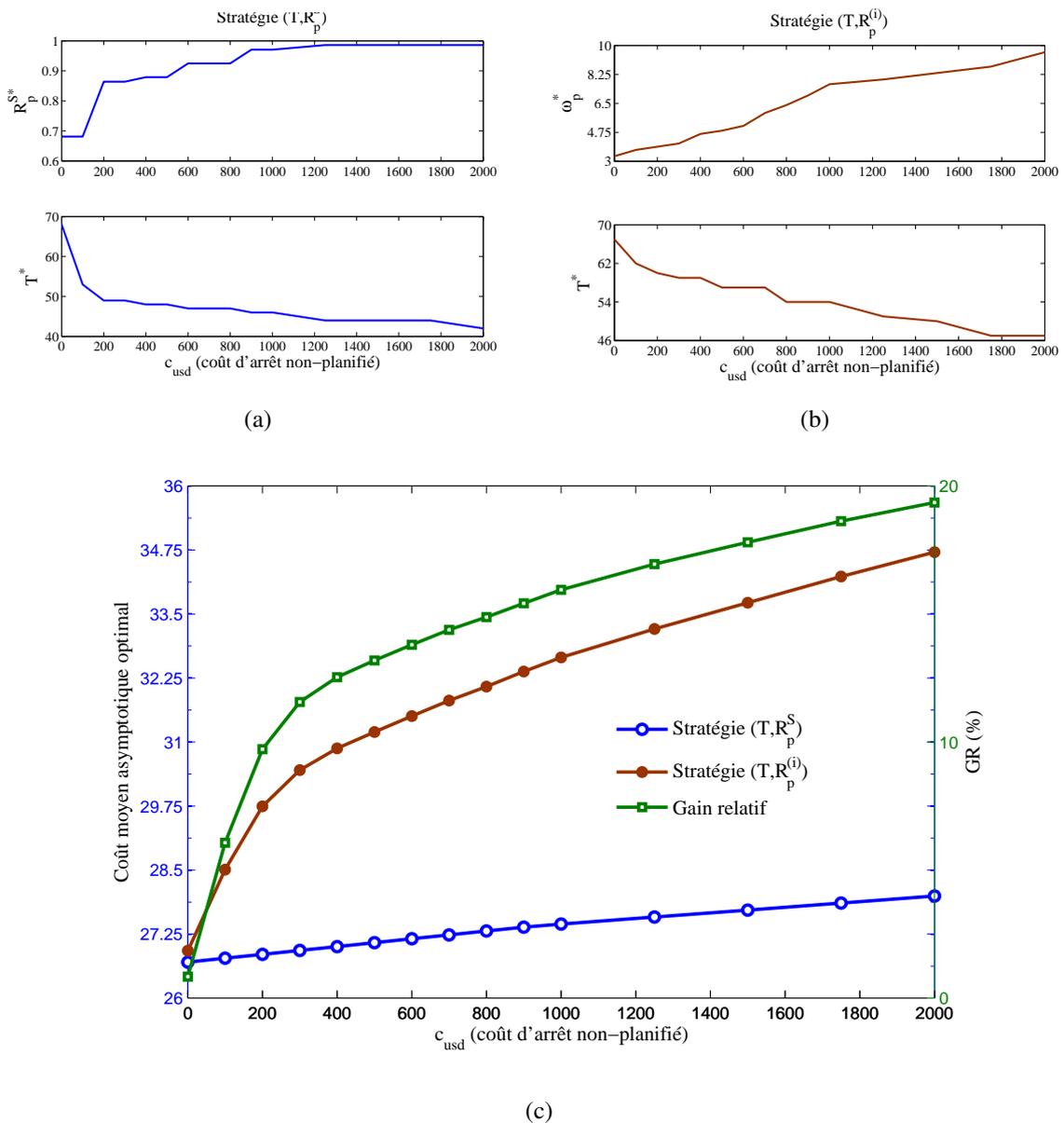


FIGURE 6.8 – Étude de sensibilité lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{usd}$  varie : les évolutions de paramètres de décision (a) de la stratégie  $(T, R_p^S)$ , (b) de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , (c) des évolutions des coûts moyens asymptotiques et du gain relatif.

- la stratégie  $(T, R_p^S)$  est plus performante et flexible que la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  aux valeurs élevées de coûts de mise en œuvre, de coût d'arrêt planifié et de coût d'arrêt non-planifié.

Pour les deux stratégies de maintenance proposées, le délai d'approvisionnement et les coûts liés à la commande de pièces de rechange et au délais ainsi que les coûts liés à la gestion des stocks pour des composants d'un systèmes ne sont pas encore pris en compte. Dans la suite de ce document, nous étudierons des stratégies conjointes de maintenance et d'inventaire permettant

de les optimiser simultanément. De telles stratégies conjointes quand elles sont évoquées dans littérature sont présentées comme beaucoup plus efficaces.

Les résultats théoriques et numériques de cette partie II ont été publiées dans deux conférences internationales [195, 196] et deux articles acceptés [191, 194].

## **Troisième partie**

# **Stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange pour des systèmes multi-composants avec structure complexe**



# Introduction

Dans la partie II, nous nous sommes consacrés à développer deux stratégies de maintenance prévisionnelle et à démontrer leur efficacité. De plus, nous avons montré les avantages et inconvénients de chacune des stratégies. Pourtant, les deux stratégies proposées considèrent que les pièces de rechange sont toujours disponibles en quantité suffisante pour assurer l'ensemble des remplacements requis aux dates planifiées ou aux dates opportunistes. Seuls les remplacements urgents envisagent une actions d'approvisionnement. Ces hypothèses correspondent partiellement aux pratiques réelles. Cela constitue une importante motivation pour s'intéresser à la proposition de modèles conjoints dans lesquels les stratégies de maintenance et d'approvisionnement de pièces de rechange sont étudiées et optimisées conjointement.

Dans cette partie, les pièces de rechange des composants du système doivent être commandées et livrées selon une stratégie qui doit être adaptée à une stratégie proposée dans la partie II. Concrètement, cela nécessite de proposer une stratégie d'approvisionnement des pièces de rechange (ou une stratégie de gestion des stocks et inventaires) pour fournir effectivement les pièces de rechange nécessaires à la stratégie de maintenance prévisionnelle  $(T, R_p^{(i)})$  du chapitre 4. Par suite, un modèle conjoint est développé pour intégrer les deux modèles individuels de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange. L'objectif suivi est de réduire le coût total du système incluant les coûts de maintenance et de gestion des inventaires.

Comme pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , cette stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange, sera développée dans cette partie. Elles devra pouvoir s'appliquer à des systèmes multi-composants présentant structure complexe et tenir compte dans la prise de décision de maintenance et d'approvisionnement en pièces de rechange des éléments suivants :

- l'information conditionnelle de pronostique de tous les composants,
- la structure du système et la dépendance structurelle entre composants du point de vue de la fiabilité,
- la dépendance d'états (marche/panne) entre composants,
- les aspects positifs de regroupement de maintenance tels que les économies de coûts de mise en œuvre et d'arrêt planifié

- les impacts négatifs du regroupement sur le fonctionnement du système qui dépendent de la structure du système du point de vue de la maintenance.

En outre, la stratégie conjointe devra prendre en compte les dépendances économiques positives entre composants dans la construction des règles de décision d’approvisionnement en pièces de rechange.

Cette partie est composée de deux chapitres.

- Le chapitre 7 vise à proposer une stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d’approvisionnement des pièces de rechange dans laquelle les règles de décision de maintenance sont reprises de celles de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  ;
- Le chapitre 8 présente une étude numérique afin de montrer comment la stratégie conjointe présentée dans le chapitre 7 peut être utilisée dans l’optimisation conjointe de maintenance et d’approvisionnement des pièces de rechange pour un système à composants multiples et structure complexe.

# Chapitre 7

## Stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange par l'utilisation de facteur d'importance de Birnbaum

### 7.1 Introduction

Dans ce chapitre, une stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange est développée. Cette stratégie conjointe est basée sur la structure de décision de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , qui a été proposée dans le chapitre 4.

La problématique de disponibilité des pièces de rechange conduit à quelques évolutions entre la structure de décision de maintenance de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  et celle de cette stratégie conjointe :

- pour la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$ , la plupart des pièces de rechange sont supposées disponibles aux dates planifiées (dates d'inspection) ainsi qu'aux dates opportunistes d'action (dates d'arrêt total du système). Les actions de remplacement préventif ne sont faites qu'aux dates planifiées et opportunistes. Le système défaillant est immédiatement restauré sans délai, uniquement par des remplacements correctifs. Aucune action préventive n'est effectuée à ces dates.
- pour la stratégie conjointe proposée, toute action d'intervention sur un composant dépend non seulement de son état de santé et son importance structurelle, mais aussi de la disponibilité de sa pièce de rechange. Un composant survivant peut toujours être remplacé préventivement à une date planifiée ou à une date opportuniste. Une fois le système tombé en panne, il peut-être immédiatement rétabli ou laissé dans l'état de panne jusqu'à

la mise à disposition des pièces de rechange nécessaires. Ceci peut engendrer pour la stratégie conjointe des coûts d'indisponibilité complémentaires.

Le reste de ce chapitre s'organise de manière suivante. La section 7.2 est consacrée à la présentation des opérations d'intervention (c-à-d. inspection, maintenance et approvisionnement des pièces de rechange) et des structures de coût associées. La description du processus de décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange est présentée dans la section 7.3. Suite au couplage des règles de décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange proposé dans la section 7.3, un modèle mathématique de coût de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange est construit afin d'évaluer et d'optimiser conjointement les performances économiques de cette stratégie conjointe dans la section 7.4. Enfin, la dernière section 7.5 présente quelques conclusions issues de l'étude de ce chapitre.

## 7.2 Interventions et structure des coûts

### 7.2.1 Opération d'inspection

Le contexte considéré est identique à celui de la section 3.4.1 du chapitre 3 : une défaillance système est détectée immédiatement mais le niveau de dégradation ou l'information de défaillance d'un composant qui ne requiert pas d'intervention immédiate ne peuvent être obtenus que lors d'une inspection périodique. Plus précisément, le système est régulièrement inspecté sur les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  aux dates  $T_k = kT$ ,  $k \in \mathbb{N}$  où  $T$  représentant l'intervalle de temps inter-inspections. Ce paramètre est une variable de décision. De plus, les opérations d'inspection sont supposées instantanées, parfaites et non destructives. L'inspection sur chaque composant survivant de l'ensemble  $S_D$  génère un coût  $c_{ins}$ .

### 7.2.2 Opérations de maintenance

Dans cette partie, la durée des remplacements (correctifs et préventifs) est également considérée comme négligeable. Les coûts liés à l'arrêt du système tels que le coût d'arrêt planifié  $c_{psd}$ , le coût d'arrêt non-planifié  $c_{usd}$  et le taux de coût d'indisponibilité  $c_d$  ont été détaillés dans la sous-section 3.4.2 du chapitre 3.

Dans la partie II, les coûts de remplacements correctifs et préventifs d'un composant comprennent le coût de commande de sa pièce de rechange. Dans cette partie, le coût de commande de pièce de rechange d'un composant est indépendant de son coût de remplacement (correctif ou préventif). C'est pourquoi la structure des coûts de remplacement correctif et préventif est de nouveau formulée dans la suite. Les nouvelles structures de coût correspondent aux activités de remplacement correctif et de remplacement préventif effectuées sur un composant ou un groupe de composants sont appliquées dans cette partie.

### Coût de remplacement préventif du composant $i$

Suite à un remplacement préventif sur le composant  $i$  à l'instant  $t$ , un coût de remplacement préventif, noté  $C_p^{(i)}$ , est encouru. Il s'écrit :

$$C_p^{(i)} = c_p^{(i)} + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}, \quad (7.1)$$

où :

- $c_p^{(i)}$  est le coût spécifique du remplacement préventif du composant  $i$  (coût de pièce de rechange du composant  $i$  non compris) ;
- $\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}$  est la fonction indicatrice utilisée pour signifier si le système est arrêté en raison d'un remplacement préventif sur le composant  $i$ . Elle est telle que :

$$\mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} = \begin{cases} 1 & \text{si le composant } i \text{ est critique ou critique temporaire ;} \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ est non-critique.} \end{cases}$$

### Coût de remplacement préventif du groupe $G_l$

Supposons que le système est en train de fonctionner. Tous les composants du groupe  $G_l$  ( $1 \leq |G_l| \leq n$ ) sont survivants mais doivent être préventivement remplacés. Effectuer un remplacement préventif du groupe  $G_l$  engendre un coût qui est formulé comme suit :

$$C_p^{(G_l)} = \sum_{i \in G_l} C_p^{(i)} - \underbrace{c_{ms} (|G_l| - 1)}_{\text{profit économique : PED}} - \underbrace{c_{psd} \left( \sum_{i \in G_l} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique et critique temporaire}\}} - \mathcal{I}_{\{G_l \text{ est groupe critique}\}} \right)}_{\text{coût d'arrêt planifié économisé : PED ou NED}} \quad (7.2)$$

où :

- la deuxième partie du membre de droite de l'équation (7.2) représente les coûts de mise en œuvre économisés dû à l'existence d'une dépendance économique positive (PED) entre composants ;
- la troisième partie pourrait être positive ou négative. En fait, elle est positive (représentant la dépendance économique positive) si le groupe  $G_l$  contient plus d'un composant critique ou composant critique temporaire. Si le groupe  $G_l$  est un groupe critique mais ses composants sont non-critiques, cette troisième partie est alors négative et représente la dépendance économique négative (NED). Il est important de noter ici que la troisième partie n'existe pas dans les systèmes multi-composants à structure série car tous les composants d'un système à structure série sont critiques.

### Coût de remplacement correctif du composant $i$

Supposons qu'un remplacement correctif est effectué sur le composant défaillant  $i$  à l'instant  $t$ , alors qu'il est tombé en panne à l'instant  $\tau^{(i)}$  ( $0 < \tau^{(i)} \leq t$ ). Un coût de remplacement correctif est alors associé à cette action. Il est formulé par :

$$C_c^{(i)} = c_c^{(i)} + c_{ms} + [c_{usd} + c_d(t - \tau^S)] \mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau^S\}}, \quad (7.3)$$

où :

- $c_c^{(i)}$  est le coût spécifique du remplacement correctif (coût de pièce de rechange du composant  $i$  non inclus), avec  $c_c^{(i)} \geq c_p^{(i)}$  ;
- le coût d'indisponibilité est encouru si la panne du composant  $i$  conduit le système à un arrêt. Alors  $\tau^{(i)} = \tau^S$ ,  $\tau^S$  représentant la date de panne du système.

### 7.2.3 Opération d'approvisionnement des pièces de rechange

Dans cette sous-section, on s'intéresse à l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange qui a un rôle très important dans une stratégie conjointe pour un système à maintenir. Nous considérons un système multi-composants avec structure complexe comprenant  $n$  composants non-identiques. Les pièces de rechange de chacun des composants ne peuvent pas être partagées. Dans cette thèse, nous considérons également que le nombre maximum de pièces de rechange de chacun des composants est, à tout moment, égal à  $un$ . Cette pièce est alors soit disponible en stock soit présente sur une commande en cours. Cette hypothèse peut se retrouver dans les articles [10, 103]. Une telle hypothèse est adaptée aux systèmes pour lesquels le taux de demand des pièces de rechange est faible et les composants sont onéreux [184, 311, 233].

Dans cette stratégie conjointe, à chaque cycle d'inspection  $k$  ( $k \geq 1$ ), une commande « normale » peut être activée à chaque instant d'inspection  $T_{k-1}$  avec deux dates possibles de livraison, notées respectivement  $d_{k,1}$  et  $d_{k,2}$  :

- $d_{k,1}$  est définie comme étant la date « standard » de livraison a lieu après un délai d'approvisionnement (« lead-time » en anglais)  $L$  ( $L > 0$ ) c'est à dire à  $d_{k,1} = T_{k-1} + L$ . Le délai d'approvisionnement  $L$  est l'intervalle de temps minimal entre l'instant de commande chez le fournisseur de la pièce de rechange et l'instant de mise à disposition de cette pièce de rechange pour l'opérateur de maintenance ;
- $d_{k,2}$  est définie comme la date « longue ». Elle correspond à la fin du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection (c-à-d. à la date d'inspection  $T_k$ ).

La figure 7.1 illustre les deux dates de livraison d'une commande normale au sein du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection.

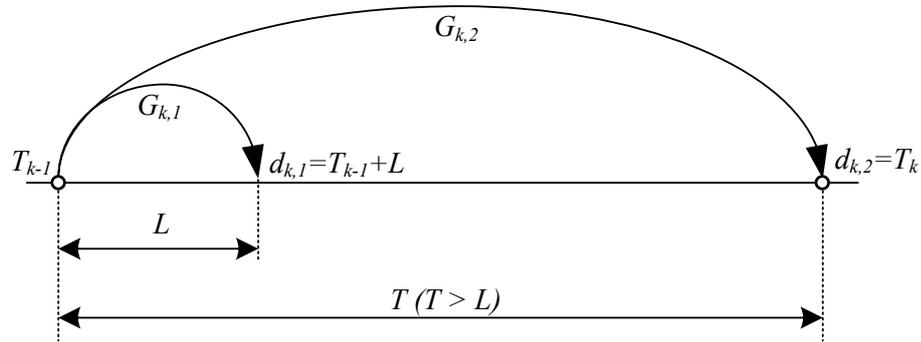


FIGURE 7.1 – Livraison d’une commande normale avec deux dates possibles  $d_{k,1}$  et  $d_{k,2}$ .

Les structures de coût liées à la commande des pièces de rechange au sein d’un cycle d’inspection sont formulées comme suit.

#### Commande d’une pièce de rechange individuelle du composant $i$

1. Si la pièce de rechange du composant  $i$  (également appelée pièce de rechange  $i$  pour simplifier) est commandée et livrée à la date standard  $d_{k,1}$ , le coût de commande associé, noté  $C_{sp,std}^{(i)}$ , s’écrit :

$$C_{sp,std}^{(i)} = c_{sp}^{(i)} + c_{os} + c_{ship}^0, \quad (7.4)$$

où :

- $c_{sp}^{(i)}$  est la partie du coût de commande spécifique au composant ;
  - $c_{os}$  est le coût de mise en œuvre d’une commande normale. De manière similaire au coût de mise en œuvre de maintenance  $c_{ms}$ , ce coût peut-être partagé quand plusieurs pièces de rechange sont commandées en même temps. Ceci est introduit dans notre étude comme une dépendance économique positive entre composants dans l’opération d’approvisionnement des pièces de rechange.
  - $c_{ship}^0$  est le coût de transport minimal pour une livraison. Ce coût peut être partagé quand un nombre minimal  $n_0$  de pièces de rechange est livré en même temps.
2. Dans des cas d’urgence, la pièce de rechange  $i$  doit être commandée pour une livraison dans un délai négligeable. Lorsque la pièce de rechange  $i$  est préparée et expédiée en situation d’urgence, le coût  $C_{sp,e}^{(i)}$  est alors plus important que le coût  $C_{sp,std}^{(i)}$ . Dans ce cas,  $C_{sp,e}^{(i)}$  est déterminé comme :

$$C_{sp,e}^{(i)} = k_e C_{sp,std}^{(i)}, \quad (7.5)$$

où,  $k_e > 1$  est le coefficient de commande d’urgence.

3. Si la pièce de rechange  $i$  est commandée pour une livraison à délai long, c'est-à-dire à la date  $d_{k,2}$ , le coût de commande de la pièce de rechange  $i$  est noté  $C_{sp,long}^{(i)}$  et s'exprime par :

$$C_{sp,long}^{(i)} = c_{sp}^{(i)} + c_{os} + k_{ld} c_{ship}^0, \quad (7.6)$$

où,  $k_{ld}$  est un coefficient qui implique que le coût de transport de pièce de rechange  $i$  dans ce cas est inférieur à celui dans le cas livré à la date standard  $d_{k,1}$ . On considère que  $0 < k_{ld} < 1$ . Cette pièce de rechange est préparée et expédiée avec un délai plus important.

### Commande d'un groupe de pièces de rechange

1. Si le groupe  $G_{k,1}$  composé de  $n_{k,1} = |G_{k,1}|$  pièces de rechange (avec  $1 \leq n_{k,1} \leq n$ ) est livré à la date standard  $d_{k,1}$ , le coût de commande du groupe  $G_{k,1}$ , noté  $C_{sp,std}^{G_{k,1}}$ , est donné par :

$$C_{sp,std}^{G_{k,1}} = \sum_{i \in G_{k,1}} (c_{sp}^{(i)} + c_{os}) \mathcal{I}_{\{i \in G_{k,1}\}} - \underbrace{c_{os} (n_{k,1} - 1)}_{\text{profit économique : la PED}} + c_{ship}(n_{k,1}), \quad (7.7)$$

où,  $c_{ship}(n_{k,1})$ , fonction de la taille  $n_{k,1}$  du groupe, est le coût de transport du groupe  $G_{k,1}$  livrée à la date  $d_{k,1}$ .  $c_{ship}(n_{k,1})$  peut-être formulé comme suit :

$$c_{ship}(n_{k,1}) = \begin{cases} c_{ship}^0 + (n_{k,1} - n_0) c_{ship}^d & \text{si } n_{k,1} > n_0; \\ c_{ship}^0 & \text{sinon ;} \end{cases} \quad (7.8)$$

où,  $c_{ship}^d$  est le taux de coût de transport. Ce taux de coût intervient seulement si le nombre de pièces de rechange commandées dépasse le nombre minimal  $n_0$ .

2. De la même manière, le groupe  $G_{k,2}$  composé de  $n_{k,2} = |G_{k,2}|$  pièces de rechange (avec  $1 \leq n_{k,1} + n_{k,2} \leq n$ ) est livré à la date  $d_{k,2}$ , c'est-à-dire avec un délai long. Le coût de commande du groupe  $G_{k,2}$ , noté  $C_{sp,long}^{G_{k,2}}$ , est donné par :

$$C_{sp,long}^{G_{k,2}} = \sum_{i \in G_{k,2}} (c_{sp}^{(i)} + c_{os}) \mathcal{I}_{\{i \in G_{k,2}\}} - \underbrace{c_{os} (n_{k,2} - \mathcal{I}_{\{G_{k,1}=\emptyset\}})}_{\text{profit économique : la PED}} + k_{ld} c_{ship}(n_{k,2}), \quad (7.9)$$

où, le coût  $c_{os}$  de mise en œuvre de la commande est partagé s'il y a au moins une pièce de rechange livrée à la date standard  $d_{k,1}$ . Le coût de transport  $c_{ship}(n_{k,2})$  est déterminé comme dans l'équation (7.8).

En outre, parmi les pièces de rechange commandées et livrées, certaines d'entre elles peuvent être immédiatement utilisées pour les activités de remplacement. Le reste des pièces de rechange est mis en stock. Supposons que la dégradation des pièces de rechange en stock reste inchangé. Un coût de gestion des stocks par unité de temps pour la pièce de rechange  $i$  est alors comptabilisé. Il est noté  $c_h^{(i)}$ .

### 7.3 Stratégie conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange : stratégie $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$

Les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  du système sont régulièrement inspectés aux instants  $T_{k-1} = (k-1)T$  ( $k \in \mathbb{N}^+$ ). Le niveau de dégradation du composant  $i$  de l'ensemble  $S_D$  est  $X_{T_{k-1}}^{(i)} = x_{T_{k-1}}^{(i)}$ .

Dans le cadre de la stratégie de maintenance étudiée, les actions de remplacement correctif sont faites sur les composants défectueux, et les actions de remplacement préventif sont faites sur les composants survivants de manière à faire baisser leur fiabilité prévisionnelle sous leur seuil de remplacement préventif fixé  $R_p^{(i)}$ . La plupart des actions de remplacement sont habituellement effectuées aux dates d'inspection. Ainsi, les pièces de rechange nécessaires devraient être prévues pour ces actions à ces moments.

Dans le cadre de la stratégie d'approvisionnement de pièces de rechange, la décision de commande d'une pièce de rechange pour le composant  $i$  à la date d'inspection courante  $T_{k-1}$  est basée non seulement sur la disponibilité de cette pièce de rechange, mais aussi sur l'état de santé du composant et son importance structurelle. Plus précisément, si la pièce de rechange est indisponible en stock et la fiabilité prévisionnelle du composant est inférieure à un seuil de commande fixé, noté  $R_o^{(i)}$ , la pièce de rechange  $i$  est commandée (à l'instant  $T_{k-1}^+$ ) pour une livraison à la prochaine date d'inspection  $T_k$  (noter que  $T_k \equiv d_{k,2}$ ). De plus, étant donné les possibles limites de précision dans le pronostic d'état de santé des composants, il peut y avoir certains composants survivants avec un haut niveau de dégradation qui nécessitent un remplacement préventif. D'autres composants peuvent voir leur pièce de rechange indisponible. Afin de réduire la probabilité de défaillance du système et la perte de production associée à son arrêt, les pièces de rechange correspondant à ces composants doivent être commandées et livrées rapidement, c'est-à-dire à la date  $d_{k,1}$  (voir la figure 7.1).

Le remplacement d'un composant n'est effectué que lorsque sa pièce de rechange est disponible, il est donc raisonnable de supposer que  $0 \leq R_p^{(i)} < R_o^{(i)} \leq 1$ . À la différence de la stratégie conjointe traditionnelle, l'ajout d'un seuil de commande pour chaque composant permet de réduire les coûts liés à la gestion des stocks.

À cette fin, deux paramètres de décision sont introduits : le seuil de remplacement préventif  $R_p^{(i)}$  et le seuil de commande  $R_o^{(i)}$  du composant  $i$ . Ils sont fonction du facteur d'importance structurel  $I_B^{(i)}$  et définis comme suit :

$$R_p^{(i)} = \Phi_p(I_B^{(i)}) \quad \text{et} \quad R_o^{(i)} = \Phi_o(I_B^{(i)}). \quad (7.10)$$

Les fonctions  $\Phi_p(I_B^{(i)})$  et  $\Phi_o(I_B^{(i)})$  peuvent être supposées linéaires par rapport à  $I_B^{(i)}$ . L'équation (7.10) est alors réécrite comme suit :

$$R_p^{(i)} = \min_{i=1,\dots,n} (\varpi_p I_B^{(i)}, 1) \quad \text{et} \quad R_o^{(i)} = \min_{i=1,\dots,n} (\varpi_o I_B^{(i)}, 1), \quad (7.11)$$

où,  $\varpi_p$  et  $\varpi_o$  sont respectivement les coefficients de remplacement préventif et de commande de pièces de rechange. Étant donné que  $0 \leq R_p^{(i)} < R_o^{(i)} \leq 1$ , la relation entre  $\varpi_p$  et  $\varpi_o$  peut donc être déduite comme :

$$0 \leq \varpi_p < \varpi_o \leq \frac{1}{\min_{i=1,\dots,n} (I_B^{(i)})}. \quad (7.12)$$

En outre, afin de renforcer l'impact positif de la PED entre composants, les règles de décision de maintenance opportuniste sont également proposées à des instants d'opportunité d'action autres que les dates d'inspection. Il s'agit des instants de panne du système. Les sous-sections suivantes présentent en détail les règles de décision de maintenance ainsi que d'approvisionnement des pièces de rechange.

### 7.3.1 Règles de décision de maintenance

Les notations suivantes sont utilisées pour décrire la stratégie conjointe proposée :

- $M_k \in \mathbb{N}$  est le nombre total de pannes du système pendant l'intervalle de temps  $(T_{k-1}, T_k]$  ( $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection).  $M_k = 0$  signifie que le système n'a aucune défaillance sur cet intervalle ;
- $M'_k$  est le nombre total de restaurations du système dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection ;
- $\tau_{k,q}^S$ , avec  $1 \leq q \leq M_k$ , représente le  $q^{\text{ème}}$  instant de panne du système (instant de panne d'un composant critique ou critique temporaire) dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection quand  $M_k \neq 0$ . Si  $M_k = 0$ ,  $\tau_{k,q}^S = \emptyset$  (c-à-d.  $\tau_{k,q}^S$  n'existe pas) ;
- $i_{\tau_{k,q}^S}$  est l'indice du composant dont la panne conduit à la panne du système à l'instant  $\tau_{k,q}^S$  (c-à-d.,  $\tau^{(i)} = \tau_{k,q}^S$ ) ;
- $T_{k,u}$  ( $T_{k,u} \leq T_k$ ) représente le  $u^{\text{ème}}$  ( $1 \leq u \leq q \leq M_k$ ) instant de restauration du système après une panne dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection si  $M_k \geq 1$ . Si  $M_k = 0$ ,  $T_{k,u} = \emptyset$ .

Pour le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection, les actions de remplacement préventif ou correctif ne sont effectuées qu'aux dates planifiées  $T_k$  ou opportunistes  $T_{k,u} \neq T_k$ .

Il convient de noter que dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection que :  $T_{k,u} = \tau_{k,q}^S$  si le rétablissement du système défaillant à l'instant  $\tau_{k,q}^S$  est réalisé (c-à-d., si la pièce de rechange "nécessaire" est disponible) ; sinon,  $T_{k,u} > \tau_{k,q}^S$ .

#### Règles de décision de remplacements préventif et correctif à $T_k$

À  $T_k$ , les règles de décision de remplacements préventifs et correctifs sont appliquées juste après l'opération d'inspection pour tous les composants du système. Ainsi :

- si le composant  $i$  est tombé en panne, il est correctivement remplacé si sa pièce de rechange est disponible. Sinon, le composant défaillant  $i$  est laissé inactif et sera correcti-

vement remplacé à la prochaine opportunité de maintenance ou à la prochaine date d'inspection (c-à-d.  $T_{k+1,u}$  ou  $T_{k+1}$  selon la disponibilité de sa pièce de rechange ;

- si le composant  $i$  est en marche, sa fiabilité prévisionnelle  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k)$  est calculée à partir de l'équation (2.11) si  $i \in S_A$  ou de l'équation (3.7) si  $i \in S_D$  et le schéma de prise de décision est le suivant :
  - si  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}$ , le composant  $i$  est préventivement remplacé si sa pièce de rechange est disponible. Sinon, il est maintenu en opération et sera remplacé à la prochaine date d'opportunité de maintenance ou à la prochaine date d'inspection ( $T_{k+1,u}$  ou  $T_{k+1}$  selon la première éventualité) dès que sa pièce de rechange est disponible ;
  - si  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) > R_p^{(i)}$ , aucune action de remplacement sur le composant  $i$  n'est effectuée.

### Règles de décision de remplacements correctif et préventif à $T_{k,u} \neq T_k$

Le système défaillant est rétabli à la date d'opportunité  $T_{k,u} \in (T_{k-1}, T_k)$  si la condition pour le rétablir est satisfaite. Sinon, le système défaillant est rétabli à la date d'inspection  $T_{k,u} = T_k$ . Dans l'intervalle  $(T_{k-1}, T_k)$ , si la panne d'un composant  $i$  ne cause pas l'arrêt total du système, ce composant défaillant est laissé inopérant. Dans le cas contraire, la panne du composant  $i$  cause l'arrêt total du système à l'instant  $\tau_{k,q}^S$ . Afin de restaurer le système défaillant le plus tôt possible, on doit remplacer correctivement :

- le composant défaillant  $i$  s'il est critique ;
- tout composant défaillant  $j \neq i$  dans la même coupe minimale (MCS) que  $i$  s'il est critique temporaire. On pourra noter  $MCS^{(i, \tau_{k,q}^S)}$  cette coupe.

Il convient de rappeler que le remplacement correctif d'un composant défaillant est considéré comme une opportunité de maintenance. Il permet donc de remplacer l'ensemble des composants défaillants ainsi que les composants survivants pour lesquels un remplacement préventif a été décidé à la dernière date d'inspection (c-à-d. à  $T_{k-1}$ ) mais pas encore mis en œuvre en raison du manque de pièce de rechange.

Les règles de décision de maintenance opportuniste suivantes sont utilisées pour rétablir le système défaillant le plus tôt possible c'est-à-dire à un instant  $T_{k,u}$  pendant l'intervalle  $(T_{k-1}, T_k)$ .

**Cas 1 :** Si le composant  $i$  est critique et

- si sa pièce de rechange est disponible, il est immédiatement remplacé et le système défaillant est restauré sans délai ;
- si sa pièce de rechange est présente sur la commande en cours (cette pièce peut-être délivrée soit à  $d_{k,1}$  soit à  $d_{k,2}$ ), le système défaillant est alors laissé inopérant jusqu'à l'arrivée de la pièce de rechange  $i$  ;

- si sa pièce de rechange n'est ni disponible ni présente sur la commande en cours, elle est alors commandée en urgence (avec un délai d'approvisionnement négligeable). Le composant défaillant  $i$  est immédiatement remplacé dès l'arrivée de sa pièce de rechange et le système défaillant est restauré sans délai.

**Cas 2 :** Si le composant défaillant  $i$  est critique temporaire et

- s'il y a au moins une pièce de rechange d'un composant  $j$  de la même coupe minimale,  $j \in \text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}$ , le système défaillant est alors restauré sans délai par remplacement instantané de composant défaillant ;
- si aucune pièce de rechange de composant de la coupe minimale  $\text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}$  n'est disponible, mais une pièce de rechange est présente sur la commande en cours, le système défaillant est laissé dans l'état de panne et sera rétabli dès que la pièce « nécessaire » sera livrée ;
- si aucune pièce de rechange de la coupe  $\text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}$  n'est disponible ni présente sur la commande en cours, la pièce de rechange d'un composant  $j$  de la coupe minimale  $\text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}$  est commandée en urgence. Afin d'augmenter l'efficacité de la stratégie proposée, un facteur noté  $I_e^{(j)}$  est produit pour choisir le composant défaillant de la coupe  $\text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}$  dont une pièce de rechange doit être commandée en urgence. Ce facteur est défini comme suit :

$$I_e^{(j)} = \max_{j \in \text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}} \left\{ \frac{MTTF^{(j)}}{C_c^{(j)} + C_{sp,e}^{(j)}} \right\}. \quad (7.13)$$

Le composant défaillant choisi est le composant présentant la valeur la plus élevée du facteur  $I_e^{(j)}$ . Dans ce cas, le système défaillant est immédiatement restauré sans délai.

### 7.3.2 Règles de décision d'approvisionnement des pièces de rechange

Comme mentionné dans la sous-section 7.2.3, seule une commande normale est possible par cycle d'inspection. Elle est effectuée juste après l'instant  $T_k$  pour le  $(k+1)^{\text{ème}}$  cycle d'inspection. Dans cette commande, une pièce de rechange commandée ne peut être livrée qu'à la date standard  $d_{k+1,1} = T_k + L$  ou à la date longue  $d_{k+1,2} = T_{k+1}$ . Les règles de décision de commande pour le  $(k+1)^{\text{ème}}$  cycle d'inspection sont, à l'instant  $T_k^+$  :

- si le composant  $i$  est en panne et sa pièce de rechange est indisponible, la pièce de rechange  $i$  est commandée et sera livrée à  $d_{k+1,1} = T_k + L$  ;
- si le composant  $i$  est en marche avec  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p^{(i)}$  et sa pièce de rechange est indisponible, la pièce de rechange  $i$  est commandée et sera également livrée à la date  $d_{k+1,1} = T_{k+1}$  ;
- si le composant  $i$  est en marche mais  $R_p^{(i)} < R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_o^{(i)}$  et sa pièce de rechange est indisponible, la pièce de rechange  $i$  est commandée et sera livrée à la date  $d_{k+1,2} = T_{k+1}$ .

*Remarque* : En résumé, pour  $n$  composants non-identiques, la stratégie conjointe proposée se base sur  $2n+1$  paramètres de décision :  $n$  seuils de remplacement préventif  $R_p^{(1)}, \dots, R_p^{(i)}, \dots, R_p^{(n)}$  et  $n$  seuils de commande de pièce de rechange  $R_o^{(1)}, \dots, R_o^{(i)}, \dots, R_o^{(n)}$  et le cycle d'inspection  $T$  du système. Les opérations d'épuisement et de réapprovisionnement des pièces de rechange ont une relation très étroite. Donc, les performances des stratégies de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange de cette stratégie conjointe doivent être évaluées et optimisées conjointement plutôt que séquentiellement ou séparément. La stratégie conjointe proposée dans ce chapitre est aussi appelée stratégie  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ .

## 7.4 Optimisation de la stratégie conjointe proposée

### 7.4.1 Critère de performance économique

Cette section vise à développer un modèle mathématique de coût qui est utilisé pour évaluer et optimiser les performances économiques de la stratégie conjointe  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$  proposée. Pour ce faire, le critère de taux de coût moyen asymptotique, noté  $C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ , est utilisé et défini comme suit :

$$C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)}) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C^T(u_t)}{u_t}. \quad (7.14)$$

où,  $C^T(u_t)$  est la fonction de coût total cumulé comprenant les coûts liés à la maintenance, noté  $C^M(u_t)$ , et à la gestion des inventaires, noté  $C^I(u_t)$ , du système entier jusqu'à l'usage  $u_t$  (ou l'instant  $t$ ) :

$$C^T(u_t) = C^M(u_t) + C^I(u_t). \quad (7.15)$$

De la même façon qu'aux chapitres 4 et 5, le coût moyen asymptotique dans l'équation (7.14) est exprimé par :

$$C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)}) = \frac{E[\sum_{k=1}^{N_b} C_k^T]}{E[T_{rem} - D(T_{rem})]}, \quad (7.16)$$

où :

- $T_{rem} = N_b T$  est l'instant où tous les composants du système sont complètement remplacés (préventivement et/ou correctivement) ;
- $D(T_{rem})$  est la durée totale d'indisponibilité du système cumulée jusqu'à la date  $T_{rem}$  ;
- $C_k^T$  est le coût total des opérations de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange du  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection (c-à-d.  $(T_{k-1}, T_k]$ ) rassemblant tous les coûts jusqu'à l'instant d'inspection  $T_k$ .

## 7.4.2 Modèle mathématique d'évaluation et l'optimisation conjointe

Le coût total  $C_k^T$  est composé des coûts partiels suivants :

$$C_k^T = \underbrace{C_k^{insp} + C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp} + C_k^{rempp}}_{C_k^M} + \underbrace{C_k^{order} + C_k^{hold}}_{C_k^I}, \quad (7.17)$$

où :

- $C_k^{insp}$  est le coût lié à l'opération d'inspection sur les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  à la date  $T_k$  ;
- $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp}$  est le coût cumulé lié aux actions de remplacement correctif et préventif, aux commandes urgentes et aux l'arrêts non-planifiés du système pendant l'intervalle de temps  $(T_{k-1}, T_k)$  ;
- $C_k^{rempp}$  est le coût lié aux actions de remplacement correctif et préventif qui sont effectuées à la date  $T_k$ , à l'arrêt non-planifié (dans le cas où le système défaillant est resté inactif jusqu'à  $T_k$ ) et planifié du système à la date  $T_k$  ;
- $C_k^{order}$  est le coût lié aux commandes normales, qui sont effectuées à la date  $T_{k-1}$  pour le  $k^{ème}$  cycle d'inspection ;
- $C_k^{hold}$  est le coût de gestion des stocks de toutes les pièces de rechange dans le  $k^{ème}$  cycle d'inspection.

Pour faciliter la description mathématique du modèle de coût, les notions suivantes sont utilisées :

- $F_t^{(i)} = (X_t^{(i)} \geq Z^{(i)}, i \in S_D) \vee (A_t^{(i)} \geq \tau^{(i)}, i \in S_A)$  est l'événement signifiant que, à l'instant  $t$ , le composant  $i$  est déjà tombé en panne. L'événement  $\bar{F}_t^{(i)}$ , complémentaire à l'événement  $F_t^{(i)}$ , signifie que le composant  $i$  est en marche à l'instant  $t$ .  $\vee$  est le connecteur de disjonction logique ;
- $S_{stock,t}^{(i)}$  et  $S_{outstd,t}^{(i)}$  sont respectivement le nombre de pièces de rechange du composant  $i$  en stock et celui présenté sur la commande en cours à l'instant  $t$ . Il convient de noter dans cette stratégie conjointe que  $\max\{S_{stock,t}^{(i)} + S_{outstd,t}^{(i)}, i \in \Omega, \forall t \in \mathbb{R}^+\} = 1$  ;
- $\mathbb{I}_{PRS,t}^{(i)}$  est la fonction indicatrice qui prend la valeur 1 lorsque la condition de remplacement préventif du composant  $i$  à l'instant  $t$  est satisfaite. Cette fonction doit toujours être remise à zéro après chaque remplacement (remplacement préventif ou correctif) effectué sur le composant  $i$ .

Dans le reste de cette sous-section, les autres parties du coût total des opérations de maintenance et d'approvisionnement en pièces de rechange du  $k^{ème}$  cycle d'inspection  $C_k^T$  (cf. équation (7.17)) sont présentées en détail.

### Coût d'inspection

À la date  $T_k$ , l'opération d'inspection est réalisée sur tous les composants survivants de l'ensemble  $S_D$  sauf sur les composants qui ont satisfait la condition de remplacement préventif à la date  $T_{k-1}$ , c-à-d. tels que  $R^{(i)}(T_k|T_{k-1}) \leq R_p^{(i)}$  mais pour lesquels aucune action de remplacement n'a été effectuée jusqu'à la date  $T_k$  (pour ce cas,  $\mathbb{I}_{PRS,T_k^-}^{(i)} = 1$ ). Finalement, le coût d'inspection du système dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection est calculé comme suit :

$$C_k^{insp} = c_{ins} \left[ n - |S_A| - \sum_{i \in S_D} (\mathcal{I}_{\{F_{T_k}^{(i)}\}} \vee \mathbb{I}_{PRS,T_k^-}^{(i)}) \right], \quad (7.18)$$

où,  $\mathcal{I}_{\{F_{T_k}^{(i)}\}}$  est la fonction indicatrice de l'événement  $F_{T_k}^{(i)}$ .

### Coûts de remplacement correctif et préventif dans le $k^{\text{ème}}$ cycle d'inspection

Dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection, comme mentionné dans la sous-section 7.3.1, lorsque le système tombe en panne à l'instant  $\tau_{k,q}^S$ , il peut-être soit remis immédiatement en fonctionnement à l'instant  $T_{k,u} \equiv \tau_{k,q}^S$  soit maintenu inopérant jusqu'à la commande normale en cours contenant la pièce de rechange « nécessaire » (cf. sous-section 7.3.1). Cette pièce sera livrée soit à  $T_{k-1} + L$ , soit à  $T_k$  (et dans ce cas  $T_{k,u} > \tau_{k,q}^S$ , avec  $u = q = 1, \dots, M'_k$ ).

- (a) *Coût de remplacement correctif et préventif dans l'intervalle  $(T_{k-1}, T_k)$*  : Pour calculer le coût  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp}$ , le nombre de restaurations  $M'_k$  du système après les pannes survenues dans l'intervalle de temps  $(T_{k-1}, T_k)$  est tout d'abord déterminé :

$$M'_k = \begin{cases} 0 & \text{si } ((M_k = 1) \wedge (T_{k,M_k} = T_k)) \text{ ou } (M_k = 0); \\ M_k - 1 & \text{si } (M_k \geq 2) \wedge (T_{k,M_k} = T_k); \\ M_k & \text{si } (M_k \geq 1) \wedge (T_{k,M_k} < T_k). \end{cases} \quad (7.19)$$

Dans le cas de  $M'_k = 0$ ,  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp} = 0$ . Sinon,  $C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp}$  est alors calculé en utilisant les équations (7.1), (7.3), (7.5), (7.13) et (7.19) :

$$\begin{aligned} C_{(T_{k-1}, T_k)}^{rempp} = & \sum_{u=q=1}^{M'_k} \left[ \underbrace{\sum_{i \in \Omega} (c_p^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{PR_{T_k,u}^{(i)}\}}}_{\text{coût de PR à } T_{k,u}} + \underbrace{\sum_{i \in \Omega} (c_c^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{CR_{T_k,u}^{(i)}\}}}_{\text{coût de CR à } T_{k,u}} \right. \\ & + \underbrace{C_{sp,e}^{(j)} \mathcal{I}_{\{EO_{T_k,u}^{(j)}, j \in \text{MCS}^{(i, \tau_{k,q}^S)}\}}}_{\text{coût de commande en urgence à } T_{k,u}} + \underbrace{c_{usd} + c_d (T_{k,u} - \tau_{k,q}^S)}_{\text{coût d'indisponibilité ressemblant jusqu'à } T_{k,u}} \\ & \left. - \underbrace{c_{ms} \left( \sum_{i \in \Omega} \mathcal{I}_{\{PR_{T_k,u}^{(i)}\}} + \sum_{i \in \Omega} \mathcal{I}_{\{CR_{T_k,u}^{(i)}\}} - 1 \right)}_{\text{profit économique à } T_{k,u}} \right] \quad (7.20) \end{aligned}$$

où, les événements suivants  $PR_{T_k,u}^{(i)}$ ,  $CR_{T_k,u}^{(i)}$  et  $EO_{T_k,u}^{(i)}$  sont définis comme suit :

- $PR_{T_k,u}^{(i)} = (\overline{F}_{T_k,u}^{(i)}) \wedge (\mathbb{I}_{PRS,T_k,u}^{(i)} = 1) \wedge (S_{stock,T_k,u}^{(i)} = 1)$  ;
- $CR_{T_k,u}^{(i)} = (F_{T_k,u}^{(i)}) \wedge (S_{stock,T_k,u}^{(i)} = 1)$  ;
- $EO_{T_k,u}^{(j)}$  est l'événement signifiant que la pièce de rechange du composant  $j$  appartenant à la coupe minimale défaillante  $MCS^{(i,\tau_{k,q}^S)}$  est choisie pour la commande en urgence (cf. sous-section 7.3.1 pour ce choix).

*Remarque* : Notons qu'après un remplacement correctif ou préventif réalisé sur le composant  $i$  à l'instant  $T_{k,u}$ ,  $\mathbb{I}_{PRS,T_k,u}^{(i)}$  devrait toujours être remise à zéro.

- (b) *Coût de remplacement correctif et préventif à la date  $T_k$*  : Si aucun composant n'est remplacé à la date  $T_k$ ,  $C_k^{rempp} = 0$ . Sinon,  $C_k^{rempp}$  est calculé en utilisant les équations (7.1), (7.2) et (7.3) :

$$\begin{aligned}
 C_k^{rempp} = & \underbrace{\sum_{i \in G_k} (c_p^{(i)} + c_{ms} + c_{psd} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}}) \mathcal{I}_{\{PR_{T_k}^{(i)}\}}}_{\text{coût de PR à } T_k} + \underbrace{\sum_{i \in \Omega \setminus G_k} (c_c^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{CR_{T_k}^{(i)}\}}}_{\text{coût de CR à } T_k} \\
 & + \underbrace{[c_{usd} + c_d (T_k - \tau_{k,M_k}^S)] \mathcal{I}_{\{T_k, M_k \geq 1 = T_k\}}}_{\text{coût d'indisponibilité ressemblant jusqu'à } T_k, M_k = T_k} \\
 & - \underbrace{c_{psd} \left[ \sum_{i \in G_k} \mathcal{I}_{\{PR_{T_k}^{(i)}\}} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - (1 - \mathcal{I}_{\{T_k, M_k \geq 1 = T_k\}}) \mathcal{I}_{\{G_k \text{ est groupe critique}\}} \right]}_{\text{profit économique à } T_k} \\
 & - \underbrace{c_{ms} \left( \sum_{i \in G_k} \mathcal{I}_{\{PR_{T_k}^{(i)}\}} + \sum_{i \in \Omega \setminus G_k} \mathcal{I}_{\{CR_{T_k}^{(i)}\}} - 1 \right)}_{\text{profit économique à } T_k} \quad (7.21)
 \end{aligned}$$

où,  $G_k$  est le groupe de composants survivants, qui sont sélectionnés pour bénéficier d'un remplacement préventif à la date  $T_k$  ; les événements  $PR_{T_k}^{(i)}$  et  $CR_{T_k}^{(i)}$  sont définis comme suit :

- $PR_{T_k}^{(i)} = (\overline{F}_{T_k}^{(i)}) \wedge (\mathbb{I}_{PRS,T_k}^{(i)} = 1) \wedge (S_{stock,T_k}^{(i)} = 1)$  ;
- $CR_{T_k}^{(i)} = (F_{T_k}^{(i)}) \wedge (S_{stock,T_k}^{(i)} = 1)$  ;

*Remarque* : Notons qu'après un remplacement correctif ou préventif réalisé sur le composant  $i$  à l'instant  $T_k$ ,  $\mathbb{I}_{PRS,T_k}^{(i)}$  devrait toujours être remise à zéro.

### Coûts liés à l'approvisionnement des pièces de rechange

- (a) *Coût de commande de pièces de rechange* : S'il existe une commande normale dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection, effectuée à la date  $T_{k-1}^+$ , alors  $C_k^{order}$  est formulé en utilisant les équations (7.7) et (7.9) :

$$\begin{aligned}
 C_k^{order} = & \left[ \underbrace{\sum_{i \in G_{k,1}} (c_{sp}^{(i)} + c_{os}) \mathcal{I}_{\{i \in G_{k,1}\}} + c_{ship}(n_{k,1})}_{\text{coût de commande pour les pièces de rechange livrées à } d_{k,1}} \right] \mathcal{I}_{\{n_{k,1} > 0\}} \\
 & - \underbrace{c_{os} (n_{k,1} + n_{k,2} - 1) \mathcal{I}_{\{n_{k,1} + n_{k,2} > 0\}}}_{\text{profit économique}} \\
 & + \left[ \underbrace{\sum_{j \in G_{k,2}, j \neq i} (c_{sp}^{(j)} + c_{os}) \mathcal{I}_{\{j \in G_{k,2}\}} + k_{ld} c_{ship}(n_{k,2})}_{\text{coût de commande pour les pièces de rechange livrées à } d_{k,2}} \right] \mathcal{I}_{\{n_{k,2} > 0\}}, \quad (7.22)
 \end{aligned}$$

où :

$$i \begin{cases} \in G_{k,1} & \text{si } ((F_{T_{k-1}}^{(i)}) \vee (\mathbb{I}_{PRS, T_{k-1}^+}^{(i)} = 1)) \wedge (S_{stock, T_{k-1}}^{(i)} = 0), \\ \notin G_{k,1} & \text{sinon ;} \end{cases}$$

et

$$j \begin{cases} \in G_{k,2} & \text{si } (R_p^{(j)} < R^{(j)}(T_k | T_{k-1}) \leq R_o^{(j)}) \wedge (S_{stock, T_{k-1}}^{(j)} = 0), \\ \notin G_{k,2} & \text{sinon.} \end{cases}$$

- (b) *Coût de gestion des stocks* : Dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection, le calcul du temps de gestion des stocks du composant  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) est fait en enregistrant l'instant de début, noté  $T_{k,start}^{(i)}$ , où la pièce de rechange  $i$  est stockée ou est répertoriée en stock.  $T_{k,start}^{(i)}$  peut-être fixé soit à  $T_{k-1}$  soit à  $T_{k-1} + L$ . L'instant d'épuisement de la pièce de rechange  $i$ , noté  $T_{k,end}^{(i)}$ , est celui auquel elle est enlevé du stock. Finalement, le coût de gestion des stocks du système dans le  $k^{\text{ème}}$  cycle d'inspection s'exprime par :

$$C_k^{hold} = \sum_{i \in \Omega} c_h^{(i)} (T_{k,end}^{(i)} - T_{k,start}^{(i)}). \quad (7.23)$$

Les instants  $T_{k,start}^{(i)}$  et  $T_{k,end}^{(i)}$  de la pièce de rechange  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) sont fixés comme suit :

**Cas 1** : si  $(S_{stock, T_{k-1}}^{(i)} = 1) \wedge ((\overline{F}_{T_{k-1}}^{(i)}) \wedge (\mathbb{I}_{PRS, T_{k-1}}^{(i)} = 0))$ , alors  $T_{k,start}^{(i)} := T_{k-1}$  et

$$T_{k,end}^{(i)} = \begin{cases} T_k & \text{si } (M_k = 0) \vee ((M_k \geq 1) \wedge (\overline{F}_{(T_{k-1}, T_k)}^{(i)})) ; \\ \max_{u=1, \dots, M_k} (T_{k,u} \mathcal{I}_{\{F_{T_{k,u}}^{(i)}\}}) & \text{si } (M_k \geq 1) \wedge (F_{(T_{k-1}, T_k)}^{(i)}) ; \end{cases}$$

**Cas 2** : si  $(S_{stock, T_{k-1}}^{(i)} = 1) \wedge ((F_{T_{k-1}}^{(i)}) \vee (\mathbb{I}_{PRS, T_{k-1}}^{(i)} = 1))$ , alors  $T_{k,start}^{(i)} = T_{k,end}^{(i)} := T_{k-1}$  ;

**Cas 3** : si  $(S_{stock, T_{k-1}}^{(i)} = 0) \wedge ((F_{T_{k-1}}^{(i)}) \vee (\mathbb{I}_{PRS, T_{k-1}}^{(i)} = 1))$ , alors  $T_{k,start}^{(i)} := T_{k-1} + L$  et  $T_{k,end}^{(i)} := \min_{u=1, \dots, M_k} (T_{k,u} \mathcal{I}_{\{T_{k-1} + L \leq T_{k,u} \leq T_k\}}, T_k)$  ;

**Cas 4 :** si  $(S_{stock, T_{k-1}}^{(i)} = 0) \wedge ((\bar{F}_{T_{k-1}}^{(i)}) \wedge (\mathbb{I}_{PRS, T_{k-1}}^{(i)} = 0))$ , alors  $T_{k, start}^{(i)} = T_{k, end}^{(i)} := T_{k-1}$ .

Il convient de noter que  $\min(\emptyset, A \neq \emptyset) = A$ .

### Détermination des paramètres variables optimaux de décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange

Le but de l'optimisation de la stratégie proposée est de déterminer les meilleures valeurs des paramètres de décision pour lesquels le coût global minimal est atteint. Tout d'abord, on introduit les équations suivantes (7.18)-(7.23) à l'expression (7.17) afin d'obtenir le coût total  $C_k^T$  du système pour le  $k^{ème}$  cycle d'inspection. Ensuite,  $C_k^T$  est introduit dans l'équation (7.16). Enfin, les  $2n + 1$  paramètres optimaux  $(R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*}$  et  $T^*)$  de la stratégie conjointe  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$  peuvent être obtenues en minimisant la fonction de coût moyen asymptotique total  $C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$  :

$$C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*}) = \min_{T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)}} C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$$

$$\text{sujet à : } 0 \leq L < T, \tag{7.24}$$

$$R_p^{(i)} = \min_{i=1, \dots, n} (\varpi_p I_B^{(i)}, 1),$$

$$R_o^{(i)} = \min_{i=1, \dots, n} (\varpi_o I_B^{(i)}, 1),$$

$$0 \leq \varpi_p < \varpi_o \leq \frac{1}{\min_{i=1, \dots, n} (I_B^{(i)})}.$$

L'évaluation des performances de la stratégie conjointe proposée est obtenue par simulation de Monte Carlo.

## 7.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une nouvelle stratégie conjointe de maintenance prévisionnelle. Elle est basée sur la stratégie de maintenance prévisionnelle développée dans le chapitre 4, et sur l'approvisionnement des pièces de rechange pour s'appliquer à des systèmes multi-composants non-identiques avec structure complexe. Le comportement de vieillissement des différents composants peut suivre l'un de deux types de modèles : des modèles de dégradation graduelle ou des modèles de durée de vie en fonction du type d'information obtenue (niveau de dégradation ou âge) sur ce composant.

Dans cette stratégie, la mesure d'importance structurelle de chaque composant et sa fiabilité prévisionnelle sont étudiées et exploitées pour la prise de décision de maintenance préventive et d'approvisionnement des pièces de rechange. De plus, afin de réduire des coûts de commande en

---

urgence et de renforcer la dépendance économique positive, la maintenance corrective groupée est adaptée aux dates de pannes du système. Ces dates sont exploitées comme opportunités de remplacements préventifs possibles.

La prise en compte dans le processus de prise de décision des informations conditionnelles pour le pronostic de durée de vie des composants, de la structure du système, de la dépendance d'états (marche/panne) et des dépendances économiques positive et négative permet une meilleure modélisation pour les systèmes à composants multiples. La stratégie conjointe proposée ainsi peut permettre de mieux s'adapter aux applications réelles.

Enfin, afin d'évaluer et d'optimiser les performances économiques de cette stratégie conjointe, un modèle mathématique de coût permettant une évaluation numérique est construit. Sur la base de ce modèle de coût, les valeurs optimales des paramètres de décision incluant  $T^*$ ,  $R_p^{(i)*}$  et  $R_o^{(i)*}$  sont déterminées. Elles permettent de calculer le coût moyen asymptotique minimal  $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ . Dans le chapitre suivant, on présentera une étude numérique afin de montrer comment la stratégie conjointe proposée peut être utilisée dans l'optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange pour un système multi-composant avec structure complexe.



# Chapitre 8

## Étude numérique

### 8.1 Introduction

La stratégie conjointe  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ , qui est proposée dans le chapitre 7, hérite des avantages de la stratégie  $(T, R_p^{(i)})$  qui ont été montrés dans les chapitres 4 et 6. Notre but dans ce chapitre n'est pas de comparer ou de souligner l'efficacité de la stratégie  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ , mais d'illustrer comment cette stratégie peut être appliquée à la maintenance et l'approvisionnement des pièces de rechange pour un système multi-composant avec structure complexe pour lequel le comportement de vieillissement et de défaillance de chaque composant peut être décrit par l'un de deux types de modèles : modèles de dégradation graduelle et modèles de durée de vie. Nous nous concentrons sur l'optimisation conjointe de performance de maintenance et d'approvisionnement de pièces de rechange et sur l'étude d'impacts des paramètres de coût sur la performance économique du système envisagé.

Ce chapitre est organisé de la façon suivante. Un système cohérent à 7 composants est présenté avec ses paramètres caractéristiques comme cas d'étude dans la section 8.2. Ensuite, l'optimisation des performances du système maintenu est effectuée dans la section 8.3. La section 8.4 propose des analyses de sensibilité aux paramètres de coût du système. Finalement, nous présentons dans la section 8.5 quelques conclusions issues de ce chapitre.

### 8.2 Cas d'étude

L'étude dans ce chapitre est effectuée sur un système automatique d'une sous-station électrique constituée des 7 composants suivants [130] : 1) alimentation DC (DCP), 2) commutateur Ethernet (ESW1), 3) commutateur Ethernet (ESW2), 4) serveur de centre de contrôle du réseau (NCCS), 5) ordinateur personnel industriel (IPC), 6) interface homme-machine (HMI) et 7) unité de contrôle baie (BCU). La topologie et le diagramme de fiabilité sont présentés sur

la figure 8.1. Un tel système automatique peut être couramment trouvé dans de nombreuses

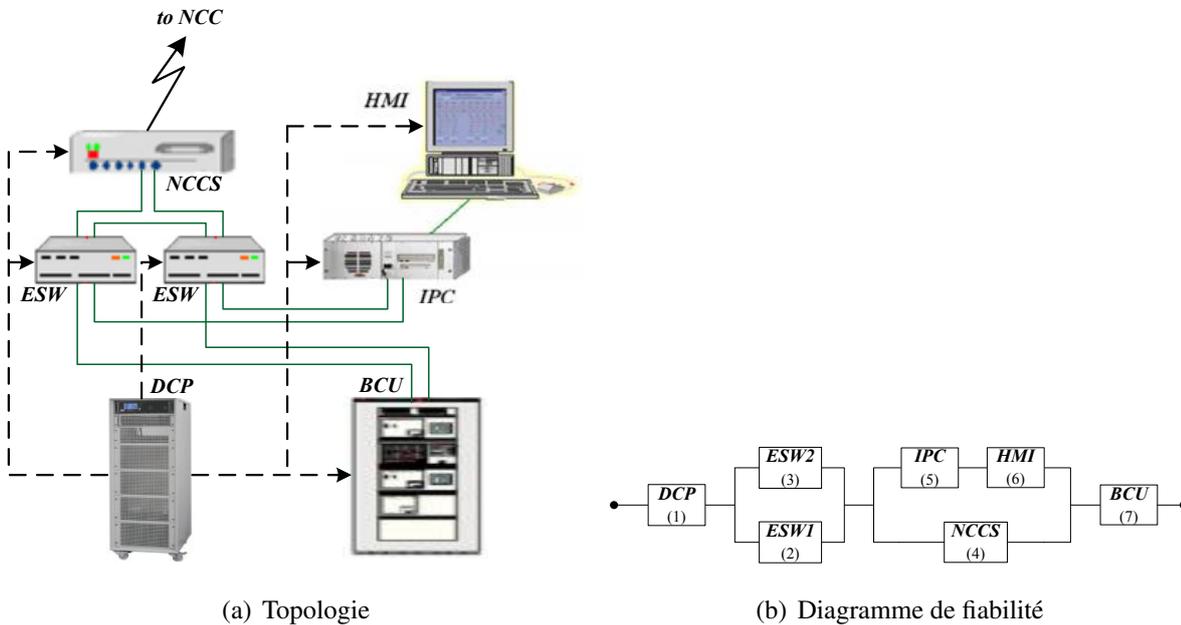


FIGURE 8.1 – Système automatique d’une sous-station électrique.

installations industrielles où il existe différents modes de contrôle et de surveillance (un mode local et un mode à distance, par exemple).

Pour le système considéré, un serveur basé sur l’IPC recueille des données issues de tous les périphériques locaux (les BCU, par exemple) et permet de créer une base de données de la sous-station électrique. L’HMI utilise les données de cette base de données pour opérer et superviser la sous-station électrique. En outre, la communication joue un rôle très important pour un système d’automatisation de sous-station électrique, les deux composants ESW1 et ESW2 en connexion redondante sont donc utilisés pour fournir l’accès aux données et le contrôle du NCCS. En raison de l’importance absolue de la DCP dans ce système, elle est un composant critique qui est connecté en série avec d’autres composants. La fiabilité de ce système est déterminée par la fiabilité de chacun des composants et la relation entre eux. Cette relation peut-être dépeinte sur le diagramme de fiabilité représenté sur la figure 8.1(b).

Supposons que l’ensemble  $S_D$  est formé de quatre composants qui sont la DCP, l’ESW1, le NCCS et la BCU. Leurs comportement de dégradation est décrit par le processus stochastique Gamma homogène  $\{X_t^{(i)}, t \geq 0\}$  ( $i = 1, 2, 4, 7$ ). Ils sont surveillés. Rappelons que pour le processus de Gamma, un incrément de dégradation du composant  $i$  entre deux instants  $T_k$  et  $T_{k+1}$  est une variable aléatoire dont la fonction de densité de probabilité est une fonction Gamma,  $f_{\alpha^{(i)}(T_{k+1}-T_k), \beta^{(i)}}(x)$ , avec pour paramètre de forme  $\alpha^{(i)}(T_{k+1} - T_k) \in \mathbb{R}^{+*}$  et pour paramètre d’échelle  $\beta^{(i)} \in \mathbb{R}^{+*}$ . Ceci a déjà été mentionné dans l’équation (3.1) du chapitre 3. La fiabilité

### 8.3. Optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange

prévisionnelle des composants se dégradant suivant un processus de dégradation Gamma est déterminée en utilisant l'équation (3.7) du chapitre 3.

Le comportement de défaillance des trois composants restants : l'ESW2, l'IPC et l'HMI de l'ensemble  $S_A$  est supposés être décrits par la loi de Weibull  $[0, +\infty)$  [307]. La fonction de densité de probabilité associée à la date de défaillance et la fiabilité prévisionnelle de ces composants sont respectivement donnés dans les équations (B.1) et équation (B.2) de l'annexe B.

TABLE 8.1 – Paramètres de coût d'exploitation et paramètres de dégradation du système entier.

| $c_{ins} = 10, c_{ms} = 30, c_d = 250, c_{usd} = 200, c_{psd} = 100,$                 |                |               |           |                |              |                |             |             |             |             |
|---|----------------|---------------|-----------|----------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $L = 5, c_{os} = 15, c_{ship}^0 = 30, c_{ship}^d = 5, n_0 = 1, k_e = 2, k_{ld} = 0.5$ |                |               |           |                |              |                |             |             |             |             |
| Composant   | $\alpha^{(i)}$ | $\beta^{(i)}$ | $Z^{(i)}$ | $\gamma^{(i)}$ | $\eta^{(i)}$ | $c_{sp}^{(i)}$ | $c_p^{(i)}$ | $c_c^{(i)}$ | $c_h^{(i)}$ | $I_B^{(i)}$ |
| DCP   | 0.5            | 1.3           | 32        |                |              | 300            | 90          | 135         | 1.2         | 0.234375    |
| ESW1  | 0.8            | 1.25          | 30        |                |              | 120            | 36          | 54          | 0.48        | 0.078125    |
| ESW2  |                |               |           | 2.5            | 34           | 120            | 36          | 54          | 0.48        | 0.078125    |
| NCCS  | 0.8            | 1.5           | 35        |                |              | 180            | 54          | 81          | 0.72        | 0.140625    |
| IPC   |                |               |           | 2.8            | 37           | 150            | 45          | 67          | 0.6         | 0.046875    |
| HMI   |                |               |           | 3.1            | 42           | 150            | 45          | 67          | 0.6         | 0.046875    |
| BCU   | 0.6            | 1.5           | 35        |                |              | 250            | 75          | 122         | 1           | 0.234375    |

Tous les paramètres liés aux opérations d'inspection, de maintenance, de commande et de gestion des stocks, aux arrêts du système, aux délais de commandes à la dégradation, à la défaillance, au facteur d'importance structurel des composants sont listés dans le tableau 8.1.

### 8.3 Optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange de stratégie proposée

À tout composant du système est associé :

- un seuil de remplacement préventif  $R_p^{(i)}$  permettant de déterminer quand il doit être préventivement remplacé ;
- un seuil de commande de pièce de rechange  $R_o^{(i)}$  permettant de déterminer quand la pièce de rechange de ce composant doit être commandée pour préparer le prochain remplacement.

Rappelons que dans ce modèle conjoint, une commande normale potentielle de pièces de rechange est lancée juste après une inspection à l'instant  $T_{k-1}$ . Deux dates de livraison sont possibles afin de préparer les pièces de rechange nécessaires pour le cycle d'inspection  $k$ . Une livraison à la date  $d_{k,2}$  permet d'être opérationnel pour les remplacements préventifs à l'instant  $T_k$ , tandis qu'une livraison à la date  $d_{k,1}$  permet de réapprovisionner dès que possible quelques

pièces de rechange si le remplacement préventif ou correctif ne peut pas être effectué sur les composants correspondants à l'instant  $T_{k-1}$  à cause de l'indisponibilité des pièces de rechange nécessaires. Cette absence peut-être due à l'incertitude de la prédiction de RUL conditionnelle. Il est clair que la disponibilité de pièces de rechange à l'instant  $d_{k,1}$  permet de réduire la durée d'indisponibilité du système et d'éviter des coûts de commande d'urgence. Cependant, elles peuvent faire augmenter le coût de gestion des stocks. Par conséquent, il est nécessaire de choisir attentivement les paramètres de décision que constituent l'intervalle inter-inspection  $T$ , le coefficient de remplacement préventif  $\varpi_p$  et le coefficient de commande de pièces de rechange  $\varpi_o$  afin d'équilibrer ces coûts.

Pour chercher la valeur des paramètres de décision correspondant à la valeur minimale du coût moyen asymptotique total, un grand nombre de réalisations de simulation sont effectuées. La simulation est exécutée sur la base du processus de décision de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange et du modèle de coût développés respectivement dans la section 7.3 et la section 7.4 du chapitre 7. Le coût moyen asymptotique total de la stratégie conjointe,  $C_\infty^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ , est évalué avec différentes valeurs des trois paramètres de décision  $T$ ,  $\varpi_p$  et  $\varpi_o$  en se basant sur les équations (7.17) et (7.16). La valeur minimale du coût moyen asymptotique total peut-être obtenue en utilisant l'équation (7.24). Pour les paramètres d'entrée du système donnés dans le tableau 8.1, la figure 8.2 montre les résultats optimaux pour le système soumis à la stratégie conjointe proposée.

La sous-figure 8.2(a) présente des évolutions de convergence du coût moyen asymptotique total optimal,  $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$  en fonction du nombre d'itérations  $N_b$ . Ces résultats montrent que le coût moyen asymptotique total optimal est stable à partir de  $N_b \geq 22,000$  iterations. Les sous-figures 8.2(b), (c) et (d) donnent les valeurs du coût moyen asymptotique total obtenu en fonction du nombre d'itérations (simulations)  $N_b = 25000$ . La valeur minimale du coût moyen asymptotique total est égale à 21.595 unités de coût. La sous-figure 8.2(b) montre que le coût moyen asymptotique total varie avec les différents valeurs du cycle d'inspection  $T$  et que la valeur minimale de ce coût est obtenue au cycle d'inspection optimal  $T^* = 67$ . La sous-figure 8.2(c) présente la forme convexe de la surface du coût moyen asymptotique total considéré pour une durée de cycle d'inspection optimal  $T^* = 67$ , comme une fonction du coefficient de remplacement préventif  $\varpi_p$  et du coefficient de commande de pièces de rechange  $\varpi_o$ . Dans cette sous-figure, le coût moyen asymptotique total minimal obtenu correspond au coefficient optimal de remplacement préventif optimal  $\varpi_p^* = 3.6$  et à celui de commande de pièces de rechange  $\varpi_o^* = 7.5$ . La sous-figure 8.2(d) montre le contour de la surface du coût moyen asymptotique total montré sur la sous-figure 8.2(c).

En introduisant  $\varpi_p^*$  et  $\varpi_o^*$  à l'équation (7.11), les seuils optimaux de remplacement préventif ainsi que de commande de pièces de rechange de chacun des composants du système obtenus sont alors présentés dans le tableau 8.2. Les résultats montrent que plus les composants sont

### 8.3. Optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange

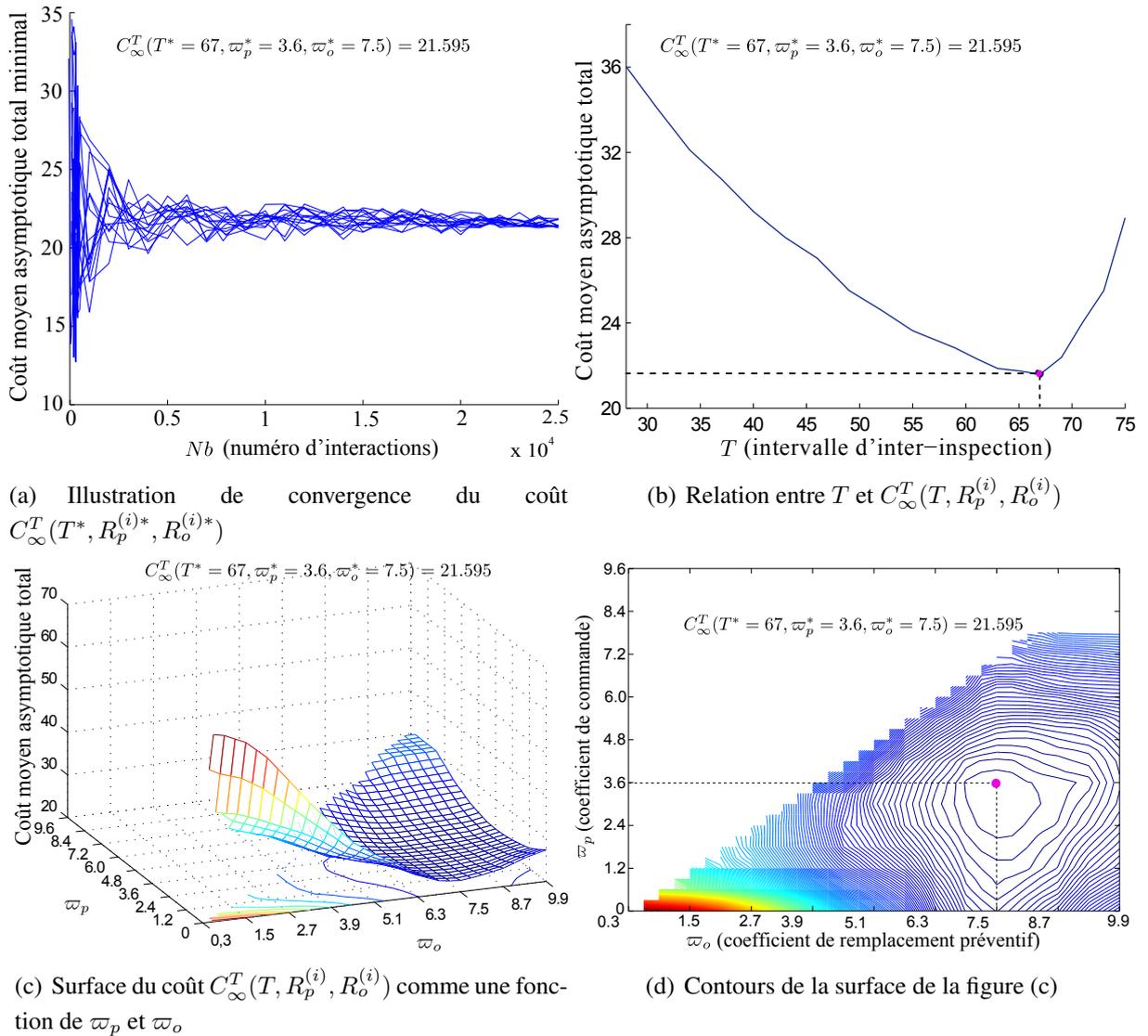


FIGURE 8.2 – Présentation de résultats optimaux liés au coût  $C_{\infty}^T(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$ .

TABLE 8.2 – Seuils optimaux de remplacement préventif et de commande de pièces de rechange de chaque composant.

| Composant    | DCP    | ESW1   | ESW2   | NCCS   | IPC    | HMI    | BCU    |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $R_p^{*(i)}$ | 0.8438 | 0.2813 | 0.2812 | 0.5062 | 0.1688 | 0.1688 | 0.8438 |
| $R_o^{*(i)}$ | 1      | 0.5859 | 0.5859 | 1      | 0.3516 | 0.3516 | 1      |

importants, plus leur seuil de remplacement préventif est élevé. La même conclusion est tirée pour les seuils de commande de pièce de rechange des composants. Le seuil de commande de pièce de rechange de chaque composant est beaucoup plus élevé que son seuil de remplacement

préventif. Il est également noté dans ce cas que le seuil de commande optimal des composants DCP, NCCS et BCU est égal à un, cela signifie que la pièce de rechange de ces composants doit être régulièrement réapprovisionnée à chaque date d'inspection  $T_k$ .

**Étude d'impact du seuil de commande de pièce de rechange sur la stratégie  $(T, R_p^{(i)}, R_o^{(i)})$**

Pour considérer l'impact du seuil de commande,  $R_o^{(i)}$ , sur la stratégie conjointe proposée, nous examinons un cas spécifique où le seuil de commande de chaque composant est fixé égal à son seuil de remplacement préventif, soit  $R_o^{(i)} = R_p^{(i)}$ . Les évolutions obtenues du coût moyen asymptotique total avec différentes valeurs de  $T$  et de  $\varpi_o = \varpi_p$  sont respectivement présentées dans les sous-figures 8.3(a) et 8.3(b). Le coût moyen asymptotique total minimal obtenu dans ce cas est égal à 23.872 unités de coût. Il est associé aux paramètres de décision optimaux  $T^* = 61$  et  $\varpi_o^* = \varpi_p^* = 4$ . Le coût total du cas spécifique où le seuil de commande de pièce de rechange n'est pas considéré est supérieur de 9.54% à celui du cas avec seuil de commande présenté ci-dessus.

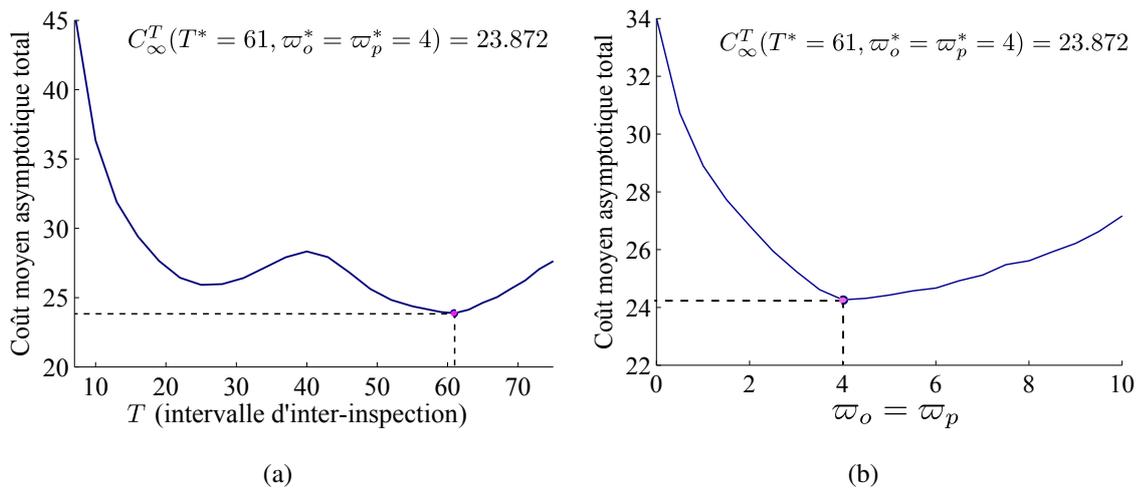


FIGURE 8.3 – Évolution du coût moyen asymptotique total du cas spécifique avec (a) différentes valeurs de  $T$  et avec (b) différentes valeurs de  $\varpi_p$  (où  $\varpi_o = \varpi_p$ ).

Ceci peut-être expliqué par le fait que, lorsque  $R_o^{(i)}$  est égal à  $R_p^{(i)}$  (ou  $\varpi_o$  est égal à  $\varpi_p$ ), toutes les pièces de rechange d'une possible commande normale sont livrées à la date  $d_{k,1}$  et aucune pièce de rechange n'est réapprovisionnée à la date  $d_{k,2}$ . En d'autres termes, la plupart des pièces de rechange, qui servent aux remplacements préventifs aux dates d'inspection  $T_k$ , ne sont pas préparées à l'avance. Par conséquent, ceci peut conduire à une augmentation des coûts de remplacement correctif et des coûts d'indisponibilité du système, par exemple lorsque plusieurs composants survivants avec un niveau de détérioration élevé ne sont pas préventivement

remplacés « juste à temps ». Afin de limiter l'augmentation de ces coûts, le coefficient optimal de remplacement préventif dans ce cas spécifique est fixé à une valeur plus élevée ( $\varpi_p^* = 4$ ) par rapport au cas précédent ( $\varpi_p^* = 3.6$ ). Le cycle d'inspection optimal dans ce cas spécifique est fixé à une valeur plus basse ( $T^* = 61$ ) par rapport au cas précédent ( $T_p^* = 67$ ).

## 8.4 Études de sensibilité de stratégie conjointe proposée

Dans cette section, on considère l'influence de plusieurs paramètres principaux du système, tels que  $c_{ship}^0$ ,  $c_{os}$ ,  $c_{ship}^d$ ,  $c_h^{(i)}$ ,  $L$ ,  $c_{ms}$ ,  $c_{psd}$ ,  $c_d$ ,  $c_{usd}$  et  $C_{sp,e}^{(i)}$ , sur la performance économique de la stratégie conjointe proposée. Pour ce faire, on fait varier respectivement chacun de ces paramètres dans un intervalle assez large, en fixant tous les paramètres restant. On observe l'évolution du coût moyen asymptotique total minimal et des paramètres de décision optimaux correspondant à ces valeurs minimales de coût total. Les paramètres envisagés sont classés en deux groupes : les paramètres liés à l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange et ceux liés à l'opération de maintenance.

### 8.4.1 Influence de paramètres liés à l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange

Cinq différentes situations correspondant aux cinq paramètres  $c_{ship}^0$ ,  $c_{os}$ ,  $c_{ship}^d$ ,  $c_h^{(i)}$ ,  $L$  sont étudiées ici. Ces paramètres sont directement liés à l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange du système.

- (a) *Coût de transport minimum variable* :  $c_{ship}^0$  varie de 10 à 70 unités de coût, et tous les paramètres du système restent inchangés (cf. tableau 8.1). Les résultats numériques obtenus sont présentés dans le tableau 8.3.

TABLE 8.3 – Coût moyen asymptotique total variant avec différentes valeurs de  $c_{ship}^0$ .

| $c_{ship}^0$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|--------------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|              | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 10           | 66                              | 3.4          | 6.8          | 21.14                                     |
| 20           | 67                              | 3.4          | 7.2          | 21.37                                     |
| 30           | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                     |
| 40           | 68                              | 3.6          | 7.7          | 21.83                                     |
| 50           | 68                              | 3.7          | 7.8          | 21.99                                     |
| 60           | 68                              | 3.8          | 8.1          | 22.21                                     |
| 70           | 69                              | 3.8          | 8.3          | 22.42                                     |

Il n'est pas surprenant de constater que plus le coût  $c_{ship}^0$  est important, plus le coût moyen asymptotique total est élevé. Lorsque le coût de transport minimum est élevé, le seuil de commande de tous composants est fixé à une valeur élevée pour concentrer la plupart des pièces de rechange d'une commande normale à date la  $d_{k,2}$  au lieu de répartir sur les deux dates  $d_{k,1}$  et  $d_{k,2}$ . Cependant, ceci conduit à l'augmentation du coût total dû à l'augmentation du coût de gestion des stocks. Afin de se limiter cette augmentation du coût total, le seuil de remplacement préventif de tous composants et l'intervalle inter-inspection du système sont fixés à une valeur élevée. Cela engendre une réduction du niveau de stock et de la fréquence des commandes.

(b) *Coût de mise en œuvre de commande variable* :  $c_{os}$  varie de 5 à 55 unités de coût, et tous

TABLE 8.4 – Coût moyen asymptotique total variant avec différentes valeurs de  $c_{os}$ .

| $c_{os}$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|----------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|          | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 5        | 65                              | 3.4          | 7.4          | 21.42                                       |
| 15       | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 25       | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.76                                       |
| 35       | 67                              | 3.8          | 7.7          | 21.93                                       |
| 45       | 68                              | 3.9          | 7.8          | 22.08                                       |
| 55       | 68                              | 3.9          | 8.0          | 22.20                                       |

les paramètres du système restent inchangés (cf. tableau 8.1). Les résultats numériques obtenus présentés dans le tableau 8.4 montrent que l'influence du coût  $c_{os}$  est similaire à celle du coût  $c_{ship}^0$ . Concrètement, le seuil de commande, le seuil de remplacement préventif de tous composants et l'intervalle d'inter-inspection du système augmentent avec l'augmentation du coût  $c_{os}$ . L'augmentation du seuil de commande permet de grouper plus de pièces de rechange en une commande afin d'économiser des coûts de mise en œuvre. L'augmentation du seuil de remplacement préventif et de l'intervalle inter-inspection permet de réduire le niveau de stock et de réduire la fréquence des commandes, respectivement.

(c) *Taux de coût de transport variable* : du point de vue du coût de transport, il convient d'étudier l'influence du taux de coût  $c_{ship}^d$ . Ce coût est associé aux pièces de rechange lorsque leur emballage dépasse le nombre minimal  $n_0$  (cf. l'équation (7.8) du chapitre 7). On fait varier  $c_{ship}^d$  de 0 à 25 unités de coût en fixant tous les paramètres restants du système (cf. tableau 8.1). Les résultats numériques sont présentés dans le tableau 8.5.

Les résultats obtenus montrent que la variation des trois paramètres de décision optimaux est contraire à celle de deux cas précédents qui s'intéressaient aux coûts  $c_{ship}^0$  et  $c_{os}$ . Plus

TABLE 8.5 – Coût moyen asymptotique total variant avec différentes valeurs de  $c_{ship}^d$ .

| $c_{ship}^d$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|--------------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|              | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 0            | 69                              | 3.8          | 7.9          | 21.47                                       |
| 5            | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 10           | 66                              | 3.6          | 7.4          | 21.70                                       |
| 15           | 66                              | 3.6          | 7.2          | 21.79                                       |
| 20           | 65                              | 3.4          | 7.2          | 21.90                                       |
| 25           | 64                              | 3.4          | 7.1          | 21.98                                       |

précisément, lorsque  $c_{ship}^d$  est élevé, le seuil de commande de tous composants est fixé à une valeur faible. Cela permet de réduire le nombre de pièces de rechange, qui dépassent le nombre minimal  $n_0$ , afin de limiter la croissance du coût total du système. Le seuil de remplacement préventif de tous composants se réduit aussi à une valeur faible pour réduire le risque d'épuisement. Pourtant, de tels réglages des paramètres peut conduire à prolonger le temps d'indisponibilité du système et en conséquence à augmenter le coût global. Pour limiter ces influences négatives, l'intervalle inter-inspection du système est fixé à une valeur faible. Ceci signifie que le système est inspecté plus fréquent pour réduire le temps d'indisponibilité.

- (d) *Coût de gestion des stocks variable* : les coûts de gestion des stocks des différentes pièces de rechange sont différents. Afin de mieux observer l'influence de ces coûts sur la performance économique de la stratégie conjointe proposée, on considère une évolution des coûts  $c_h^{(i)}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , à travers un coefficient noté  $k_h$ . lorsque  $k_h$  varie de 0 à 4 (pour  $k_h = 1$ ,  $c_h^{(i)}$ , les valeurs obtenues sont celles données dans le tableau 8.1). Tous les paramètres restants du système sont gardés constants. Les résultats numériques présentés

TABLE 8.6 – Coût moyen asymptotique total variant avec différentes valeurs de  $k_h$ .

| $k_h$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|-------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|       | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 0     | 71                              | 3.8          | 7.9          | 20.21                                       |
| 0.5   | 68                              | 3.6          | 7.6          | 20.93                                       |
| 1     | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 1.5   | 66                              | 3.4          | 7.3          | 22.19                                       |
| 2     | 66                              | 3.4          | 7.3          | 22.67                                       |
| 3     | 65                              | 3.3          | 7            | 23.68                                       |
| 4     | 63                              | 3            | 6.7          | 24.57                                       |

dans le tableau 8.6 montrent que les trois paramètres de décision optimaux sont fixés à des valeurs faibles quand  $k_h$  augmente. Ceci signifie que l'influence du coût de gestion des stocks est similaire à celle du taux de coût de transport  $c_{ship}^d$ . L'interprétation des phénomènes est donc similaire au cas de  $c_{ship}^d$ .

- (e) *Délai d'approvisionnement de pièce de rechange variable* :  $L$  varie de 1 à 7 unités de temps, et tous les autres paramètres du système restent inchangés (cf. le tableau 8.1). Les

TABLE 8.7 – Coût moyen asymptotique total pour différentes valeurs de  $L$ .

| $L$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|-----|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|     | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 1   | 69                              | 3.1          | 5.5          | 18.84                                     |
| 3   | 68                              | 3.4          | 6.2          | 19.54                                     |
| 5   | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                     |
| 7   | 65                              | 4.1          | 8.7          | 31.45                                     |

résultats numériques obtenus et présentés dans le tableau 8.7 montrent que le coût moyen asymptotique total augmente rapidement avec  $L$ . L'augmentation de  $L$  conduit à réduire l'intervalle inter-inspection et à augmenter le seuil de remplacement préventif ainsi que le seuil de commande des composants. Ceci signifie que le système doit être inspecté plus fréquemment, les composants remplacés préventivement plus tôt et les pièces de rechange des composants commandées plus tôt de manière à prévenir ou réduire les occurrences de pannes de composants pouvant conduire à l'arrêt du système.

*Remarque* : Tous les résultats d'analyse de sensibilité dans cette sous-section montrent que le coût moyen asymptotique total du système est assez sensible au coût de gestion des stocks et au délai d'approvisionnement de pièce de rechange.

### 8.4.2 Influence de paramètres liés à l'opération de maintenance

Dans cette sous-section, cinq autres situations qui liées directement à l'opération de maintenance du système sont également étudiées. Elles correspondent à la sensibilité à cinq autres paramètres, qui sont  $c_{ms}$ ,  $c_{psd}$ ,  $c_d$ ,  $c_{usd}$  et  $C_{sp,e}^{(i)}$ .

- (a) *Coût de mise en œuvre de maintenance variable* :  $c_{ms}$  varie de 0 à 125 unités de coût, et tous les paramètres du système restent inchangés (cf. le tableau 8.1).

Les résultats numériques obtenus présentés dans le tableau 8.8 montrent que lorsque le coût de mise en œuvre de maintenance est élevé, les deux seuils optimaux de commande et de remplacement préventif de tous composants sont fixés à des valeurs élevées. Ceci

TABLE 8.8 – Coût moyen asymptotique total suivant différentes valeurs de  $c_{ms}$ .

| $c_{ms}$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|----------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|          | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 0        | 66                              | 3            | 7.1          | 21.07                                       |
| 10       | 66                              | 3.2          | 7.1          | 21.24                                       |
| 20       | 67                              | 3.3          | 7.4          | 21.42                                       |
| 30       | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 40       | 67                              | 3.8          | 7.7          | 21.73                                       |
| 50       | 67                              | 4.0          | 7.8          | 21.84                                       |
| 75       | 67                              | 4.2          | 7.9          | 22.25                                       |
| 100      | 67                              | 4.5          | 8.1          | 22.64                                       |
| 125      | 67                              | 4.7          | 8.4          | 22.94                                       |

peut-être expliqué par le fait que l'augmentation du seuil de remplacement préventif vise à grouper plus de composants pour les activités de remplacement préventif afin d'économiser des coûts de mise en œuvre. Simultanément, l'augmentation du seuil de commande permet de répondre au risque d'épuisement des ressources correspondantes.

- (b) *Coût d'arrêt planifié variable* : D'une manière identique à l'étude de sensibilité de  $c_{ms}$ , on fait varier  $c_{psd}$  de 0 à 500 en fixant tous les paramètres restants du système (cf. tableau 8.1).

TABLE 8.9 – Coût moyen asymptotique total pour différentes valeurs de  $c_{psd}$ .

| $c_{psd}$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|-----------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|           | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 0         | 70                              | 3.9          | 7.9          | 21.55                                       |
| 50        | 68                              | 3.8          | 7.7          | 21.57                                       |
| 100       | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 150       | 67                              | 3.4          | 7.5          | 21.61                                       |
| 300       | 65                              | 3.3          | 7.1          | 21.64                                       |
| 400       | 63                              | 3.2          | 7.2          | 21.66                                       |
| 500       | 62                              | 3.1          | 7.2          | 21.68                                       |

Les résultats numériques indiqués dans le tableau 8.9 montrent que la variation des paramètres de décision de la stratégie dans ce cas est très différente de celle du cas du coût de mise en œuvre de maintenance. Plus précisément, les trois paramètres de décision diminuent graduellement avec  $c_{psd}$ . Ceci peut-être expliqué car l'augmentation de  $c_{psd}$  conduit l'augmentation du coût global. Pour limiter cette croissance du coût global, la stratégie

fixe le seuil de remplacement préventif des composants à une valeur plus faible afin de réduire le nombre d'interventions de remplacement préventif sur les systèmes. Néanmoins, ceci peut conduire à augmenter le risque de panne système. Afin de contrôler ce risque, le système doit être inspecté plus fréquemment. Le seuil de commande tend à diminuer afin de réduire le niveau, et en conséquence les coûts de gestion, des stocks. Les résultats dans le tableau 8.9 montrent également que le coût total est moins sensible au coût d'arrêt planifié du système.

(c) *Coût d'arrêt non-planifié variable :*

TABLE 8.10 – Coût moyen asymptotique total pour différentes valeurs

| (a) de $c_d$ |                                 |              |              |   |
|--------------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
| $c_d$        | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|              | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 50           | 69                              | 3.1          | 6.8          | 20.12                                     |
| 150          | 68                              | 3.3          | 7.1          | 20.92                                     |
| 250          | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                     |
| 350          | 66                              | 3.8          | 7.8          | 22.21                                     |
| 450          | 65                              | 4.1          | 8.3          | 22.77                                     |
| 550          | 64                              | 4.4          | 8.7          | 23.32                                     |
| 650          | 62                              | 4.8          | 9.2          | 23.87                                     |
| 750          | 62                              | 5.3          | 9.5          | 24.32                                     |
| 850          | 61                              | 5.7          | 9.9          | 24.75                                     |
| 1000         | 60                              | 6.2          | 10.5         | 25.32                                     |
| 1200         | 58                              | 6.9          | 11.4         | 26.15                                     |

| (b) de $c_{usd}$ |                                 |              |              |   |
|------------------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
| $c_{usd}$        | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_\infty^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|                  | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 0                | 69                              | 3.2          | 7.1          | 18.17                                     |
| 50               | 69                              | 3.2          | 7.1          | 19.10                                     |
| 100              | 68                              | 3.3          | 7.4          | 19.96                                     |
| 200              | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                     |
| 300              | 65                              | 4.0          | 8.4          | 23.01                                     |
| 450              | 64                              | 4.5          | 8.8          | 25.21                                     |
| 600              | 62                              | 4.9          | 9.3          | 27.38                                     |
| 750              | 61                              | 5.5          | 9.8          | 29.21                                     |

Afin d'étudier l'influence des coûts liés à l'arrêt non-planifié du système, on fait varier

respectivement  $c_d$  de 50 à 1200 unités de coût et  $c_{usd}$  de 0 à 750 unités de coût. Les résultats obtenus dans ce cas sont respectivement présentés dans les tableaux 8.10(a) et 8.10(b). Tous les résultats obtenus montrent que l'impact de  $c_{usd}$  est similaire à celui de  $c_d$ . Concrètement, les deux paramètres de décision incluant le seuil de remplacement préventif et le seuil de commande des composants augmentent. Dans le même temps, l'intervalle inter-inspection du système diminue quand  $c_d$  ou  $c_{usd}$  augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que si  $c_d$  ou  $c_{usd}$  est élevé, les composants doivent être préventivement remplacés plus tôt (par rapport à leur âge réel) et le système doit être inspecté plus fréquemment. Il en résulte une diminution de l'impact négatif de l'augmentation de deux coûts. L'augmentation du seuil de commande permet de satisfaire la demande d'épuisement des opérations de remplacement préventif.  $c_d$  et  $c_{usd}$  ont une influence très importante sur le coût total du système.

- (d) *Coût de commande d'urgence variable* : On s'intéresse à l'impact du coût de commande d'urgence  $C_{sp,e}^{(i)}$ , où  $C_{sp,e}^{(i)} = k_e C_{sp,std}^{(i)}$ , à travers le coefficient  $k_e$ . Pour ce faire, on fait varier  $k_e$  de 1.5 à 8 en fixant les paramètres restants du système (cf. le tableau 8.1). Les

TABLE 8.11 – Coût moyen asymptotique total suivant différentes valeurs de  $C_{sp,e}^{(i)}$ .

| $k_e$ | Paramètres de décision optimaux |              |              | $C_{\infty}^T(T^*, R_p^{(i)*}, R_o^{(i)*})$ |
|-------|---------------------------------|--------------|--------------|---|
|       | $T^*$                           | $\varpi_p^*$ | $\varpi_o^*$ |   |
| 1.5   | 68                              | 3.4          | 7.4          | 21.50                                       |
| 2     | 67                              | 3.6          | 7.5          | 21.59                                       |
| 2.5   | 67                              | 3.6          | 7.6          | 21.61                                       |
| 3     | 66                              | 3.8          | 7.8          | 21.63                                       |
| 4     | 65                              | 4.1          | 8.0          | 21.67                                       |
| 5     | 65                              | 4.3          | 8.3          | 21.71                                       |
| 6     | 64                              | 4.4          | 8.4          | 21.75                                       |
| 7     | 64                              | 4.5          | 8.7          | 21.79                                       |
| 8     | 63                              | 4.7          | 8.9          | 21.83                                       |

résultats numériques présentés dans le tableau 8.11 montrent que l'impact du coût de commande d'urgence est le même que celui de  $c_d$  et  $c_{usd}$ . Plus précisément, les seuils de remplacement préventif et de commande des composants augmentent et l'intervalle inter-inspection du système se réduit en même temps quand  $C_{sp,e}^{(i)}$  augmente. L'explication pour ce cas peut être également trouvée dans les analyses d'impact de  $c_d$  ou  $c_{usd}$ . Le coût moyen asymptotique total du système est moins affecté par le coût de commande d'urgence.

## 8.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une étude numérique dans laquelle la stratégie conjointe proposée (dans le chapitre 7) est appliquée à la résolution du problème d'optimisation conjointe de maintenance et d'approvisionnement des pièces de rechange sur un système à plusieurs composants non-identiques. La stratégie proposée permet d'intégrer les deux types de modèle représentant le vieillissement et la défaillance (modèle de dégradation graduelle et modèle de durée de vie) de chacun des composants du système en fonction du type d'information disponible (c-à-d. niveau de dégradation ou âge) à l'instant envisagé.

La fonction objectif du modèle conjoint proposé représente le coût moyen asymptotique total du système par unité de temps. L'intervalle inter-inspection, le seuil de remplacement préventif et le seuil de commande des différents composants sont choisis comme paramètres de décision. La fonction objectif et les paramètres de décision peuvent être obtenus à partir des données d'entrée en utilisant une technique de simulation numérique.

Les résultats obtenus à par optimisation du modèle conjoint montrent l'existence d'une valeur minimale de la fonction objectif sur les trois dimensions des trois paramètres de décision. De plus, un cas spécifique est étudié et permet de montrer que le coût total du système augmente significativement si l'approvisionnement de pièces de rechange n'est pas assuré correctement. Ceci démontre la faisabilité de la stratégie conjointe proposée.

L'étude de sensibilité des performances économiques du modèle conjoint par rapport aux coûts d'intervention montre que la sensibilité du modèle aux changements des paramètres de décision est relativement modérée. Lorsqu'un paramètre de coût du système change, les paramètres de décision du système sont automatiquement réglés afin de s'adapter à cette nouvelle situation. Les variations des paramètres de décision du modèle sont indiquées dans la section d'étude de sensibilité de ce chapitre. Grâce à l'ajustement simultané des paramètres de décision par optimisation conjointe, le modèle proposé permet de réduire significativement les coûts d'opération et d'intervention sur le système par rapport à une approche d'optimisation individuelle où les opérations de maintenance et celles de gestion des stocks sont considérées séparément. Les représentations théoriques et numériques de cette partie III ont été publiées dans une conférence internationale [192] et soumis à *IEEE Transaction on Reliability* [193].

# Conclusion générale

Les travaux et les résultats présentés dans ce manuscrit concernent le développement d'outils d'aide à la décision en maintenance pour des systèmes multiple-composants, notamment lorsqu'ils présentent une structure/configuration complexe. Concrètement, nous nous sommes intéressés à la construction de modèles pour l'évaluation et l'optimisation de stratégies dans une approche de maintenance prévisionnelle. Le manuscrit est composé de trois parties centrales.

*La première partie* est relative au positionnement de la problématique d'étude et à une présentation des « matériaux » de support associés. Plus précisément, nous présentons brièvement les démarches généralement adoptées pour modéliser des systèmes multi-composants avec structure complexe, les différentes approches de maintenance et l'évolution des stratégies de maintenance au cours des dernières décennies. En s'appuyant sur cette base, nous positionnons rapidement notre problématique d'étude liée au regroupement d'opérations de maintenance sur la base de l'analyse du processus de modélisation de la performance des systèmes complexes. Ces systèmes sont ceux qui présentent des structures complexes sous l'hypothèse principale d'existence de dépendances économiques entre composants. L'étude se place dans un cadre fiabiliste de modèles de planification de la maintenance conditionnelle. De plus, nous montrons la nécessité de développer des modèles permettant l'optimisation conjointe de maintenance conditionnelle et d'approvisionnement des pièces de rechange pour les systèmes concernés.

Dans le chapitre 2, nous proposons une présentation des méthodes existant dans la littérature sur les points cités dans le chapitre précédent. Cette présentation nous permet d'introduire plus précisément la notion de complexité du système en termes de structure, d'indicateurs de durée de vie, de dégradation de chacun des composants et de dépendances économiques entre composants d'un même système. En raison de l'asymétrie entre composants au sens de la structure du système, l'importance des composants varie. Il est donc nécessaire d'évaluer quantitativement cette importance pour chacun des composants ou pour un groupe de composants. Elle peut être exploitée dans la prise de décision grâce à l'utilisation des facteurs d'importance. C'est pourquoi une étude bibliographique sur facteurs d'importance est également réalisée et présentée en plus du problème de modélisation de systèmes multi-composants avec structure complexe.

Pour développer une stratégie de maintenance conditionnelle, il faut faire attention aux problèmes liés à la surveillance et à l'action de maintenance. Le choix de l'indicateur d'aide à

la décision de maintenance et à la planification des interventions est primordial. Finalement, une analyse plus approfondie des approches de planification et de regroupement d'activités de maintenance conditionnelle est proposée pour les systèmes multi-composants avec dépendances économiques. Ceci nous permet de rendre compte d'un état de l'art spécifique organisé autour des approches dynamiques et statiques de planification.

La complexité des problèmes abordés et les difficultés techniques de résolution et de modélisation associées nous amènent au choix d'approches de maintenance opportunistes avec planification statique. Les méthodes de résolution des problèmes sont envisagées par le biais de critères à horizons de temps infinis. Les modèles choisis sont statiques en termes de règle de planification, mais dynamiques en termes de prise en compte de l'état de santé de chacun des composants et de la structure du système. Ces éléments sont continuellement mis à jour aux dates de prise de décision. L'évaluation des fonctions objectifs reste un challenge en soi. Il convient de noter ici le très faible nombre d'articles se concentrant sur les systèmes redondants dans le contexte de la maintenance conditionnelle. Aucun ne ressort dans un cadre de systèmes à structure complexe. Les modèles proposés visent l'optimisation conjointe de la maintenance prévisionnelle et de l'approvisionnement des pièces de rechange. Nous avons ainsi choisi de diviser les travaux de ce manuscrit suivant les deux parties décrites ci-après.

**La deuxième partie** est relative aux stratégies de maintenance prévisionnelle de type opportuniste, sans prise en compte d'opération d'approvisionnement des pièces de rechange. Elle est composée de quatre chapitres. Le premier chapitre présente dans le détail d'une part les problèmes liées à la modélisation de dégradation et d'autre part les structures des coûts d'opération et d'intervention pour un système multi-composant à structure complexe au sens précisé ci-dessus. Ce chapitre est la base de tous les chapitres restants de ce manuscrit. Les deux chapitres suivants visent à proposer deux nouvelles stratégies de maintenance prévisionnelle correspondant à deux différentes approches de regroupement :

- Dans la première stratégie, l'approche de regroupement d'actions de maintenance préventive est indirecte en considérant que la décision d'intervention sur un composant donné se fait en comparant sa fiabilité prévisionnelle à un seuil de maintenance préventive. Ce seuil, pour un composant donné, est synthétisé à partir de son facteur d'importance structurel et de sa fiabilité prévisionnelle. Cette dernière peut être estimée aux dates programmées d'inspection. Une règle de décision de maintenance corrective est également proposée afin de diminuer certains coûts de mise en œuvre supplémentaires. Concrètement et par exemple en cas de redondances, la défaillance d'un composant ou un groupe de composants n'entraîne pas forcément l'arrêt total du système. Il apparaît alors judicieux de laisser ces composants dans leur état de panne jusqu'à la date d'inspection suivante. Lorsque le système tombe en panne avant cette date, les composants défaillants sont simultanément remplacés dès l'occurrence de panne avec prise en compte de leur impor-

---

tance et de la contrainte liée au soutien logistique ;

- Dans la seconde stratégie, l'approche de regroupement d'actions de maintenance préventive est envisagée dans le cadre d'une prise de décision de maintenance multi-niveaux. À une date programmée d'inspection, le meilleur groupe de composants survivants est déterminé et remplacé préventivement. Ceci est réalisé en supposant que : *i*) si la fiabilité prévisionnelle du système estimée à cette date est supérieure à un seuil de maintenance préventive, le groupe est vide ; *ii*) sinon, le groupe de composants choisi est celui qui offre le meilleur rapport qualité-prix, qui est défini comme le rapport de l'amélioration de la fiabilité du système au coût lié au remplacement préventif de ce groupe. Ceci peut-être évalué grâce à un « facteur d'amélioration de fiabilité basé sur coût », qui est également proposé dans cette thèse. À la différence de la première stratégie, le remplacement correctif des composants défectueux dans cette stratégie n'est effectué que à la date d'inspection.

Les deux stratégies proposées prennent en compte l'information conditionnelle de pronostic de tous les composants, la dépendance d'états (marche/panne) entre composants, la structure du système et la dépendance structurelle entre composants du point de vue de la fiabilité ainsi que les dépendances économiques entre composants du point de vue de la maintenance. Finalement, le dernier chapitre est introduit en conclusion de cette partie par le rappel des caractéristiques importantes et la comparaison qualitative des deux approches proposées. Une étude numérique dans laquelle l'optimisation des performances économiques et l'analyse de sensibilité liée aux coûts de maintenance est ensuite réalisée. Elle montre les avantages ainsi que les désavantages de chacune des approches proposées.

**La troisième partie** se centre sur la proposition d'une extension de l'un des deux modèles de maintenance prévisionnelle proposés dans la partie II. Il s'agit de développer un modèle conjoint, qui permet de regrouper et d'optimiser simultanément les opérations de maintenance et les opérations d'approvisionnement des pièces de rechange. Contrairement à la partie II où la maintenance suppose que les pièces de rechange requises pour effectuer les actions de maintenance sont disponibles au bon moment, la maintenance dans cette partie suppose que les pièces de rechange des composants du système doivent être commandées et livrées selon une stratégie d'approvisionnement des pièces de rechange. Cette stratégie doit être adaptée à la stratégie de maintenance donnée. En outre, une étude numérique est présentée afin d'illustrer comment la stratégie conjointe proposée peut être appliquée. Cette étude est consacrée à la maintenance et l'approvisionnement des pièces de rechange pour un cas réel de systèmes d'automatisation de postes électriques. L'étude a démontré la faisabilité et la flexibilité de la stratégie conjointe proposée ainsi que son efficacité par rapport à un cas classique pour lequel l'opération d'approvisionnement des pièces de rechange n'est pas prise en compte.



# Perspectives

L'ensemble des résultats théoriques et numériques que nous avons obtenus nous permet d'envisager certaines perspectives à court et à long termes concernant le développement de stratégies de maintenance plus efficaces pour la maintenance de systèmes complexes à composants multiples intégrant les problématiques de structure du système, de dépendance entre composants, d'actualisation et de volatilité des coûts, de modélisation du processus de vieillissement des composants, d'environnement d'opération, etc.

Deux stratégies efficaces de maintenance prévisionnelle ont été développées dans la partie II de cette thèse, mais seulement l'une d'elles a été couplée avec la stratégie d'approvisionnement des pièces de rechange. Ainsi, dans un avenir proche, il serait intéressant d'étendre la deuxième stratégie proposée en une stratégie conjointe dans laquelle les règles de décision de maintenance sont associées à celles d'approvisionnement des pièces de rechange afin d'améliorer encore la performance économique du système.

Les perspectives à long terme portent essentiellement sur les stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants à dégradation graduelle continue.

**Modèles de maintenance prévisionnelle de systèmes de production :** Nos modèles seront également étudiés pour des systèmes de production multi-composants dont le comportement de dégradation dépend non seulement caractéristiques propres de chaque composants mais aussi des performances en exploitation et des autres composants. Il s'agit notamment d'étudier des possibilités d'extensions de modèles de dégradation au niveau composant pour permettre la prise en compte de l'impact des performances en termes de capacité de production attendues. Ces modèles de dégradation permettront ensuite de synthétiser des indicateurs dynamiques au niveau système intégrant les dépendances entre composants et l'ensemble des informations disponibles sur le système à un instant donné. On s'intéressera également aux règles de décisions de maintenance, et aux politiques d'inspections dynamiques basées sur ces indicateurs. Des algorithmes d'optimisation seront mis en œuvre afin de déterminer les actions de maintenance préventive optimales.

**Modèles de maintenance prévisionnelle plus généraux :** Il peut être indispensable de penser à des modèles de maintenance prévisionnelle plus flexibles et plus pratiques en prenant en compte

des actions de maintenance imparfaites, de durée de ces actions de maintenance, de contraintes du nombre de réparateurs disponibles, etc.

**Planification de maintenance prévisionnelle :** Ce manuscrit se limite aux stratégies de maintenance avec la planification d'interventions de type statique. Les dates d'interventions d'une stratégie sont fixées a priori sur la base d'un échancier d'inspections périodique. Les actions possibles sont ensuite mises en œuvre (ou non) en fonction des divers scénarii observés. L'avantage certain de cette approche par rapport à une approche dynamique est la facilité de mise en œuvre dans un contexte intégré (la planification de la maintenance étant une partie d'un processus de gestion plus global). Par contre, l'une des difficultés majeures de cette approche réside dans la définition même de règles de décision qui se veulent pragmatiques et efficaces. Ainsi, il peut être indispensable de penser, dans le cadre de stratégies de regroupement, à des approches dynamiques de planification d'interventions. Les dates d'interventions (inspections et/ou maintenances) peuvent alors s'adapter en temps réel aux conditions de fonctionnement et de dégradation du système. Sous cette approche de planification, le contexte décisionnel global de maintenance évolue de manière dynamique en fonction de changement de conditions opérationnelles, de configuration temporaire des systèmes mais aussi de décisions externes à la maintenance de type exigences de production sur l'horizon de planification.

**Interactions entre composants :** Nous constatons que la dépendance stochastique entre composants est également présente dans plusieurs systèmes de production. C'est par exemple le cas pour des systèmes avec partage de charge ("load sharing system"). Lorsqu'un composant s'arrête ou tombe en panne, sa charge va être répartie sur certains autres composants du système (stations de pompage de l'eau, stations électriques, par exemple). Les composants recevant plus de charges sont sur-sollicités et leur probabilité de panne est donc augmentée. Ainsi, afin de construire un modèle de maintenance pour de tels systèmes, la prise en compte complémentaire de la dépendance stochastique est nécessaire.

**Optimisation du regroupement :**

- Concernant la méthode d'évaluation de performance des stratégies de maintenance : La méthode d'évaluation numérique (par les techniques de simulation de Monte-Carlo) est utilisée pour évaluer le coût de maintenance. Cette méthode est robuste, mais le temps de calcul peut augmenter rapidement lorsque le nombre de composants est élevé. Nous devons donc nous concentrer aussi sur les développements mathématiques pour permettre de combiner des méthodes d'évaluation numérique et des méthodes d'évaluation analytique dans le calcul du coût de maintenance afin de réduire le temps de calcul.
- Concernant la fonction d'évaluation de performance des stratégies de maintenance : Dans la réalité, la disponibilité ou la fiabilité du système sont aussi importantes que le coût. Ainsi, l'optimisation multi-objectifs (minimiser le coût de maintenance et maximiser la

---

disponibilité du système en même temps) ou l'optimisation de coût sous contraintes de budget de maintenance annuel limité ou de demande de disponibilité minimale du système sur un horizon spécifique) peuvent être envisagées dans les travaux futurs.



# **Annexes**



# Annexe A

## Stratégie de maintenance prévisionnelle existante : stratégie $(T, R_p, R_{op})$

### A.1 Règles de décision de maintenance

La stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  présentée est étendue de la stratégie de maintenance prévisionnelle  $(\Delta T, R_p, R_u)$  rapportée dans l'article [145] dans lequel la dépendance économique négative et la dépendance structurelle entre composants ne sont pas prises en compte dans la prise de décision de maintenance.

La planification des actions de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  est statique et la décision d'intervention sur un composant survivant donnée se fait en comparant sa fiabilité prévisionnelle à la prochaine date d'inspection à un seuil de remplacement préventif global, noté  $R_p$ ,  $0 \leq R_p \leq 1$ . De plus, afin d'augmenter l'impact positif de la dépendance économique, la décision d'intervention opportunistes est également proposée et traitée par un seuil de remplacement opportuniste, noté  $R_{op}$ . Les remplacements préventifs doivent être effectués sur les composants plus détériorés que les remplacements opportunistes, il est donc raisonnable de supposer que  $0 \leq R_p < R_{op} \leq 1$ .

La dépendance économique négative est considérée que si le regroupement des activités de remplacement préventif conduit le système à un arrêt, un coût de pénalité  $c_{psd}$  est encouru. Pour cette stratégie, chaque date  $T_k$ , la fiabilité prévisionnelle de chacun des composants survivants est prédite en premier  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k)$  ( $i = 1, \dots, n$ ). La suivante est les règles de décision de maintenance placées pour le composant  $i$  :

- si le composant  $i$  a déjà été tombé en panne, il doit être correctivement remplacé ;
- si le composant  $i$  est survivant, mais  $R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p$ , il est alors préventivement remplacé ;
- si le système a été tombé en panne ou si le système est en train de fonctionner, mais l'intervention de remplacement préventif sur les composants sélectionnés conduit le système

- à un arrêt (c-à-d. groupe de ces composants sélectionnés est groupe critical). Ceci est considéré comme une opportunité de remplacer les autres composants survivants. Dans ce cas, le composant  $j$  ( $j \neq i$ ) sera également remplacé si  $R_p < R^{(j)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_{op}$  ;
- si toutes les règles de décision ci-dessus ne sont pas remplies, aucune action de maintenance n'est alors réalisée sur le composant  $i$  à l'instant  $T_k$ .

## A.2 Optimisation de maintenance

### A.2.1 Modèle mathématique d'évaluation

On note  $G_k$  le groupe de composants survivants qui est choisi pour le remplacement préventif à la date d'inspection  $T_k$ . La même manière présentée dans la section 5.4, le coût moyen asymptotique par unité de temps sur un horizon infini du système sous la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  peut être formulé comme suit :

$$\begin{aligned}
 C_\infty(T, R_p, R_{op}) = & \frac{1}{E[T_{rem} - \sum_{k=1}^{Nb} (T_k - \tau_k^S)]} E \left\{ \sum_{k=1}^{Nb} \left[ c_{ins} (n - |S_A| - \sum_{i \in \Omega \setminus (G_k \cup S_A)} \mathcal{I}_{\{x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}\}}) \right. \right. \\
 & + \sum_{i \in \Omega \setminus G_k} (c_c^{(i)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(i)} = x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}) \vee (A_{T_k}^{(i)} = a_{T_k}^{(i)} \geq \tau^{(i)})\}} + \underbrace{[(T_k - \tau_k^S) c_d + c_{usd}] \mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau_k^S\}}}_{\text{coût d'indisponibilité pendant } (T_{k-1}, T_k)} \\
 & + \sum_{i \in G_k} C_p^{(i)} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p\}} + \sum_{j \in G_k, j \neq i} (c_p^{(j)} + c_{ms}) \mathcal{I}_{\{R_p < R^{(j)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_{op}\}} \mathcal{I}_{\{\text{système arrête}\}} \\
 & - c_{ms} \left( \sum_{i \in \Omega \setminus G_k} \mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(i)} = x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}) \vee (A_{T_k}^{(i)} = a_{T_k}^{(i)} \geq \tau^{(i)})\}} + \sum_{i \in G_k} \mathcal{I}_{\{R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_p\}} \right. \\
 & \quad \left. + \sum_{j \in G_k, j \neq i} \mathcal{I}_{\{R_p < R^{(j)}(T_{k+1}|T_k) \leq R_{op}\}} \mathcal{I}_{\{\text{système arrête}\}} - 1 \right) \\
 & \left. - c_{psd} \left( \sum_{i \in G_k} \mathcal{I}_{\{i \text{ est critique ou critique temporaire}\}} - (1 - \mathcal{I}_{\{\tau^{(i)} = \tau_k^S\}}) \mathcal{I}_{\{G_k \text{ est un groupe critique}\}} \right) \right\}, \quad (\text{A.1})
 \end{aligned}$$

coût d'arrêt planifié économisé à  $T_k$  : PED ou NED

où,  $\mathcal{I}_{\{(X_{T_k}^{(i)} = x_{T_k}^{(i)} \geq Z^{(i)}) \vee (A_{T_k}^{(i)} = a_{T_k}^{(i)} \geq \tau^{(i)})\}} = 1$  si le composant  $i$  a déjà tombé en panne, 0 sinon.

### A.2.2 Détermination des paramètres variables de décision optimaux

Les paramètres variables de décision optimaux  $\{T^*, R_p^*, R_{op}^*\}$  de la stratégie  $(T, R_p, R_{op})$  peuvent être obtenus en minimisant la fonction d'objectif de coût moyen asymptotique  $C_\infty(T, R_p, R_{op})$  :

$$C_\infty(T^*, R_p^*, R_{op}^*) = \min_{T, R_p, R_{op}} \left\{ C_\infty(T, R_p, R_{op}), 0 < T, 0 \leq R_p < R_{op} \leq 1 \right\}. \quad (\text{A.2})$$

## Annexe B

# Fonction de densité de probabilité et fiabilité prévisionnelle de la loi de Weibull

### B.1 Fonction de densité de probabilité de la loi de Weibull

La fonction de densité de probabilité du composant  $i$ , dont les défaillances se produisent selon une loi de Weibull, est donnée par :

$$\frac{\gamma^{(i)}}{\eta^{(i)}} \left( \frac{t}{\eta^{(i)}} \right)^{(\gamma^{(i)}-1)} e^{-\left( \frac{t}{\eta^{(i)}} \right)^{\gamma^{(i)}}}, \quad (\text{B.1})$$

où :

- $\gamma^{(i)}$  est le paramètre de forme et  $\eta^{(i)} > 0$  ;
- $\eta^{(i)}$  est le paramètre d'échelle et  $\eta^{(i)} > 0$ .

### B.2 Fiabilité prévisionnelle de la loi de Weibull

La fiabilité prévisionnelle du composant  $i$ , dont les défaillances se produisent selon une loi de Weibull, est donnée par :

$$R^{(i)}(T_{k+1}|T_k) = e \left[ \left( \frac{T_k}{\eta^{(i)}} \right)^{\gamma^{(i)}} - \left( \frac{T_k+T}{\eta^{(i)}} \right)^{\gamma^{(i)}} \right]. \quad (\text{B.2})$$



# Bibliographie

- [1] 60-000, F. X. Maintenance industrielle - fonction maintenance. *Norme AFNOR* (2002).
- [2] ABDEL-HAMEED, M. Inspection and maintenance policies of devices subject to deterioration. *Advances in Applied Probability* (1987), 917–931.
- [3] ABDEL-HAMEED, M. Degradation processes : An overview. In *Advances in Degradation Modeling*. Springer, 2010, pp. 17–25.
- [4] AHMAD, R., AND KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers & Industrial Engineering* 63, 1 (2012), 135–149.
- [5] AHMAD, R., AND KAMARUDDIN, S. A review of condition-based maintenance decision-making. *European Journal of Industrial Engineering* 6, 5 (2012), 519–541.
- [6] ALBIN, S., AND CHAO, S. Preventive replacement in systems with dependent components. *Reliability, IEEE Transactions on* 41, 2 (1992), 230–238.
- [7] ANTELMAN, G. R., AND SAVAGE, I. R. Surveillance problems : Wiener processes. *Naval research logistics quarterly* 12, 1 (1965), 35–55.
- [8] ARAL, B. *Scheduling screening inspections for replaceable and non-replaceable systems*. PhD thesis, Texas A&M university, 2008.
- [9] ARCHIBALD, Y., AND DEKKER, R. Modified block-replacement for multiple-component systems. *IEEE Transactions on Reliability* 45, 1 (1996), 75–83.
- [10] ARMSTRONG, M. J., AND ATKINS, D. R. Joint optimization of maintenance and inventory policies for a simple system. *IIE transactions* 28, 5 (1996), 415–424.
- [11] ASMUSSEN, S. *Applied probability and queues*, 1987.
- [12] ASMUSSEN, S. *Applied probability and queues*. Springer Verlag, 2003.
- [13] ASSAF, D., AND SHANTHIKUMAR, J. G. Optimal group maintenance policies with continuous and periodic inspections. *Management Science* 33, 11 (1987), 1440–1452.
- [14] AVEN, T., AND BERGMAN, B. Optimal replacement times : a general set-up. *Journal of Applied Probability* (1986), 432–442.

- [15] AVEN, T., AND GAARDER, S. Optimal replacement in a shock model : discrete time. *Journal of Applied Probability* (1987), 281–287.
- [16] BAGLEE, D. AND JANTUNEN, E. Can equipment failure modes support the use of a condition based maintenance strategy ? *Procedia CIRP* 22 (2014), 87–91.
- [17] BANJEVIC, D., AND JARDINE, A. Calculation of reliability function and remaining useful life for a markov failure time process. *IMA Journal of Management Mathematics* 17, 2 (2006), 115.
- [18] BANJEVIC, D., JARDINE, A., MAKIS, V., AND ENNIS, M. A control-limit policy and software for condition-based maintenance optimization. *INFOR* 39, 1 (2001), 32–50.
- [19] BARATA, J., SOARES, C., MARSEGUERRA, M., AND ZIO, E. Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for on condition maintenance optimisation. *Reliability Engineering & System Safety* 76, 3 (2002), 255–264.
- [20] BARBERA, F., SCHNEIDER, H., AND KELLE, P. A condition based maintenance model with exponential failures and fixed inspection intervals. *Journal of the Operational research Society* 47, 8 (1996), 1037–1045.
- [21] BARBERA, F., SCHNEIDER, H., AND WATSON, E. A condition based maintenance model for a two-unit series system. *European Journal of Operational Research* 116, 2 (1999), 281–290.
- [22] BARKER, C., AND NEWBY, M. Nonperiodic inspections to guarantee a prescribed level of reliability. In *Statistical Models and Methods for Biomedical and Technical Systems*. Springer, 2008, pp. 109–125.
- [23] BARKER, C., AND NEWBY, M. Optimal non-periodic inspection for a multivariate degradation model. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 1 (2009), 33–43.
- [24] BARLOW, R., AND PROSCHAN, F. Statistical theory of reliability and life testing : probability models. Tech. rep., DTIC Document, 1975.
- [25] BARLOW, R., AND PROSCHAN, F. *Mathematical theory of reliability*, vol. 17. Siam, 1996.
- [26] BARROS, A. *Maintenance des systèmes multicomposants sous surveillance imparfaite : modélisation stochastique et optimisation*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2003.
- [27] BARROS, A. *Maintenance des systèmes multicomposants sous surveillance imparfaite : modélisation stochastique et optimisation*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2003.
- [28] BARROS, A. De l’information de surveillance à la construction d’indicateurs de décision en fiabilité et en maintenance : contribution par approches stochastiques. *HPR thesis, Université de Technologie de Compiègne, France* (2010).

- 
- [29] BEBBINGTON, M., LAI, C., AND ZITIKIS, R. Reduction in mean residual life in the presence of a constant competing risk. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 24, 1 (2008), 51–63.
- [30] BÉRENGUER, C. On the mathematical condition-based maintenance modelling for continuously deteriorating systems. *International Journal of Materials and Structural Reliability* 6, 2 (2008), 133–151.
- [31] BERENQUER, C., CHU, C., AND GRALL, A. Inspection and maintenance planning : An application of semi-markov decision processes. *Journal of Intelligent Manufacturing* 8, 5 (1997), 467–476.
- [32] BÉRENGUER, C., GRALL, A., AND CASTANIER, B. Simulation and evaluation of condition-based maintenance policies for multi-component continuous-state deteriorating systems. In *Proceedings of the conference on Foresight and precaution, Balkema, Rotterdam (2000)* (2000), pp. 275–282.
- [33] BÉRENGUER, C., GRALL, A., DIEULLE, L., AND ROUSSIGNOL, M. Maintenance policy for a continuously monitored deteriorating system. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 17, 02 (2003), 235–250.
- [34] BERG, M., AND EPSTEIN, B. A modified block replacement policy. *Naval Research Logistics Quarterly* 23, 1 (1976), 15–24.
- [35] BERGMAN, B. Optimal replacement under a general failure model. *Advances in Applied Probability* (1978), 431–451.
- [36] BERK, E., AND MOINZADEH, K. Analysis of maintenance policies for m machines with deteriorating performance. *IIE Transactions* 32, 5 (2002), 433–444.
- [37] BIRNBAUM, Z. On the importance of different components in a multicomponent system. Tech. rep., Wasshington university, Sattle lab of statiscal research, 1968.
- [38] BLOCH-MERCIER, S. A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a markov deteriorating system. *European Journal of Operational Research* 142, 3 (2002), 548–576.
- [39] BLOCH-MERCIER, S. A preventive maintenance policy with sequential checking procedure for a markov deteriorating system. *European Journal of Operational Research* 142, 3 (2002), 548–576.
- [40] BOGUE, R. Sensors for condition monitoring : a review of technologies and applications. *Sensor Review* 33, 4 (2013), 295–299.
- [41] BORGONOVO, E. Differential, criticality and birnbaum importance measures : An application to basic event, groups and sscs in event trees and binary decision diagrams. *IEEE Transactions on Reliability* 92, 10 (2007), 1458–1467.

- [42] BORGONOVO, E. Differential importance and comparative statics : an application to inventory management. *International Journal of Production Economics* 111, 1 (2008), 170–179.
- [43] BOUVARD, K., ARTUS, S., BÉRENGUER, C., AND COCQUEMPOT, V. Condition-based dynamic maintenance operations planning & grouping. application to commercial heavy vehicles. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 6 (2011), 601–610.
- [44] BROWN, M., AND PROSCHAN, F. Imperfect repair. *Journal of Applied probability* (1983), 851–859.
- [45] BUDAI, G., DEKKER, R., AND NICOLAI, R. Maintenance : an evolutionary perspective. In *Complex System Maintenance Handbook*. Springer, 2008, pp. 21–48.
- [46] BUDAI, G., DEKKER, R., AND NICOLAI, R. Maintenance and production : a review of planning models. In *Complex System Maintenance Handbook*. Springer, 2008, pp. 321–344.
- [47] BUDAI-BALKE, G. *Operations research models for scheduling railway infrastructure maintenance*. Rozenberg Publishers, 2009.
- [48] BYINGTON, C., ROEMER, M., AND GALIE, T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance. In *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE* (2002), pp. 2815–2824.
- [49] CADINI, F., ZIO, E., AND AVRAM, D. Model-based monte carlo state estimation for condition-based component replacement. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 3 (2009), 752–758.
- [50] CADINI, F., ZIO, E., AND AVRAM, D. Monte carlo-based filtering for fatigue crack growth estimation. *Probabilistic Engineering Mechanics* 24, 3 (2009), 367–373.
- [51] CARR, M., AND WANG, W. An approximate algorithm for prognostic modelling using condition monitoring information. *European Journal of Operational Research* 211, 1 (2011), 90–96.
- [52] CASTANIER, B. *Modélisation stochastique et optimisation de la maintenance conditionnelle des systèmes à dégradation graduelle*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2001.
- [53] CASTANIER, B., BÉRENGUER, C., AND GRALL, A. A model for maintenance cost optimization under availability constraints. In *Safety and Reliability, ESREL 2001 - Toward a safer world* (2001), E. Zio, M. Demichela, and N. Piccinini, Eds., vol. 2, pp. 1313–1320.
- [54] CASTANIER, B., BÉRENGUER, C., AND GRALL, A. A sequential condition-based repair/replacement policy with non-periodic inspections for a system subject to continuous wear. *Applied Stochastic Models in Business and Industry* 19, 4 (2003), 327–347.

- 
- [55] CASTANIER, B., GRALL, A., AND BÉRENGUER, C. Une structure multiseuil pour l'optimisation de la maintenance des systèmes à détérioration continue. *Journal européen des systèmes automatisés* 35, 10 (2001), 1235–1262.
- [56] CASTANIER, B., GRALL, A., AND BÉRENGUER, C. A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system. *Reliability Engineering & System Safety* 87, 1 (2005), 109–120.
- [57] CESTER, A., CIMINO, S., MIRANDA, E., CANDELORI, A., GHIDINI, G., AND PACCAGNELLA, A. Statistical model for radiation-induced wear-out of ultra-thin gate oxides after exposure to heavy ion irradiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 50, 6 (2003), 2167–2175.
- [58] CHELBI, A., AND AIT-KADI, D. An optimal inspection strategy for randomly failing equipment. *Reliability Engineering & System Safety* 63, 2 (1999), 127–131.
- [59] CHEN, T., AND POPOVA, E. Maintenance policies with two-dimensional warranty. *Reliability Engineering & System Safety* 77, 1 (2002), 61–69.
- [60] CHENG, T., PANDEY, M. D., AND VAN DER WEIDE, J. A. The probability distribution of maintenance cost of a system affected by the gamma process of degradation : Finite time solution. *Reliability Engineering & System Safety* 108 (2012), 65–76.
- [61] CHIANG, J., AND YUAN, J. Optimal maintenance policy for a markovian system under periodic inspection. *Reliability Engineering & System Safety* 71, 2 (2001), 165–172.
- [62] CHO, D. I., AND PARLAR, M. A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research* 51, 1 (1991), 1–23.
- [63] CHRISTER, A., AND WANG, W. A model of condition monitoring of a production plant. *The International Journal Of Production Research* 30, 9 (1992), 2199–2211.
- [64] CHRISTER, A., AND WANG, W. A simple condition monitoring model for a direct monitoring process. *European Journal of Operational Research* 82, 2 (1995), 258–269.
- [65] CINLAR, E. Shock and wear models and markov additive process. In *the Theory and Applications of Reliability*. Academic Press, New York, 1977, pp. 193–214.
- [66] CLAVAREAU, J., AND LABEAU, P. Maintenance and replacement policies under technological obsolescence. *Reliability engineering & system safety* 94, 2 (2009), 370–381.
- [67] COCOZZA-THIVENT, C. *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*, vol. 28. Springer, 1997.
- [68] COCOZZA-THIVENT, C. *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*. Springer, 1997.
- [69] COCOZZA-THIVENT, C. A model for a dynamic preventive maintenance policy. *International Journal of Stochastic Analysis* 13, 4 (2000), 321–346.

- [70] COIT, D. W., AND JIN, T. Gamma distribution parameter estimation for field reliability data with missing failure times. *IIE Transactions* 32, 12 (2000), 1161–1166.
- [71] COOLEN, F., AND COOLEN-SCHRIJNER, P. Condition monitoring : a new perspective. *Journal of the Operational Research Society* 51, 3 (2000), 311–319.
- [72] COOLEN, F. P., AND DEKKER, R. Analysis of a 2-phase model for optimization of condition-monitoring intervals. *IEEE Transactions on Reliability* 44, 3 (1995), 505–511.
- [73] COYLE, D., BUXTON, M. J., AND O'BRIEN, B. J. Measures of importance for economic analysis based on decision modeling. *Journal of clinical epidemiology* 56, 10 (2003), 989–997.
- [74] CUI, L., XIE, M., AND LOH, H.-T. Inspection schemes for general systems. *IIE Transactions* 36, 9 (2004), 817–825.
- [75] DE SMIDT-DESTOMBES, K., C VAN DER HEIJDEN, M., AND VAN HARTEN, A. On the availability of a k-out-of-n system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy. *Reliability engineering & System safety* 83, 3 (2004), 287–300.
- [76] DEKKER, R., FRENK, H., AND WILDEMAN, R. How to determine maintenance frequencies for multi-component systems ? a general approach. In *Reliability and maintenance of complex systems*. Springer, 1996, pp. 239–280.
- [77] DEKKER, R., AND ROELVINK, I. F. Marginal cost criteria for preventive replacement of a group of components. *European Journal of Operational Research* 84, 2 (1995), 467–480.
- [78] DEKKER, R., WILDEMAN, R., FRENK, J., AND VAN EGMOND, R. A general approach for the coordination of maintenance frequencies in cases with a single set-up. In *Maintenance, Modeling and Optimization*, M. Ben-Daya, S. Duffuaa, and A. Raouf, Eds. Springer US, 2000, pp. 245–282.
- [79] DEKKER, R., WILDEMAN, R., AND VAN DER DUYN SCHOUTEN, F. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operations Research* 45, 3 (1997), 411–435.
- [80] DEKKER, R., WILDEMAN, R. E., AND VAN DER DUYN SCHOUTEN, F. A. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operations Research* 45, 3 (1997), 411–435.
- [81] DEKKERT, R., SMIT, A., AND LOSEKOOT, J. Combining maintenance activities in an operational planning phase : a set-partitioning approach. *IMA Journal of Management Mathematics* 3, 4 (1991), 315–331.

- 
- [82] DELERUYELLE, D., MOLAS, G., DESALVO, B., GELY, M., AND LAFOND, D. Single-electron phenomena in ultra-scaled floating-gate devices and their impact on electrical characteristics. *Solid-state electronics* 49, 11 (2005), 1728–1733.
- [83] DELOUX, E. *Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant*. PhD thesis, Université de Nantes, France, 2008.
- [84] DELOUX, E., CASTANIER, B., AND BÉRENGUER, C. Maintenance policy for a deteriorating system evolving in a stressful environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 222, 4 (2008), 613–622.
- [85] DELOUX, E., CASTANIER, B., AND BÉRENGUER, C. Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 2 (2009), 418–431.
- [86] DELOUX, E., AND DIEULLE, L. Condition-based maintenance policies for multi-component systems with stochastic, structural and economic dependencies. *IMA International Conference on Modelling in Industrial Maintenance and Reliability, Oxford, UK* (2014).
- [87] DIEULLE, L., BERENGUER, C., GRALL, A., AND ROUSSIGNOL, M. Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system. *European Journal of Operational Research* 150, 2 (2003), 451–461.
- [88] DING, S.-H., AND KAMARUDDIN, S. Maintenance policy optimization—literature review and directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 76, 5-8 (2014), 1263–1283.
- [89] DJURDJANOVIC, D., LEE, J., AND NI, J. Watchdog agent—an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics* 17, 3 (2003), 109–125.
- [90] DO, P. *Contribution au développement et à l'étude de facteurs d'importance fiabilistes pour les systèmes markoviens*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2008.
- [91] DO, P., BARROS, A., BÉRENGUER, C. BOUVARD, K., AND BRISSAUD, F. Dynamic grouping maintenance with time limited opportunities. *Reliability Engineering & System Safety* 120 (2013), 51–59.
- [92] DO, P., VOISIN, A., LEVRAT, E., AND IUNG, B. A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliability Engineering & System Safety* 133 (2015), 22–32.

- [93] DO, P., VU, C., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen. In *8th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes* (2012), vol. 8, pp. 486–491.
- [94] DO VAN, P., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. From differential to difference importance measures for markov reliability models. *European Journal of Operational Research* 204, 3 (2010), 513–521.
- [95] DO VAN, P., BARROS, A., BÉRENGUER, C., BOUVARD, K., AND BRISSAUD, F. Dynamic grouping maintenance strategy with time limited opportunities. *Reliability Engineering and System Safety* 120 (2013), 51–59.
- [96] DO VAN, P., AND BÉRENGUER, C. Condition-based maintenance with imperfect preventive repairs for a deteriorating production system. *Reliability and Quality Engineering International* 28, 6 (2012), 624–633.
- [97] DO VAN, P., LEVRAT, E., VOISIN, A., AND IUNG, B. Remaining useful life (rul) based maintenance decision making for deteriorating systems. In *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology, A-Mest'12* (2012).
- [98] DO VAN, P., VOISIN, A., LEVRAT, E., AND IUNG, B. Remaining useful life based maintenance decision making for deteriorating systems with both perfect and imperfect maintenance actions. In *Prognostics and Health Management (PHM), 2013 IEEE Conference on* (2013), IEEE, pp. 1–9.
- [99] DO VAN, P., VU, H., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Grouping maintenance strategy with availability constraint under limited repairmen. In *8th IFAC International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, SAFEPROCESS-2012, August 2012, Mexico city, Mexico* (2012), pp. 486–491.
- [100] DOOSTPARAST, M., KOLAHAN, F., AND DOOSTPARAST, M. A reliability-based approach to optimize preventive maintenance scheduling for coherent systems. *Reliability Engineering & System Safety* 126 (2014), 98–106.
- [101] DRAGOMIR, E., GOURIVEAU, R., DRAGOMIR, F., MINCA, E., AND ZERHOUNI, N. Review of prognostic problem in condition-based maintenance. In *Proc. of European Control Conference* (2009).
- [102] DUFFUAA, S., AND BEN-DAYA, M. An extended model for the joint overhaul scheduling problem. *International Journal of Operations & Production Management* 14, 7 (1994), 37–43.
- [103] FAN, H., HU, C., CHEN, M., AND ZHOU, D. Predictive condition-based replacement and spare ordering policy for dynamic systems suffering hidden degradation. In *proceeding of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, Barcelona, Spain* (2009), pp. 1623–1628.

- 
- [104] FARD, N., AND ZHENG, X. An approximate method for non-repairable systems based on opportunistic replacement policy. *Reliability Engineering & System Safety* 33, 2 (1991), 277–288.
- [105] FOOTE, B. On the implementation of a control-based forecasting system for aircraft spare parts procurement. *IIE transactions* 27, 2 (1995), 210–216.
- [106] FOULADIRAD, M., AND GRALL, A. Condition-based maintenance for a system subject to a non-homogeneous wear process with a wear rate transition. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 6 (2011), 611–618.
- [107] FOULADIRAD, M., GRALL, A., AND DIEULLE, L. On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 12 (2008), 1814–1820.
- [108] FUSSELL, J. How to hand-calculate system reliability and safety characteristics. *IEEE Transactions on Reliability R-24*, 3 (1975), 169–174.
- [109] GERAERDS, W. The cost of downtime for maintenance : preliminary considerations. *Maintenance management international* 5, 1 (1985), 13–21.
- [110] GERTSBAKH, I. Optimal group preventive maintenance of a system with observable state parameter. *Advances in Applied Probability* (1984), 923–925.
- [111] GERTSBAKH, I. *Reliability theory : with applications to preventive maintenance*. Springer, 2000.
- [112] GERTSBAKH, I. B. *Models of preventive maintenance*. Amsterdam : North-Holland, 1977.
- [113] GHASEMI, A., YACOUT, S., AND OUALI, M. Evaluating the reliability function and the mean residual life for equipment with unobservable states. *IEEE Transactions on Reliability* 59, 1 (2010), 45–54.
- [114] GHOBBAR, A. A., AND FRIEND, C. H. Evaluation of forecasting methods for intermittent parts demand in the field of aviation : a predictive model. *Computers & Operations Research* 30, 14 (2003), 2097–2114.
- [115] GOFFAUX, G., VANDE WOUWER, A., AND BERNARD, O. Continuous-discrete interval observers for monitoring microalgae cultures. *Biotechnology progress* 25, 3 (2009), 667–675.
- [116] GOFFAUX, G., WOUWER, A. V., AND BERNARD, O. Improving continuous–discrete interval observers with application to microalgae-based bioprocesses. *Journal of Process Control* 19, 7 (2009), 1182–1190.
- [117] GOLDMAN, S. *Vibration spectrum analysis : a practical approach*. Industrial Press, New York, 1999.

- [118] GOLMAKANI, H. R., AND MOAKEDI, H. Optimal non-periodic inspection scheme for a multi-component repairable system using a\* search algorithm. *Computers & Industrial Engineering* 63, 4 (2012), 1038–1047.
- [119] GOLMAKANI, H. R., AND MOAKEDI, H. Optimal nonperiodic inspection scheme for a multicomponent repairable system with failure interaction using a\* search algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67 (2013), 1325–1336.
- [120] GOPALAN, M., AND SIMHAN, S. Analysis of monitoring policies. *Microelectronics Reliability* 32, 12 (1992), 1681–1686.
- [121] GOYAL, S., AND GUNASEKARAN, A. Determining economic maintenance frequency of a transport fleet. *International Journal of Systems Science* 23, 4 (1992), 655–659.
- [122] GOYAL, S., AND KUSY, M. Determining economic maintenance frequency for a family of machines. *Journal of the Operational Research Society* (1985), 1125–1128.
- [123] GRALL, A. *Modélisation stochastique pour la maintenance conditionnelle : impact du mode de surveillance*. Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, France, 2003.
- [124] GRALL, A., BÉRENGUER, C., AND CHU, C. Optimal dynamic inspection/replacement planning in condition-based maintenance for deteriorating systems. In *Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, Balkema, Trondheim (1998)* (1998), pp. 381–388.
- [125] GRALL, A., BÉRENGUER, C., AND DIEULLE, L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering & System Safety* 76, 2 (2002), 167–180.
- [126] GRALL, A., DIEULLE, L., BÉRENGUER, C., AND ROUSSIGNOL, M. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system. *Reliability, IEEE Transactions on* 51, 2 (2002), 141–150.
- [127] GRALL, A., DIEULLE, L., BERENGER, C., AND ROUSSIGNOL, M. Continuous-time predictive-maintenance scheduling for adeteriorating system. *IEEE Transactions on Reliability* 51, 2 (2002), 141–150.
- [128] GÜRLER, Ü., AND KAYA, A. A maintenance policy for a system with multi-state components : an approximate solution. *Reliability Engineering & System Safety* 76, 2 (2002), 117–127.
- [129] GUSTAVSSON, E., PATRIKSSON, M., STRÖMBERG, A., WOJCIECHOWSKI, A., AND ÖNNHEIM, M. Preventive maintenance scheduling of multi-component systems with interval costs. *Computers & Industrial Engineering* (2014).

- 
- [130] HAJIAN-HOSEINABADI, H. Reliability and component importance analysis of substation automation systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 49 (2013), 455–463.
- [131] HAMEED, Z., AND VATN, J. Role of grouping in the development of an overall maintenance optimization framework for offshore wind turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 226, 6 (2012), 584–601.
- [132] HARIGA, M. Coordinated overhaul scheduling of production units. *Naval Research Logistics (NRL)* 41, 4 (1994), 565–577.
- [133] HARIGA, M. A deterministic maintenance-scheduling problem for a group of non-identical machines. *International Journal of Operations & Production Management* 14, 7 (1994), 27–36.
- [134] HAURIE, A., AND L’ECUYER, P. A stochastic control approach to group preventive replacements in multi-component systems. *IEEE Transactions on Automatic Control* 27 (1982), 387–93.
- [135] HIGGINS, A. Scheduling of railway track maintenance activities and crews. *Journal of the Operational Research Society* 49, 10 (1998), 1026–1033.
- [136] HOLMBERG, K., ADGAR, A., ARNAIZ, A., JANTUNEN, E., MASCOLO, J., AND MEKID, S. *E-maintenance*. Springer London, 2010.
- [137] HONG, H., ZHOU, W., ZHANG, S., AND YE, W. Optimal condition-based maintenance decisions for systems with dependent stochastic degradation of components. *Reliability Engineering & System Safety* 121 (2014), 276–288.
- [138] HONG, H. P. Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects. *Structural Safety* 21, 3 (1999), 203–222.
- [139] HONTELEZ, J. A., BURGER, H. H., AND WIJNMALEN, D. J. Optimum condition-based maintenance policies for deteriorating systems with partial information. *Reliability Engineering & System Safety* 51, 3 (1996), 267–274.
- [140] HOPP, W., AND KUO, Y. An optimal structured policy for maintenance of partially observable aircraft engine components. *Naval Research Logistics* 45, 4 (1998), 335–352.
- [141] HOSSEINI, M., KERR, R., AND RANDALL, R. An inspection model with minimal and major maintenance for a system with deterioration and poisson failures. *IEEE Transactions on Reliability* 49, 1 (2000), 88–98.
- [142] HU, J., AND ZHANG, L. Risk based opportunistic maintenance model for complex mechanical systems. *Expert Systems with Applications* 41, 6 (2014), 3105–3115.

- [143] HU, J., ZHANG, L., AND LIANG, W. Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on dbn-hazop model. *Process Safety and Environmental Protection* 90, 5 (2012), 376–388.
- [144] HUYNH, K. T. *Quantification de l'apport de l'information de surveillance dans la prise de décision en maintenance*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2011.
- [145] HUYNH, K. T., BARROS, A., AND BERENGUER, C. Multi-level decision-making for the predictive maintenance of  $k$ -out-of- $n$  : F deteriorating systems. *IEEE Transactions on Reliability* 64, 1 (2015), 94–117.
- [146] HUYNH, K. T., MAI, S. T., GRALL, A., AND BÉRENGUER, C. Towards a reliable condition index for condition-based maintenance decision-making. In *In Proc. 2nd Int. Conf. Control and Fault-Tolerant Systems, SysTol'13* (2013), IEEE, pp. 826–831.
- [147] HUYNH, K. T., TORRES CASTRO, I., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. On the use of mean residual life as a condition index for condition-based maintenance decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics : Systems'14* (2014), 877–893.
- [148] HUYNH, T. K., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. A reliability-based opportunistic predictive maintenance model for  $k$ -out-of- $n$  deteriorating systems. *Chemical Engineering Transactions* 33 (2013), 493–498.
- [149] HWANG, I., KIM, S., KIM, Y., AND SEAH, C. E. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18, 3 (2010), 636–653.
- [150] IUNG, B., MOREL, G., AND LEGER, J. Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement. *Robotica* 21, 03 (2003), 313–324.
- [151] JARDINE, A., LIN, D., AND BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing* 20, 7 (2006), 1483–1510.
- [152] JARDINE, A. K., AND TSANG, A. H. *Maintenance, replacement, and reliability : theory and applications*. CRC press, 2013.
- [153] J.D., A., AND S., B. Birnbaum's measure of component importance for noncoherent systems. *IEEE Transactions on Reliability* 52, 2 (2003), 213–219.
- [154] KALLEN, M., AND VAN NOORTWIJK, J. Optimal periodic inspection of a deterioration process with sequential condition states. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 83, 4 (2006), 249–255.

- 
- [155] KHOURY, E. *Modélisation de la durée de vie résiduelle et maintenance prédictive : application à des véhicules industriels*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2012.
- [156] KHOURY, E., GRALL, A., AND BÉRENGUER, C. A comparison of rul-based and deterioration-based maintenance policies for gradually deteriorating systems. In *Proc Reliability, Risk and Safety - Ale, Papazoglou & Zio (eds), Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (2010)*, pp. 530–537.
- [157] KIJIMA, M. Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied probability* (1989), 89–102.
- [158] KLEIN, M. Inspection-maintenance-replacement schedules under markovian deterioration. *Management Science* 9, 1 (1962), 25–32.
- [159] KOTHAMASU, R., HUANG, S., AND VERDUIN, W. System health monitoring and prognostics - a review of current paradigms and practices. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28, 9 (2006), 1012–1024.
- [160] KULSHRESTHA, D. Operational behaviour of a multicomponent system having stand-by redundancy with opportunistic repairs. *Unternehmensforschung* 12, 1 (1968), 159–172.
- [161] KUO, W., PRASAD, V. R., TILLMAN, F. A., AND HWANG, C.-L. *Optimal reliability design : fundamentals and applications, 2nd edn*. Cambridge university press, Cambridge, 2006.
- [162] KUO, W., AND ZHU, X. *Importance measures in reliability, risk, and optimization : principles and applications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [163] KUO, W., AND ZHU, X. Some recent advances on importance measures in reliability. *IEEE Transactions on Reliability* 61, 2 (2012), 344–360.
- [164] LAGGOUNE, R., CHATEAUNEUF, A., AND AISSANI, D. Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering* 33, 9 (2009), 1499–1510.
- [165] LAGGOUNE, R., CHATEAUNEUF, A., AND AISSANI, D. Preventive maintenance scheduling for a multi-component system with non-negligible replacement time. *International Journal of Systems Science* 41, 7 (2010), 747–761.
- [166] LAM, C., AND YEH, R. Optimal maintenance-policies for deteriorating systems under various maintenance strategies. *IEEE Transactions on Reliability* 43, 3 (1994), 423–430.
- [167] LATINO, C. J. Hidden treasure : eliminating chronic failures can cut maintenance costs up to 60%. *Tech. Report, Reliability Center, Hopewell, Virginia* (1999).
- [168] LE SON, K., FOULADIRAD, M., BARROS, A., LEVRAT, E., AND IUNG, B. Remaining useful life estimation based on stochastic deterioration models : A comparative study. *Reliability Engineering & System Safety* 112 (2013), 165–175.

- [169] LEGER, J.-B. *Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production : proposition d'un cadre formel de modélisation*. PhD thesis, Université Henri Poincaré de Nancy, 1999.
- [170] LEVITIN, G., AND LISNIANSKI, A. Importance and sensitivity analysis of multi-state systems using the universal generating function method. *Reliability Engineering & System Safety* 65, 3 (1999), 271–282.
- [171] LI, H., DIEULLE, L., AND DELOUX, E. Condition-based maintenance policies for multi-component systems with lévy copulas dependence. In *Safety and Reliability : Methodology and Applications*. Taylor & Francis Group, London, 2014, pp. 1281–1288.
- [172] LI, L., AMBANI, S., AND NI, J. Plant-level maintenance decision support system for throughput improvement. *International Journal of Production Research* 47, 24 (2009), 7047–7061.
- [173] LI, W., AND PHAM, H. An inspection-maintenance model for systems with multiple competing processes. *IEEE Transactions on Reliability* 54, 2 (2005), 318–327.
- [174] LIAO, H., ELSAYED, E., AND CHAN, L. Maintenance of continuously monitored degrading systems. *European Journal of Operational Research* 175, 2 (2006), 821–835.
- [175] LIMNIOS, N. *Fault trees*, vol. 675. John Wiley & Sons, 2010.
- [176] LIN, D., BANJEVIC, D., AND JARDINE, A. Using principal components in a proportional hazards model with applications in condition-based maintenance. *Journal of the Operational Research Society* 57, 8 (2005), 910–919.
- [177] LORTON, A., FOULADIRAD, M., AND GRALL, A. Computation of remaining useful life on a physic-based model and impact of a prognosis on the maintenance process. *Proc. Instn Mech. Engrs, Part O : J. Risk and Reliability* 227, 4 (2013), 434–449.
- [178] LOVE, C., AND GUO, R. Utilizing weibull failure rates in repair limit analysis for equipment replacement/preventive maintenance decisions. *Journal of the Operational Research Society* (1996), 1366–1376.
- [179] LU, H., KOLARIK, W. J., AND LU, S. S. Real-time performance reliability prediction. *IEEE Transactions on Reliability* 50, 4 (2001), 353–357.
- [180] MARQUEZ, A. C., HEGUEDAS, A. S., AND IUNG, B. Monte carlo-based assessment of system availability. a case study for cogeneration plants. *Reliability Engineering & System Safety* 88, 3 (2005), 273–289.
- [181] MARSEGUERRA, M., AND ZIO, E. Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 68, 1 (2000), 69–83.

- 
- [182] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., AND PODOFILLINI, L. Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 77, 2 (2002), 151–165.
- [183] MARSEGUERRA, M., ZIO, E., AND PODOFILLINI, L. Multiobjective spare part allocation by means of genetic algorithms and monte carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 87, 3 (2005), 325–335.
- [184] MOINZADEH, K., AND SCHMIDT, C. P. An (s-1, s) inventory system with emergency orders. *Operations Research* 39, 2 (1991), 308–321.
- [185] MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press. New York, 1997.
- [186] MULLER, A. *Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic*. PhD thesis, Nancy 1, 2005.
- [187] NAKAGAWA, T., AND MIZUTANI, S. A summary of maintenance policies for a finite interval. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 1 (2009), 89–96.
- [188] NAVARRO, J., AND RYCHLIK, T. Comparisons and bounds for expected lifetimes of reliability systems. *European Journal of Operational Research* 207, 1 (2010), 309–317.
- [189] NEWBY, M., AND DAGG, R. Optimal inspection and perfect repair. *IMA Journal of Management Mathematics* 15, 2 (2004), 175.
- [190] NF-EN-13306-X-60-319. Terminologie de la maintenance. *Norme AFNOR* (2001).
- [191] NGUYEN, K.-A., DO, P., AND GRALL, A. Condition-based maintenance for multi-component systems using importance measure and predictive information. *International Journal of Systems Science : Operations & Logistics* 1, 4 (2014), 228–245.
- [192] NGUYEN, K.-A., DO, P., AND GRALL, A. A joint predictive maintenance and spare parts provisioning policy for multi-component systems using rul prediction and importance measure. In *Proceedings of the European Conference of the PHM Society, PHME 2014* (Nantes, France, July 8-10 2014), A. Bregon and M. J. Daigle, Eds., PHM Society, pp. 500–511.
- [193] NGUYEN, K.-A., DO, P., AND GRALL, A. Importance measure-based joint strategy of predictive maintenance and inventory for heterogeneous multi-component systems. *IEEE Transaction on Reliability* (2015).
- [194] NGUYEN, K.-A., DO, P., AND GRALL, A. Multi-level predictive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety* 144 (2015), 83–94.
- [195] NGUYEN, K.-A., DO VAN, P., AND GRALL, A. Predictive grouping maintenance strategy for complex structure systems using importance measure. In *Proceedings of the International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering* (2013), IEEE, pp. 582–588.

- [196] NGUYEN, K.-A., DO VAN, P., AND GRALL, A. A predictive maintenance strategy for multi-component systems using importance measure. In *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference (2013)*, Taylor & Francis Group, London, pp. 967–975.
- [197] NGUYEN, T., CASTANIER, B., AND YEUNG, T. Maintaining a system subject to uncertain technological evolution. *Reliability Engineering & System Safety* (2014).
- [198] NICOLAI, R., AND DEKKER, R. Optimal maintenance of multi-component systems : a review. *Complex system maintenance handbook* (2008), 263–286.
- [199] NOWAKOWSKI, T., AND WERBIŃKA, S. On problems of multicomponent system maintenance modelling. *International Journal of Automation and Computing* 6, 4 (2009), 364–378.
- [200] OHASHI, M. Group replacement policy for a maintained coherent system. *J. OPER. RES. SOC. JAPAN*. 25, 3 (1982), 228–237.
- [201] OHASHI, M. Replacement policy for components in a markovian deteriorating system with minimal repair. *J. OPER. RES. SOC. JAPAN*. 29, 4 (1986), 249–264.
- [202] OHNISHI, M., KAWAI, H., AND MINE, H. An optimal inspection and replacement policy for a deteriorating system. *Journal of applied probability* 23 (1986), 973–988.
- [203] OHNISHI, M., MORIOKA, T., AND IBARAKI, T. Optimal minimal-repair and replacement problem of discrete-time markovian deterioration system under incomplete state information. *Computers & Industrial Engineering* 27, 1-4 (1994), 409–412.
- [204] OKUMOTO, K., AND ELSAYED, E. An optimum group maintenance policy. *Naval Research Logistics Quarterly* 30, 4 (1983), 667–674.
- [205] OUALI, M., TADJ, L., YACOUT, S., AND AIT-KADI, D. A survey of replacement models with minimal repair. In *Replacement Models with Minimal Repair, Springer Series in Reliability Engineering*. Springer London, 2011, pp. 3–100.
- [206] PAPAKONSTANTINOY, K., AND SHINOZUKA, M. Optimum inspection and maintenance policies for corroded structures using partially observable markov decision processes and stochastic, physically based models. *Probabilistic Engineering Mechanics* 37 (2014), 93–108.
- [207] PARK, K. S. Optimal continuous-wear limit replacement under periodic inspections. *IEEE Transactions on Reliability* 37, 1 (1988), 97–102.
- [208] PASCUAL, R., MERUANE, V., AND REY, P. On the effect of downtime costs and budget constraint on preventive and replacement policies. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 1 (2008), 144–151.

- 
- [209] PEDREGAL, D., AND CARMEN CARNERO, M. Vibration analysis diagnostics by continuous-time models : A case study. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 2 (2009), 244–253.
- [210] PEHRSSON, A., AND AL-NAJJAR, B. *Creation of Industrial Competitiveness*. Växjö University Press, 2005.
- [211] PENG, Y., DONG, M., AND ZUO, M. Current status of machine prognostics in condition-based maintenance : a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50, 1–4 (2010), 1–17.
- [212] PHAM, H., AND WANG, H. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 94, 3 (1996), 425–438.
- [213] PONCHET, A. *Modèles stochastiques pour l'évaluation de politiques de maintenance sur des systèmes à dégradation graduelle*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, 2010.
- [214] PONCHET, A., FOULADIRAD, M., AND GRALL, A. Assessment of a maintenance model for a multi-deteriorating mode system. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 11 (2010), 1244–1254.
- [215] PONCHET, A., FOULADIRAD, M., AND GRALL, A. Maintenance policy on a finite time span for a gradually deteriorating system with imperfect improvements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 225, 2 (2011), 105–116.
- [216] POPOVA, E., AND WILSON, J. Group replacement policies for parallel systems whose components have phase distributed failure times. *Annals of operations research* 91 (1999), 163–198.
- [217] PRAJAPATI, A., BECHTEL, J., AND GANESAN, S. Condition based maintenance : a survey. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 18, 4 (2012), 384–400.
- [218] QUATTROCCHI, F., CANTUCCI, B., CINTI, D., GALLI, G., PIZZINO, L., SCIARRA, A., AND VOLTATTORNI, N. Continuous/discrete geochemical monitoring of co2 natural analogues and of diffuse degassing structures (dds) : Hints for co2 storage sites geochemical monitoring protocol. *Energy Procedia* 1, 1 (2009), 2135–2142.
- [219] RAUSAND, M., AND HØYLAND, A. *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, vol. 396. Wiley-Interscience, 2003.
- [220] RAUSAND, M., AND HØYLAND, A. *System Reliability Theory : Models, Statistical Methods and Applications*, second ed. John Wiley & Sons, 2004.
- [221] REDMOND, D., CHRISTER, A., RIGDEN, S., BURLEY, E., TAJELLI, A., AND ABU-TAIR, A. O.r. modelling of the deterioration and maintenance of concrete structures. *European Journal of Operational Research* 99, 3 (1997), 619–631.

- [222] RITCHKEN, P., AND WILSON, J. (m, t) group maintenance policies. *Management science* 36, 5 (1990), 632–639.
- [223] ROBERTSON, R., AND JONES, A. Pay day. *Plant Engineering & Maintenance* 28, 9 (2004), 18–25.
- [224] ROSS, S. *Stochastic Processes*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [225] RUBINSTEIN, R., AND KROESE, D. *Simulation and the Monte Carlo method*, vol. 707. John Wiley & Sons, 2011.
- [226] SAASSOUH, B., DIEULLE, L., AND GRALL, A. A suitable inspection policy definition for system with two modes of degradation. In *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes 2006* (2006), pp. 789–794.
- [227] SAASSOUH, B., DIEULLE, L., AND GRALL, A. Online maintenance policy for a deteriorating system with random change of mode. *Reliability Engineering & System Safety* 92, 12 (2007), 1677–1685.
- [228] SARKER, R., AND HAQUE, A. Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation. *Applied Mathematical Modelling* 24, 10 (2000), 751–760.
- [229] SCULLI, D., AND WU, S. Block replacement for units whose components have weibull life distributions. *Computers & Operations Research* 8, 4 (1981), 295–302.
- [230] SELVIK, J., AND AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 2 (2011), 324–331.
- [231] SETHI, D. P. Opportunistic replacement policies. *The Theory and Applications of Reliability I* (1977), 433–447.
- [232] SHAFIEE, M., AND CHUKOVA, S. Maintenance models in warranty : A literature review. *European Journal of Operational Research* 229, 3 (2013), 561–572.
- [233] SHERBROOKE, C. C. *Optimal inventory modeling of systems : multi-echelon techniques*, vol. 72. Springer Science & Business Media, 2004.
- [234] SHEU, S. A generalized block replacement policy with minimal repair and general random repair costs for a multi-unit system. *Journal of the Operational Research Society* (1991), 331–341.
- [235] SHEU, S., AND JHANG, J. A generalized group maintenance policy. *European Journal of Operational Research* 96, 2 (1997), 232–247.
- [236] SI, X., WANG, W., HU, C., AND ZHOU, D. Remaining useful life estimation - a review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research* 213, 1 (2011), 1–14.

- 
- [237] SIKORSKAA, J., HODKIEWICZ, M., AND MA, L. Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, 5 (2011), 1803–1836.
- [238] SINGPURWALLA, N. Survival in dynamic environments. *Statistical Science* 10, 1 (1995), 86–103.
- [239] SINGPURWALLA, N. D., WILSON, S. P., ET AL. Failure models indexed by two scales. *Advances in Applied Probability* 30, 4 (1998), 1058–1072.
- [240] SMITH, C., AND BORGONOVO, E. Decision making during nuclear power plant incidents - a new approach to the evaluation of precursor events. *Risk analysis* 27, 4 (2007), 1027–1042.
- [241] SORO, I., NOURELFATH, M., AND AIT-KADI, D. Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 2 (2010), 65–69.
- [242] SPEIJKER, L. J., VAN NOORTWIJK, J. M., KOK, M., AND COOKE, R. M. Optimal maintenance decisions for dikes. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 14, 01 (2000), 101–121.
- [243] SRISKANDARAJAH, C., JARDINE, A., AND CHAN, C. Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm. *Journal of the Operational Research Society* (1998), 1130–1145.
- [244] SULE, D., AND HARMON, B. Determination of coordinated maintenance scheduling frequencies for a group of machines. *AIIE Transactions* 11, 1 (1979), 48–53.
- [245] SUNSTEIN, C. Cost benefit default principles. *Michigan Law Review* 99, 7 (2001), 1651–1723.
- [246] TAGHIPOUR, S., BANJEVIC, D., AND JARDINE, A. Periodic inspection optimization model for a complex repairable system. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 9 (2010), 944–952.
- [247] TERESA LAM, C., AND YEH, R. H. Optimal replacement policies for multistate deteriorating systems. *Naval Research Logistics (NRL)* 41, 3 (1994), 303–315.
- [248] THOMAS, E. *Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité*. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy I, France, 2009.
- [249] THOMAS, L. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems. *Reliability Engineering* 16, 4 (1986), 297–309.
- [250] TIAN, Z., JIN, T., WU, B., AND DING, F. Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring. *Renewable Energy* 36, 5 (2011), 1502–1509.

- [251] TIAN, Z., AND LIAO, H. Condition based maintenance optimization for multi-component systems using proportional hazards model. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 5 (2011), 581–589.
- [252] TIAN, Z., ZHANG, Y., AND CHENG, J. Condition based maintenance optimization for multi-component systems. In *In Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society* (2011).
- [253] TIAN, Z., ZHANG, Y., AND CHENG, J. Condition based maintenance optimization for multi-component systems. In *Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society* (2011).
- [254] TIJMS, H. *Stochastic models : an algorithmic approach*. John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [255] TIJMS, H. C. *A first course in stochastic models*. John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [256] TIJMS, H. C., AND VAN DER DUYN SCHOUTEN, F. A. A markov decision algorithm for optimal inspections and revisions in a maintenance system with partial information. *European Journal of Operational Research* 21, 2 (1985), 245–253.
- [257] TSAI, Y., WANG, K., AND TSAI, L. A study of availability-centered preventive maintenance for multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety* 84, 3 (2004), 261–270.
- [258] TU, F., AZAM, M. S., SHLAPAK, Y., PATTIPATI, K., KARANAM, R., AND AMIN, S. Integrated reliability analysis, diagnostics and prognostics for critical power systems. In *Proceedings of the AUTOTESTCON, Systems Readiness Technology Conference* (2001), IEEE, pp. 416–440.
- [259] VAIDYA, P., AND RAUSAND, M. Remaining useful life, technical health, and life extension. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 225, 2 (2011), 219–231.
- [260] VALLURI, S. R. Some recent developments at galcit concerning a theory of metal fatigue. *Acta metallurgica* 11, 7 (1963), 759–775.
- [261] VAN DER WEIDE, J., PANDEY, M., AND VAN NOORTWIJK, J. Discounted cost model for condition-based maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 3 (2010), 236–246.
- [262] VAN DIJKHUIZEN, G. Maintenance grouping in multi-step multi-component production systems. In *Maintenance, Modeling and Optimization*. Springer, 2000, pp. 283–306.
- [263] VAN HORENBEEK, A., AND PINTELON, L. A dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component systems. *Reliability Engineering & System Safety* 120 (2013), 39–50.

- 
- [264] VAN HORENBEEK, A. AND BURÉ, J., CATTRYSSÉ, D., PINTELON, L., AND VANS-TEENWEGEN, P. Joint maintenance and inventory optimization systems : A review. *International Journal of Production Economics* 143, 2 (2013), 499–508.
- [265] VAN NOORTWIJK, J., AND KLATTER, H. Optimal inspection decisions for the block mats of the eastern-scheldt barrier. *Reliability Engineering & System Safety* 65, 3 (1999), 203–211.
- [266] VAN NOORTWIJK, J., KOK, M., AND COOKE, R. *Optimal maintenance decisions for the sea-bed protection of the Eastern-Scheldt barrier*. Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [267] VAN NOORTWIJK, J., AND PEERBOLTE, E. Optimal sand nourishment decisions. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 126, 1 (2000), 30–38.
- [268] VAN NOORTWIJK, J., AND VAN DER WEIDE, J. Applications to continuous-time processes of computational techniques for discrete-time renewal processes. *Reliability Engineering & System Safety* 93, 12 (2008), 1853–1860.
- [269] VAN NOORTWIJK, J. M. A survey of the application of gamma processes in maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 94, 1 (2009), 2–21.
- [270] VAN NOORTWIJK, J. M., COOKE, R. M., AND KOK, M. A bayesian failure model based on isotropic deterioration. *European Journal of Operational Research* 82, 2 (1995), 270–282.
- [271] VAN NOORTWIJK, J. M., AND VAN GELDER, P. H. Optimal maintenance decisions for berm breakwaters. *Structural Safety* 18, 4 (1996), 293–309.
- [272] VEGUNTA, S., AND MILANOVIC, J. Estimation of cost of downtime of industrial process due to voltage sags. *IEEE Transactions on Power Delivery* 26, 2 (2011), 576–587.
- [273] VERGIN, R. C., AND SCRIBAN, M. Maintenance scheduling for multi-component equipment. *AIIE Transactions* 9, 3 (1977), 297–305.
- [274] VESELY, W. A time-dependent methodology for fault tree evaluation. *Nuclear engineering and design* 13, 2 (1970), 337–360.
- [275] VU, C., DO, P., AND BARROS, A.  $(mrl, \tau)$  grouping policy for complex structure systems. In *Proceedings of the European Safety and Reliability Conference* (2013), Taylor & Francis Group, London, pp. pp–949.
- [276] VU, C., DO, P., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Dynamic grouping maintenance for complex structure systems with non-negligible replacement time. In *Advanced Maintenance Engineering* (2012), vol. 2, pp. 79–84.
- [277] VU, C., DO, P., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Maintenance grouping strategy for multi-component systems with dynamic contexts. *Reliability Engineering & System Safety* 132 (2014), 233–249.

- [278] VU, C., DO, P., BARROS, A., AND BÉRENGUER, C. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. *IMA Journal of Management Mathematics* (2014).
- [279] VU, H. C. *Stratégies de regroupement pour la maintenance des systèmes à composants multiples avec structure complexe*. PhD thesis, Université de Technologie de Troyes, France, 2015.
- [280] WAGNER, H. *Principles of Operations Research, Second Edition*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J, 1975.
- [281] WALSH, B., BALDWIN, G., AND FARRELL, R. Physical component performance degradation detection based on error probability analysis. In *IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (2007). doi :10.1109/PIMRC.2007.4394524.
- [282] WANG, H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European journal of operational research* 139, 3 (2002), 469–489.
- [283] WANG, H., AND PHAM, H. Availability and maintenance of series systems subject to imperfect repair and correlated failure and repair. *European Journal of Operational Research* 174, 3 (2006), 1706–1722.
- [284] WANG, H., AND PHAM, H. *Reliability and optimal maintenance*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [285] WANG, L., CHU, J., AND MAO, W. A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied mathematical modelling* 32, 11 (2008), 2274–2289.
- [286] WANG, L., CHU, J., AND MAO, W. A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure. *European Journal of Operational Research* 194, 1 (2009), 184–205.
- [287] WANG, W. A model to determine the optimal critical level and the monitoring intervals in condition-based maintenance. *International Journal of Production Research* 38, 6 (2000), 1425–1436.
- [288] WANG, W. Modelling condition monitoring intervals : A hybrid of simulation and analytical approaches. *Journal of the Operational Research Society* 54, 3 (2003), 273–282.
- [289] WANG, W. Condition-based maintenance modelling. In *Complex System Maintenance Handbook*, Springer Series in Reliability Engineering. Springer London, 2008, pp. 111–131.
- [290] WANG, W. A joint spare part and maintenance inspection optimisation model using the delay-time concept. *Reliability Engineering & System Safety* 96, 11 (2011), 1535–1541.

- 
- [291] WANG, W. Overview of a semi-stochastic filtering approach for residual life estimation with applications in condition based maintenance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O : Journal of Risk and Reliability* 225, 2 (2011), 185–197.
- [292] WANG, W., AND CHRISTER, A. Towards a general condition based maintenance model for a stochastic dynamic system. *Journal of the Operational Research Society* 51, 2 (2000), 145–155.
- [293] WANG, W., CHRISTER, A., AND JIA, X. Determining the optimal condition monitoring and pm intervals on the basis of vibration analysis—a case study. In *Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability, Balkema, Trondheim (1998)* (1998), pp. 241–246.
- [294] WANG, W., AND ZHANG, W. A model to predict the residual life of aircraft engines based upon oil analysis data. *Naval Research Logistics (NRL)* 52, 3 (2005), 276–284.
- [295] WHITMORE, G. Estimating degradation by a wiener diffusion process subject to measurement error. *Lifetime data analysis 1*, 3 (1995), 307–319.
- [296] WIJNMALEN, D., AND HONTELEZ, J. Review of a markov decision algorithm for optimal inspections and revisions in a maintenance system with partial information. *European Journal of Operational Research* 62, 1 (1992), 96–104.
- [297] WILDEMAN, R. *The art of grouping maintenance*. PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, Netherlands, 1996.
- [298] WILDEMAN, R., AND DEKKER, R. Dynamic influences in multi-component maintenance. *Quality and reliability engineering international* (1997), 199–207.
- [299] WILDEMAN, R., DEKKER, R., AND SMIT, A. A dynamic policy for grouping maintenance activities. *European Journal of Operational Research* 99, 3 (1997), 530–551.
- [300] WORM, J., AND VAN HARTEN, A. Model based decision support for planning of road maintenance. *Reliability Engineering & System Safety* 51, 3 (1996), 305–316.
- [301] WU, X., AND RYAN, S. M. Optimal replacement in the proportional hazards model with semi-markovian covariate process and continuous monitoring. *IEEE Transactions on Reliability* (2011). 10.1109/TR.2011.2161049.
- [302] XIA, T., JIN, X., XI, L., AND NI, J. Production-driven opportunistic maintenance for batch production based on mam–apb scheduling. *European Journal of Operational Research* 240, 3 (2015), 781–790.
- [303] XU, Z., JI, Y., AND ZHOU, D. A new real-time reliability prediction method for dynamic systems based on on-line fault prediction. *IEEE Transactions on Reliability* 58, 3 (2009), 523–538.

- [304] YANG, Y., AND KLUTKE, G. Lifetime-characteristics and inspection-schemes for levy degradation processes. *IEEE Transactions on Reliability* 49, 4 (2000), 377–382.
- [305] YANG, Y., AND KLUTKE, G.-A. Improved inspection schemes for deteriorating equipment. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 14, 4 (2000), 445–460.
- [306] YANG, Y., AND KLUTKE, G.-A. A distribution-free lower bound for availability of quantile-based inspection schemes. *IEEE Transactions on Reliability* 50, 4 (2001), 419–421.
- [307] YANNAROS, N. Weibull renewal processes. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 46, 4 (1994), 641–648.
- [308] YEH, R. H. State-age-dependent maintenance policies for deteriorating systems with erlang sojourn time distributions. *Reliability Engineering & System Safety* 58, 1 (1997), 55–60.
- [309] ZENG, Z., K. R., AND Y., C. A physics-of-failure-based approach for failure behavior modeling : With a focus on failure collaborations. In *Annual Conference of the European Safety and Reliability Conference (ESREL) 2014, Wroclaw, Poland.* (2014).
- [310] ZHANG, Z., ZHOU, Y., SUN, Y., AND MA, L. Condition-based maintenance optimization without a predetermined strategy structure for a two-component series system. *Eksploatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 14, 2 (2012), 120–129.
- [311] ZHAO, J., AND XU, C. A joint policy for condition-based maintenance and spare provisioning using simulation. In *IEEE Conference on Prognostics and System Health Management (PHM-2012 Beijing)* (2012), IEEE, pp. 1–7.
- [312] ZHAO, X., FOULADIRAD, M., BÉRENGUER, C., AND BORDES, L. Condition-based inspection/replacement policies for non-monotone deteriorating systems with environmental covariates. *Reliability Engineering & System Safety* 95, 8 (2010), 921–934.
- [313] ZHOU, W., HONG, H., AND ZHANG, S. Impact of dependent stochastic defect growth on system reliability of corroding pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 96 (2012), 68–77.
- [314] ZIO, E., MARELLA, M., AND PODOFILLINI, L. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems : application to the railway industry. *Reliability Engineering & System Safety* 92, 10 (2007), 1303–1314.

# Kim Anh NGUYEN

## Doctorat : Optimisation et Sûreté des Systèmes

### Année 2015

#### Développement de stratégies de maintenance prévisionnelle de systèmes multi-composants avec structure complexe

Aujourd'hui, les systèmes industriels deviennent de plus en plus complexes. Cette complexité est due d'une part à la structure du système qui ne se résume pas à des structures classiques en fiabilité, d'autre part à la prise en compte de composants présentant des phénomènes de dégradation graduelle que des systèmes de monitoring permettent de surveiller. Ceci mène à l'objectif de cette thèse portant sur le développement des stratégies de maintenance prévisionnelle pour des systèmes multi-composants complexes. Les politiques envisagées proposent notamment des stratégies de regroupement de composants permettant de tirer des dépendances économiques identifiées. Des facteurs d'importance permettant de prendre en compte la structure du système et la dépendance économique sont développés et combinés avec les évaluations de fiabilité prévisionnelle des composants pour l'élaboration de règles de décision de regroupement. De plus, un couplage des règles de décision de maintenance et de gestion des stocks est également étudié. L'ensemble des études menées montrent l'intérêt de la prise en compte de la fiabilité prévisionnelle des composants, des dépendances économiques et de la structure complexe du système dans l'aide à la décision de maintenance et de gestion des stocks. L'avantage des stratégies développées est vérifié en les comparant à d'autres existantes dans la littérature.

**Mots clés :** matériaux, détérioration, modèles mathématiques - durée de vie (ingénierie) - contrôle technique - prévision, théorie de la - fiabilité - systèmes complexes - maintenance conditionnelle - prise de décision, modèles mathématiques - logistique, approvisionnement, contrôle - Monte-Carlo, méthode de.

#### Predictive Maintenance Strategies for Multi-component Systems with Complex Structure

Today, industrial systems become more and more complex. The complexity is due partly to the structure of the system that cannot be reduced to classic structure reliability (series structures, parallel structures, series-parallel structures, etc), secondly the consideration of components with gradual degradation phenomena that can be monitored. This leads to the main purpose of this thesis on the development of predictive maintenance strategies for complex multi-component systems. The proposed policies provide maintenance grouping strategies to take advantage of the economic dependence between components. The predictive reliability of components and importance measures allowing taking into account the structure of the system and economic dependence are developed to construct the grouping decision rules. Moreover, a joint decision rule for maintenance and spare parts provisioning is also studied.

All the conducted studies show the interest in the consideration of the predictive reliability of components, economic dependencies as well as complex structure of the system in maintenance decisions and spare parts provisioning. The advantage of the developed strategies is confirmed by comparing with the other existing strategies in the literature.

**Keywords:** materials, deterioration, mathematical models - service life (engineering) - engineering inspection - prediction theory - reliability (engineering) - complex systems - condition-based maintenance - decision making, mathematical models - inventory control - Monte Carlo method.

Thèse réalisée en partenariat entre :

