



**HAL**  
open science

# Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée : Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance

Rosa Abbou

► **To cite this version:**

Rosa Abbou. Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée : Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance. Automatique / Robotique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2003. Français. NNT : . tel-00170432

**HAL Id: tel-00170432**

**<https://theses.hal.science/tel-00170432>**

Submitted on 7 Sep 2007

**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.

# Université Joseph Fourier - GRENOBLE 1

No. attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## THÈSE

*pour obtenir le grade de*

**DOCTEUR DE L'UJF**

***Spécialité : «AUTOMATIQUE-PRODUCTIQUE»***

dans le cadre de l'École Doctorale **EEATS**

**«Électronique, Électrotechnique, Automatique, Télécommunication et Signal»**

*présentée et soutenue publiquement*

*par*

**Rosa ABOU**

*le 21 octobre 2003*

**Titre :**

**CONTRIBUTION À LA MISE EN ŒUVRE D'UNE  
MAINTENANCE CENTRALISÉE : CONCEPTION ET  
OPTIMISATION D'UN ATELIER DE MAINTENANCE**

***Directrices de thèse :***

Mme. Zineb SIMEU-ABAZI et Mme. Maria DI MASCOLO

**JURY :**

Président	Mr. Pierre LADET	Professeur à l'INP de Grenoble
Rapporteur	Mr. Benoît IUNG	Professeur à l'UHP Nancy I
Rapporteur	Mr. Noureddine ZERHOUNI	Professeur à l'ENSMM de Besançon
Examinateur	Mr. Etienne CRAYE	Professeur à l'École Centrale de Lille
Examinateur	Mr. Serge VALLET	Directeur Technique d'EUROCOPTER à Marignane
Examinatrice	Mme. Maria DI MASCOLO	Chargée de Recherche CNRS
Examinatrice	Mme. Zineb SIMEU-ABAZI	Maître de Conférences-HDR à l'UJF Grenoble



**Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée :  
Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance**

**Résumé** : Nos travaux de recherche sont dédiés à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée dans les systèmes manufacturiers. A partir de l'état de l'art sur le service maintenance dans les différentes industries, notre problématique s'est portée sur la mise en place d'un système de maintenance dans une entreprise possédant plusieurs unités de production et dont la réparation des parties défectueuses des machines requiert des ressources bien adaptées aux diverses machines complexes.

Dans le contexte d'une maintenance centralisée, une démarche de conception d'un atelier de maintenance est proposée. A partir d'une étude fonctionnelle des machines de production, la structure de l'atelier est établie et les ressources sont déterminées qualitativement. Ensuite, nous proposons un dimensionnement de l'atelier de maintenance, passant par l'évaluation des performances et en intégrant les coûts de maintenance. Enfin, pour que l'atelier de maintenance soit efficace aussi bien sur le plan technique qu'économique de l'entreprise, des stratégies de maintenance sont déterminées pour chaque machine.

**Mots clés** : Maintenance centralisée, atelier de maintenance, conception, dimensionnement, optimisation, réseaux de files d'attente, réseaux de Petri stochastiques généralisés.

**Contribution for implementing a centralized maintenance :  
Design and optimization of an maintenance workshop**

**Abstract** : The contribution of our research is the implementation of a centralized maintenance in the manufacturing systems. From the state of the art about the maintenance function in various industries, we focused on the maintenance in a production system having several manufacturing units and whose repair of the failing parts of the machines requires resources adapted to the various complex machines. We suggest an approach of a centralized maintenance, which leads to a methodology for the design of a maintenance workshop. From a functional study of the production machine tools, we establish the workshop structure and the kind of the resources needed. Then, we propose a dimensioning of the maintenance workshop, using performance evaluation. Finally, to make the maintenance workshop efficient, on the technical level as well as on the economic level, an optimal maintenance strategy is determined for each machine.

**Keywords** : Centralized maintenance, maintenance workshop, design, optimization, queueing networks, generalized stochastic Petri nets.



*“Şber a mmi ma telluzed,  
Yebbwas lebyik at-tawded,  
Ccfu kan d acu i k-yuγen.  
At-terwed ma at-imγured,  
Telha lmeḥna ma at-teγred,  
Yelha lsas bwin yetmeḥnen”.*

*“Mon enfant, supporte la faim,  
Un jour tes vœux seront exaucés,  
Souviens-toi seulement de ce que tu as enduré.  
Quand tu seras grand tu seras rassasié,  
L’épreuve est bonne quand elle t’enseigne,  
Les fondations de celui qui a peiné sont solides”.*

Lounis AIT MENGUELLET, poète et chanteur berbère.



# *Remerciements*

Les travaux de recherche ont été réalisés au Laboratoire d'Automatique de Grenoble. Je remercie le directeur Mr. Luc DUGARD de m'avoir accueilli dans ce laboratoire, et grâce à lui ce travail s'est déroulé dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier vivement mes directrices de thèse Mme Zineb SIMEU-ABAZI et Mme Maria DI MASCOLO pour leur sympathie, leurs conseils et leurs disponibilités pendant toute la durée de la réalisation de la thèse. Leurs connaissances scientifiques et Leurs esprits d'analyse m'ont permis de mener à terme ce travail de recherche.

Je tiens à remercier Pr. Pierre LADET de s'être intéressé à mon travail et qui m'a fait l'honneur de présider le jury réuni pour la soutenance de ma thèse de doctorat.

Je remercie également Pr. Benoît IUNG et Pr. Noureddine ZERHOUNI qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté la charge d'être rapporteurs sur mon travail et m'ont prodigué des conseils pertinents.

Je remercie aussi Pr. Etienne CRAYE et Mr Serge VALLET qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté de porter un jugement sur mon travail de recherche et de faire partie du jury de soutenance de ma thèse.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements et toute ma gratitude aux membres des deux équipes de recherche au LAG  $CS^2$  et  $EP$  : René DAVID, Pierre LADET, Hassane ALLA, Christian COMMAULT, Stéphane MOCANU, Alexia GOUIN ainsi que mes ami(e)s : Monika, Alexandru, Hanen, Melha, Bessam, Aida, Sondes, Laurent et Hassane, pour les encouragements et leurs remarques toujours constructives lors des divers échanges, réunions et discussions. J'ai pu apprécier leurs qualités scientifiques et humaines, et admirer leur sympathie.



Je remercie également l'ensemble de l'équipe technique et administrative du laboratoire LAG - chacun par son nom - pour leur gentillesse, leur bonne humeur et leur disponibilité.

Une pensée très tendre et reconnaissante pour mes parents qui sont à l'origine de mon bonheur. Merci aussi à toute ma famille et tous mes proches pour leur soutien et leur sympathie.

Mes sincères remerciements s'adressent à Ammar qui m'a dirigé vers la recherche scientifique et qui demeure plus proche que jamais aussi bien sur le plan professionnel que personnel.

Une grande reconnaissance s'adresse aussi à Serge et Nicole pour leur générosité et leur chaleur plus qu'humaine.

Tout particulièrement, je tiens à exprimer ma gratitude à Nadira, Salvador, Laurence, Noureddine, Ameer, Caroline, Nounou, Chérif, Angéline, Ahmed, Safia, Kyarash et Alex pour leur soutien moral et les bons moments que nous avons passés ensemble.

Enfin, un grand merci à toutes celles et à tous ceux qui, par leur soutien sous une forme ou une autre, m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

# Table des matières

<b>1</b>	<b><i>Introduction</i></b>	<b>13</b>
1.1	Cadre de l'étude . . . . .	15
1.2	Position du problème . . . . .	19
1.3	État de l'art . . . . .	21
1.3.1	Maintenance centralisée dans les secteurs à risque . . . . .	22
1.3.2	Maintenance intégrée dans les systèmes de production . . . . .	23
1.4	Notre démarche . . . . .	26
<b>2</b>	<b><i>Fonction maintenance dans les systèmes de production</i></b>	<b>31</b>
2.1	La maintenance : un secteur en mutation . . . . .	33
2.2	Management d'une entreprise . . . . .	34
2.2.1	Approche systémique d'une entreprise . . . . .	34
2.2.2	La maintenance dans la conduite d'une entreprise . . . . .	35
2.2.3	La maintenance et le coût de possession d'un équipement . . . . .	37
2.3	Politiques de maintenance . . . . .	39
2.3.1	Maintenance corrective . . . . .	39
2.3.2	Maintenance préventive . . . . .	39
2.3.3	Maintenance mixte . . . . .	40
2.4	Orientations des politiques de maintenance . . . . .	41
2.4.1	Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC) . . . . .	42
2.4.2	Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM) . . . . .	42
2.4.3	Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) . . . . .	43
2.5	Choix d'internalisation-externalisation de la maintenance . . . . .	45
2.6	Vers une maintenance centralisée dans les systèmes de production . . . . .	46
2.6.1	Approche systémique de la maintenance centralisée . . . . .	46
2.6.2	Niveaux de maintenance considérés . . . . .	47
2.6.3	Méthodologie de la maintenance centralisée . . . . .	48
2.6.4	Fonctions de l'atelier de maintenance . . . . .	50

2.7	Conclusion . . . . .	52
<b>3</b>	<b><i>Conception d'un atelier de maintenance</i></b>	<b>53</b>
3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	Intérêt d'un atelier de maintenance centralisé . . . . .	55
3.3	Organisation structurelle du service maintenance . . . . .	57
3.4	Étapes de conception d'un atelier de maintenance . . . . .	59
3.4.1	Détermination des machines de production à maintenir . . . . .	62
3.4.2	Détermination des ressources de l'AdM . . . . .	73
3.4.3	Élaboration du plan de maintenance . . . . .	74
3.5	Amélioration de la disponibilité des machines . . . . .	75
3.6	Conclusion . . . . .	76
<b>4</b>	<b><i>Dimensionnement de l'AdM : Cas de la maintenance corrective seule</i></b>	<b>79</b>
4.1	Introduction . . . . .	81
4.2	Indicateurs de sûreté de fonctionnement . . . . .	81
4.2.1	Indicateurs de Fiabilité . . . . .	81
4.2.2	Indicateurs de Maintenabilité . . . . .	82
4.2.3	Indicateurs de Disponibilité . . . . .	82
4.3	Critères de dimensionnement . . . . .	82
4.4	Méthodes d'évaluation de performances . . . . .	83
4.4.1	Formalisme d'un réseau de files d'attente . . . . .	84
4.4.2	Résolution analytique . . . . .	85
4.5	Procédure de dimensionnement . . . . .	86
4.6	Dimensionnement dans le cas d'une maintenance corrective seule . . . . .	87
4.6.1	Cycle de réparation . . . . .	87
4.6.2	Technique de réparation par remplacement . . . . .	93
4.7	Mise en œuvre d'une interface graphique d'un atelier de maintenance . . . . .	98
4.8	Conclusion . . . . .	100
<b>5</b>	<b><i>Dimensionnement de l'AdM : Cas des deux types de maintenance</i></b>	<b>103</b>
5.1	Introduction . . . . .	105
5.1.1	Utilisation de la simulation . . . . .	105
5.1.2	Réseaux de Petri stochastiques . . . . .	106
5.1.3	Classes de réseaux de Petri stochastiques . . . . .	107
5.2	Dimensionnement dans le cas des maintenances corrective et préventive . . . . .	108
5.2.1	Procédure de dimensionnement . . . . .	108

5.2.2	Exemple illustratif . . . . .	109
5.2.3	Modélisation avec les réseaux de Petri stochastiques . . . . .	110
5.2.4	Évaluation et dimensionnement de l'atelier de maintenance . . . . .	113
5.3	Minimisation du coût des opérations de maintenance . . . . .	116
5.3.1	Rôle du retour d'expérience . . . . .	116
5.3.2	Estimation des coûts associés aux activités de maintenance . . . . .	118
5.3.3	Évaluation des coûts de maintenance de chaque machine . . . . .	122
5.4	Exemple de détermination de stratégies efficaces . . . . .	123
5.5	Conclusion . . . . .	124
<b>Conclusions et Perspectives</b>		<b>127</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>133</b>
<b>A Les différentes fonctions critères</b>		<b>139</b>
A.1	Définition du degré de surclassement . . . . .	139
A.2	Fonctions critères . . . . .	140



# Chapitre 1

## Introduction

*Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de la mise en œuvre d'une **maintenance centralisée** dans une entreprise de production. Cette entreprise englobe plusieurs unités de production possédant des machines complexes - ce qui implique l'intervention de techniciens de spécialités diverses - avec possibilité de déplacer les parties défectueuses des machines qu'on désigne par "équipements". La réparation de ces équipements requiert des postes de maintenance assez lourds et très coûteux ainsi que l'utilisation d'outillage spécifique lié à la technologie des machines. Ce qui nous amène à proposer une structure d' **atelier de maintenance** adaptée aux différentes unités de production. La question que l'on se pose est comment concevoir et optimiser cet atelier de maintenance pour satisfaire des contraintes de production et/ou de maintenance imposées. Pour résoudre cette problématique, nous tentons d'amener des éléments de réponse aux quatre questions fondamentales suivantes : "Quels sont les enjeux réels ? Comment cette problématique est abordée dans la littérature ? Quelles sont les limites des solutions existantes ? Qu'est-ce qu'on propose ?" C'est l'objectif de ce premier chapitre.*



## 1.1 Cadre de l'étude

Dans un contexte économique en constante évolution, la concurrence internationale oblige l'industriel à améliorer le rendement de ses installations de production pour répondre aux besoins des clients. L'une des voies menant à cet objectif consiste à augmenter le degré d'automatisation grâce à l'évolution technologique qui améliore la fiabilité et réduit le nombre d'interventions, mais nécessite cependant, en cas d'intervention sur les installations de production, le recours à du personnel de plus en plus spécialisé et des moyens techniques complexes. À cet égard, il est essentiel que l'automatisation et la complexité accrue de ces installations ne remettent pas en cause leur disponibilité. Néanmoins, le niveau élevé de la qualité et de la fiabilité atteint ne suffit pas à éradiquer les éventuelles défaillances des installations et éviter totalement l'apparition de défauts et de pannes. Afin que ces aléas et dysfonctionnements n'entraînent pas d'immobilisations trop longues, les industriels doivent maintenir continuellement leurs outils de production. Dans ce contexte, les méthodes de maintenance appliquées dans divers secteurs gagnent de plus en plus d'intérêt en situation d'*indisponibilité* d'une installation. La rapidité avec laquelle cette installation est remise en service dépend de l'efficacité de ces méthodes, et conditionne de manière significative la disponibilité et par voie de conséquence la **productivité** et le **coût de maintenance** engendré. Ces méthodes de maintenance sont d'autant plus efficaces quand elles gèrent et coordonnent toutes les activités liées à la fois à la production et à la maintenance, dans le cadre d'une politique de maintenance adaptée aux exigences de l'industrie, en tenant compte de ses diverses contraintes (techniques et économiques) et des objectifs de production (coût, qualité, délai).

Dans le domaine manufacturier, la fonction maintenance a été considérée au départ comme un poste inévitable de dépenses, et son rôle est rarement pris comme une activité stratégique au sein des entreprises. En effet, au début de l'ère industrielle, la maintenance était considérée comme une sous-fonction de la production et se résumait à un entretien qui consistait sommairement à dépanner et à réparer après défaillance, avec le souci d'un redémarrage rapide, et en n'ayant comme objectif préventif que le minimum vital tel que la lubrification et les rondes de surveillance [Monchy, 2000]. Ces actions d'entretien effectuées au cas par cas peuvent être justifiées par la complexité des équipements utilisés à cette époque, par la faible incidence économique des arrêts fortuits et par les méthodes de production en usage (avec la présence de stock tampons en particulier). Cependant, sous les effets conjugués de la crise économique et de la concurrence internationale, entraînant des contraintes incontournables liées aux exigences de la baisse des coûts de



production des biens et des services, la fonction maintenance ne cesse d'évoluer.

Nous assistons depuis le début des années 1980 à un effort de rationalisation des pratiques et des budgets de maintenance des équipements de l'industrie et des patrimoines immobiliers. Cette évolution conjoncturelle de la maintenance est de plus favorisée par l'apparition de méthodes éprouvées issues de la *sûreté de fonctionnement* (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité) dont les preuves de leur efficacité ont été démontrées dans certaines industries dites *process à risque continu à la sécurité*, telles que les transports, la pétrochimie et les centrales nucléaires. Dans ces industries, comme le besoin émergent et impératif à satisfaire, plus que la productivité et la qualité, est la *sécurité* - sécurité des exploitants mais aussi du matériel et de l'environnement -, des *ateliers de maintenance* sont conçus et dédiés au maintien du matériel de production de biens ou de services. Dans les raffineries par exemple, les départements de production et de maintenance sont les plus importants en termes de personnel, chacun d'eux comportant environ 30% de la main d'œuvre totale [Dekker, 1996].

En aéronautique, vu les importants enjeux sécuritaires et financiers, des ateliers de maintenance sont conçus et dédiés à l'entretien des avions. Les différentes activités présentes dans l'atelier englobent aussi bien le petit entretien (réglage, révision du moteur) que le grand entretien, qui correspond à une révision majeure de l'avion lors de visites programmées (déshabillage de l'avion et changement de pièces lourdes comme le moteur). Pour centraliser les ressources de maintenance, ces ateliers regroupent tous les appareils de mesure et d'intervention (test, réglage, désassemblage, ...), un magasin de pièces de rechange et plusieurs techniciens de compétences diverses (automaticiens, électriciens, hydrauliciens, etc.). Les techniciens interviennent dans des disciplines données afin de répondre au souci de maîtrise de la sécurité et des délais de production de service, tout en optimisant les coûts de maintenance. Pour les responsables de ces domaines à risque, entretenir le matériel en subissant son comportement est inadapté face aux risques encourus : il est alors judicieux de maîtriser ces systèmes automatisés, en prévenant les incidents pour échapper aux accidents, tout en évitant des surcoûts prohibitifs. C'est dans ce contexte que ces secteurs nécessitent des ateliers de maintenance qui requièrent des compétences scientifiques et techniques, et la mise en œuvre des stratégies de maintenance adaptées aux installations à entretenir.

Dans le domaine industriel, la recherche des conditions optimales de maintenance des équipements, fondée sur la connaissance de la *fiabilité*, a permis d'aller au-delà des

gains que les politiques de maintenance préventive systématique développées au début des années 1960 avaient obtenus. Les dernières améliorations révèlent que de nouvelles politiques de maintenance ont joué un grand rôle dans l'amélioration de la performance triangulaire " *Coût - Qualité - Délai*". L'Observatoire BIPE<sup>1</sup>-AFIM<sup>2</sup> relève, en effet, que les dépenses de maintenance dans le secteur industriel en France sont passées de 4,5% du chiffre d'affaire de l'industrie en 1987 à 3,2% pour l'année 2000 [Combeau, 2002]. Deux facteurs ont contribué à nourrir ce progrès :

- le développement de l'appel à des entreprises de service de plus en plus performantes pour l'**externalisation des activités de maintenance** (et parfois de production) pour certaines industries ;
- la recherche de la réduction rapide des coûts de maintenance et l'amélioration de la productivité et de la qualité, par une mise en place d'un **service de maintenance interne** pour d'autres industries.

Le premier facteur est lié au fait que maintenir l'outil de production n'est pas une tâche simple. La mise en œuvre des concepts de maintenance pour maximiser la performance globale de l'entreprise exige des techniciens compétents, des outils adaptés aux machines à entretenir, une gestion de pièces de rechange adéquate et un système d'information efficace pour gérer toutes les tâches de maintenance qui requièrent des méthodes de travail toujours plus pointues [Kaffel, 2001]. La fonction maintenance devient alors complexe, tant au niveau de son organisation que des solutions qu'elle propose. Pour cela, l'acquisition de toutes ces ressources ainsi que la complexité du système de maintenance constituent souvent pour l'entreprise un frein à l'implantation d'un *atelier de maintenance* efficace et avec un coût d'investissement optimal. C'est l'une des principales raisons qui pousse certaines industries à recourir à la sous-traitance, qui d'ailleurs ne se limite pas aux tâches de maintenance mais sert aussi pour leur besoin en production.

D'après des statistiques réalisées en 2001 [Combeau, 2002], 30% des entreprises ont eu recours à des sous-traitants pour assurer la maintenance de leurs installations industrielles. Faire appel à un service externe présente un certain avantage pour l'entreprise, dans le sens où la sous-traitance lui permet de se concentrer sur ses activités principales. Toutefois, ce choix présente des limites. L'outil de production de l'entreprise est de ce fait dépendant de la qualité de la prestation du sous-traitant. Cet état de dépendance

---

<sup>1</sup>Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques

<sup>2</sup>Association Française des Ingénieurs et responsables de Maintenance

peut nuire à l'entreprise en cas de tensions dues à la présence des pannes et des dysfonctionnements. Certaines défaillances peuvent causer un sérieux préjudice sur la pérennité des outils de production et par conséquent sur le profil de l'entreprise. D'ailleurs, l'entreprise n'a aucune prise sur le climat social du sous-traitant et sur la compétence de ses techniciens. De plus, lorsqu'elle décide d'externaliser ses opérations de maintenance, l'entreprise se doit d'assurer un suivi rigoureux de la *santé* de son prestataire et de la *durabilité* de ses services, en tenant compte continuellement des aspects sociaux, financiers, techniques et commerciaux du prestataire sous-traitant. Une tâche qu'elle n'a peut-être pas envie de faire mais surtout un risque qu'elle n'a certainement pas envie d'assumer !

En ce qui concerne le deuxième facteur qui a contribué à l'amélioration de la performance triangulaire pour d'autres entreprises, c'est l'investissement de chaque entreprise dans la mise en œuvre d'un service de maintenance en interne au sein de son site de production. Elle développe la maîtrise des savoir-faire stratégiques et la capitalisation des acquis en matière de données et d'expériences, en mettant en place les fonctions méthodes et ordonnancement des activités de maintenance. D'ailleurs, maintenir en condition opérationnelle l'outil de production reste, à plus de 80%, l'activité majeure du personnel interne de l'entreprise (figure 1.1 - Source ADEPA<sup>3</sup>). A cet effet, l'aspect économique du *coût de la panne et ses conséquences* explique en grande partie l'expansion du besoin de maintenir ces outils de production et d'optimiser leurs performances [Monchy, 2000].

Seulement, la complexité des installations de production automatisées nécessite la mise en œuvre d'un service de maintenance en interne au niveau de chaque site de production pour maximiser la performance globale de l'entreprise. Ce service de maintenance requiert des techniciens compétents de qualification multiple, l'utilisation d'outillage et de postes d'intervention assez coûteux et adaptés aux machines à entretenir, une gestion des pièces de rechange adéquate et un système d'information efficace pour gérer toutes les tâches de maintenance.

Qu'elle soit interne ou externalisée, la fonction maintenance est devenue désormais l'une des pierres angulaires de tout système de production.

---

<sup>3</sup>Association de la Productique

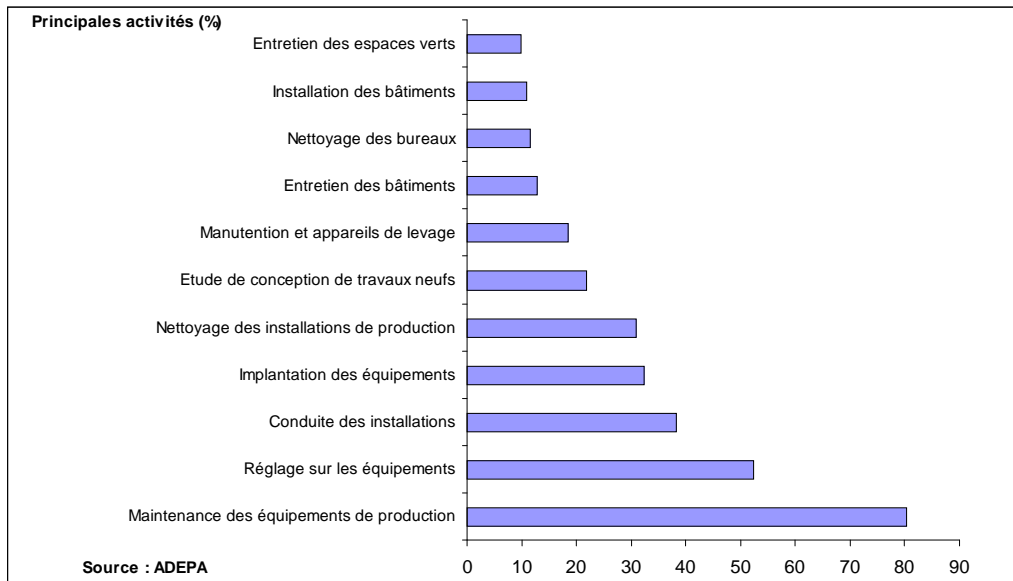


FIG. 1.1 – Principales activités (%) du personnel interne dans le secteur industriel

## 1.2 Position du problème

Dans nos travaux de recherche, nous nous intéressons en particulier au cas d'une entreprise qui regroupe plusieurs unités de production, possédant des machines complexes - ce qui nécessite l'intervention de techniciens de spécialités diverses - avec possibilité de déplacer les parties défectueuses des machines qu'on nommera *équipements*. La réparation de ces équipements requiert des postes de maintenance assez lourds pour pouvoir les transporter jusqu'au site de production et très coûteux. Ce type d'entreprise est en perpétuelle recherche d'un système de maintenance adapté à ses diverses machines de production. La question que l'on se pose est comment ce système de maintenance sera pris en compte dans cette entreprise pour satisfaire trois types d'enjeux :

**Enjeu technique :** le système de maintenance doit optimiser le rendement des machines tout en améliorant la qualité des interventions. Il doit garantir un retour d'expérience pour mettre à jour le plan de maintenance et aussi faciliter la mise en place de nouvelles techniques d'une manière réactive ;

**Enjeu économique :** lors de la prise en compte de la maintenance, il faut concilier les contraintes de réalisation du service maintenance. Pour cela, il faut optimiser les ressources et maîtriser les coûts engendrés par les activités de maintenance ;

**Enjeu organisationnel :** vue la technologie actuelle des machines de production, le système de maintenance doit gérer les technicités du personnel ainsi que les autres ressources de maintenance, et planifier les tâches de maintenance en parallèle avec

celles de la production. Ce qui permettra d'assurer une parfaite cohérence entre les phases de production et de maintenance, même si ces deux activités n'ont pas toujours les mêmes règles de priorité : la production raisonne en termes de productivité et de délai, et la maintenance raisonne en termes de coût et d'efficacité.

Ainsi, la prise en compte d'un système de maintenance dans cette entreprise doit à la fois satisfaire les critères techniques, maximiser l'impact stratégique et optimiser les critères économiques. Les objectifs d'amélioration de productivité, de flexibilité, de la sécurité des unités de production ainsi que l'optimisation des critères économiques nécessitent *la création d'une dynamique de progrès continu* entre le service *Production* et le service *Maintenance*. Ces objectifs sont difficiles à atteindre si les tâches de maintenance sont sous-traitées, encore plus délicats à réaliser si chaque site de production est muni de son propre service de maintenance. En effet, dans le cas où la maintenance est sous-traitée, cette stratégie présente un certain avantage dans le sens où elle permet à l'entreprise de se concentrer sur ses activités principales, mais elle présente des limites. Principalement dans le cas de défaillance d'une machine, les temps d'attente pour une intervention sont non négligeables, voire considérables. De plus, lorsqu'on opte pour cette stratégie, il faut s'assurer continuellement de la pérennité du service sous-traitant. Pour le cas où chaque site de production possède son propre service de maintenance, cette stratégie ne convient pas à notre cadre d'étude. La réalisation des différents services de maintenance serait très onéreuse vue la complexité des machines et par conséquent la diversité des ressources de maintenance pour chaque site. Ce qui ne permet pas forcément l'optimisation du coût d'investissement et de maintenance.

C'est sur ce problème que porte notre réflexion. Cette thèse comporte un ensemble de recherches qui s'inscrivent dans le cadre d'une problématique de la mise en œuvre d'une **maintenance centralisée** dans une entreprise possédant plusieurs unités de production, basée sur les interrelations entre les services de production et de maintenance. La méthodologie d'une telle maintenance centralisée prône l'amélioration de la disponibilité des machines des différentes unités de production en réduisant les frais d'investissement dans les ressources ainsi que le coût des activités de maintenance. Cet objectif est réalisé par la **conception d'un atelier central de maintenance** (AdM), où sont regroupées toutes les ressources destinées au maintien des machines de production pour garantir la durabilité de leurs cycles de vie ainsi que leur rentabilité (figure 1.2). En effet, la centralisation permet, d'une part, une optimisation des ressources nécessaires aux différentes activités de maintenance ainsi qu'une assistance technique, d'autant plus que les mutations technologiques exigent de nouvelles organisations et des adaptations

de compétences diverses et coûteuses. D'autre part, la centralisation permet une standardisation des procédures de maintenance et des flux de communication et un retour d'expérience. Ce qui permet d'établir un suivi homogène et continu des équipements et de leurs défaillances, et par la suite une meilleure maîtrise des durées d'intervention ainsi que des coûts engendrés.

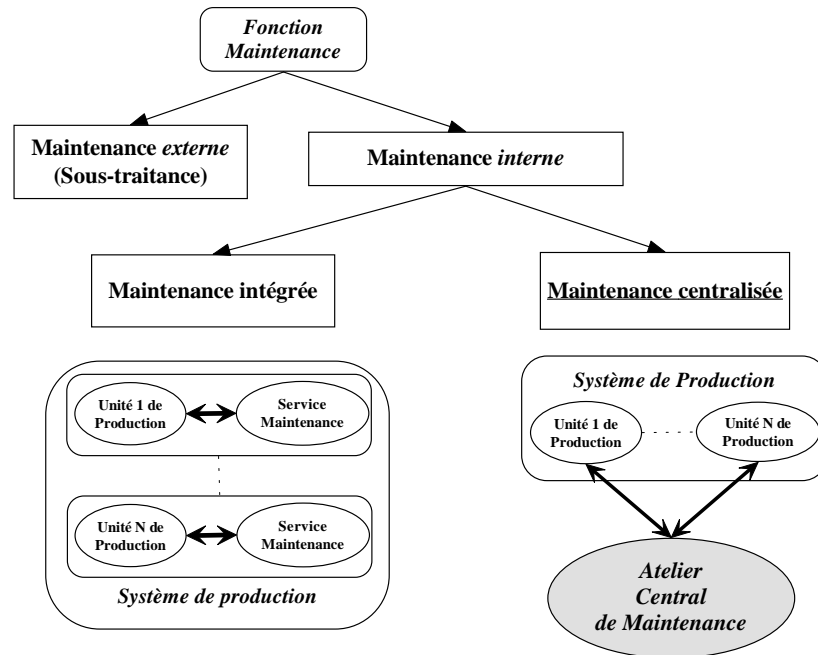


FIG. 1.2 – Approche proposée de la maintenance centralisée dans une entreprise

### 1.3 État de l'art

La majeure partie des travaux menés dans la littérature est dédiée à la maintenance intégrée dans les systèmes de production. Nous trouvons des ouvrages de référence concernant la définition et la méthodologie des stratégies de maintenance ([Zwingelstein, 1996], [Richet et al., 1996], [Monchy, 2000]) et la gestion de la maintenance dans les systèmes industriels ([Deborde et Georjon, 1999], [Francastel, 2001], [Cuignet, 2002]). D'autres travaux de recherche portent sur l'évaluation de l'impact des politiques de maintenance appliquées sur des machines de production ([Ensore et Burns, 1983], [Banerjee et Flynn, 1987], [Kelly et al., 1997], [Kuhn, 1999], [Zemouri et al., 2001], [Châtelet et al., 2002]), sur l'optimisation des coûts de maintenance ([Dekker et Roelvink, 1995], [Deniaud et al., 1999]),

et sur la gestion du stock de pièces de rechange ([Luce et Pavan, 1995]), sans toutefois considérer les interactions des décisions entre les processus de production et de maintenance. Pour plus d'informations et précisions, le lecteur peut se reporter aux travaux de synthèse concernant l'état de l'art sur la gestion de la maintenance, les différents modèles d'optimisation de la maintenance ([Lie et al., 1977], [Sherif et Smith, 1981], [Kralj et Petrovic, 1988], [Valdez-Flores et Feldman, 1989]) ainsi que son évolution dans les différents domaines d'application ([Pintelon et Gelders, 1992], [Dekker, 1996], [Dekker et Skarf, 1998], [Simeu-Abazi, 2000] et [Simeu-Abazi et al., 2000]).

Toutefois, peu d'études ont été menées sur l'organisation et la structuration de la fonction maintenance prise comme une fonction stratégique au sein de l'entreprise, conjointement avec la fonction de production, et de ce fait le service maintenance est négligé dans la phase de conception du système manufacturier. De plus, hormis les travaux de [Kattan, 2000] effectués au Laboratoire d'Automatique de Grenoble, aucune référence, à notre connaissance, n'a abordé la conception d'un atelier de maintenance basée sur la mise en œuvre d'une maintenance centralisée dans un système manufacturier possédant plusieurs unités de production.

Concernant les systèmes de maintenance existants, on peut classer sommairement les travaux de recherche suivant deux catégories : les travaux dont la maintenance est centralisée, ce qui est le cas dans les secteurs à risque, et les travaux dont la maintenance est intégrée dans le système de production.

### 1.3.1 Maintenance centralisée dans les secteurs à risque

Les travaux traitant de la maintenance centralisée s'intéressent à l'optimisation de la maintenance par des résolutions mathématiques et sont plutôt quantitatifs. Ils sont centrés sur l'élément à maintenir (bateau, avion) sans tenir compte de l'environnement lié à la production du service.

Les travaux de recherche de Zijm ([Zijm, 1999], [Zijm et al., 2001]) et de Rustenburg ([Rustenburg, 2000], [Rustenburg et al., 2000]) sont dédiés aux problèmes de gestion des pièces de rechange rencontrés par la Marine Royale des Pays Bas. La Compagnie Maritime est composée de plusieurs flottes ; chacune d'elles comporte une série d'installations complexes, pas forcément identiques, qui peuvent être décomposées en un nombre d'unités. Chaque flotte est munie d'un service maintenance nommé *base*, pour la

réparation des installations défectueuses, ainsi que d'un stock de pièces de rechange pour le remplacement. La technique utilisée, dite "*technique de réparation par remplacement*", consiste à remplacer une unité défectueuse par une nouvelle : l'installation est de nouveau opérationnelle et l'unité défectueuse est réparée puis remise dans le stock de pièces de rechange. La Compagnie Maritime dispose aussi d'un service central de réparation pour toutes les flottes, avec un stock de pièces de rechange composé d'installations et d'unités diverses pour le remplacement. En effet, quand la réparation d'une unité défectueuse sur la base est complexe, l'unité en question est envoyée au service central et une demande d'une nouvelle unité pour le remplacement est effectuée. La problématique consiste à déterminer le niveau des pièces de rechange (en qualité et en quantité), au niveau du service central et de chaque base, en tenant compte d'un budget limité pour l'approvisionnement. Le problème est résolu avec des méthodes analytiques. Ainsi, des hypothèses de travail ont été formulées telles que des défaillances suivant un processus poissonien, une capacité de réparation illimitée aux bases des flottes et au service central et un temps de réparation négligeable.

Dans le domaine de l'aéronautique, on trouve les travaux de [Dijkstra et al., 1994] et de [Keskinocak et Tayur, 1998] dédiés à la planification du personnel du département de maintenance des avions et à l'ordonnancement des tâches de maintenance. Ils ont développé un système d'aide à la décision pour déterminer le nombre de techniciens suivant leurs compétences, et analyser l'efficacité du département de maintenance en terme de charge de travail de chaque technicien. La résolution est basée sur des modèles mathématiques.

Ces travaux sont directement liés à notre thématique de recherche, dans le sens où la maintenance considérée est centralisée. Seulement, le produit à maintenir est un produit de service (bateau, avion) sans tenir compte de l'environnement puisque les produits, c'est-à-dire les bateaux ou les avions, sont mutuellement indépendants. Dans notre cas, on s'intéresse plutôt à des lignes de production manufacturières de type job-shop, où les machines sont forcément dépendantes les unes des autres. De plus, la méthodologie de conception d'un atelier de maintenance et le choix des différentes ressources ne sont pas abordés.

### **1.3.2 Maintenance intégrée dans les systèmes de production**

Dans les systèmes manufacturiers, les activités de maintenance des machines sont soit intégrées - la plupart des cas -, soit externalisées. Dans la littérature, on trouve des



travaux de recherche abordant la fonction maintenance dans un cadre de production. Les modèles mis en œuvre tiennent compte des interventions correctives et/ou préventives intégrées au sein d'un système de production et fournissent des résultats d'ordre qualitatif en proposant des règles de gestion optimales.

Les travaux de recherche de [Banerjee et Flynn, 1987], de [Flynn, 1989], de [Mahmoodi et Dooley, 1991], de [Ruben et al., 1993] et de [Kelly et al., 1997] s'intéressent aux performances d'un atelier job-shop composé de cellules de machines sujettes à des défaillances. Dans ce cadre, ils étudient l'influence de divers paramètres liés à la maintenance, notamment l'impact des politiques de maintenance (corrective et préventive) appliquées aux cellules, en s'appuyant sur des études comparatives basées sur la simulation. L'intérêt de ces travaux pour nos recherches réside dans le choix d'une politique de maintenance à appliquer sur chaque cellule selon les caractéristiques techniques des différentes machines qu'elle comporte. Seulement, l'impact de l'effectif des techniciens et de leur compétence n'est pas pris en considération.

L'approche proposée par [Bergot et al., 1994] aboutit à une méthodologie ADEMIS (Aide à la Définition et à la Mise en œuvre des Stratégies de maintenance) définie dans un cadre conceptuel de référence pour la résolution de problèmes décisionnels relatifs à la maintenance des systèmes automatisés de production. L'approche est intéressante dans le sens où le problème traité porte sur le choix et l'optimisation des stratégies de maintenance à appliquer à chaque élément stratégique ou critique du système de production. Ces stratégies correspondent à l'ensemble des décisions et des actions relatives aux choix techniques, méthodes et outils qui permettront de maintenir ou de rétablir l'aptitude du système à satisfaire la ou les fonctions requise(s), dans les conditions données et dans un intervalle de temps fixé. Les éléments critiques représentent les éléments du système susceptibles, par leur défaillance, d'entraver la production (en terme de productivité, qualité, délai) et/ ou de mettre en cause la sécurité (humaine, matérielle et environnementale). Nous nous sommes inspirées de ce travail pour proposer une approche systémique d'une maintenance centralisée.

Les travaux de thèse de [Sassine, 1998] s'intéressent à l'étude et à l'intégration de la fonction maintenance dans les systèmes de production manufacturiers dans le but d'accroître leurs performances. Trois politiques de maintenance ont été considérées (corrective, préventive et mixte). L'approche de modélisation modulaire proposée, qui découpe le système étudié en plusieurs cellules élémentaires, est basée sur les réseaux de

Petri stochastiques et les processus de Markov. Ses travaux se sont concrétisés par un logiciel de calcul, de simulation et de décision baptisé ALOSURF (Atelier LOGiciel de SUREté de Fonctionnement) qui permet d'évaluer l'impact de la maintenance et de décider des politiques à intégrer. Pour ce qui nous concerne, cette approche modulaire nous semble être intéressante lors de la modélisation par des réseaux de Petri stochastiques et déterministes des phases de production et de maintenance. Notons que la démarche d'intégration des activités de maintenance n'a pas été abordée, et seules trois différentes phases d'une machine (usinage, panne, maintenance) sont considérées, sans tenir compte des ressources de maintenance.

Les travaux de [Ly, 1999] sont orientés vers la surveillance prédictive indirecte pour l'optimisation de la maintenance dans les systèmes flexibles de production manufacturière. Le principe consiste à détecter des dérives au niveau du flux de production, d'identifier l'origine de la dérive et ensuite d'analyser la cause de cette dérive. L'objectif est de décider des actions de maintenance à mener pour améliorer les performances et le niveau de sûreté de fonctionnement du système. Le principe est intéressant afin d'améliorer les performances en agissant sur les paramètres les plus influents. Dans notre cadre d'étude, nous distinguons deux cas lors de l'évaluation et de l'analyse des performances de l'atelier de maintenance. Dans le premier cas, on tient compte de la maintenance corrective seule. Les performances de l'atelier sont alors analysées par rapport au temps de séjour d'un équipement défaillant dans l'atelier. Dans le second cas, les deux politiques de maintenance (corrective et préventive) sont intégrées. Dans ce cas, les performances de l'atelier sont analysées par rapport au taux moyen d'usinage sur une machine de production en tenant compte des aléas liés aux différentes interventions préventive et corrective. Ceci permet de dimensionner d'une manière optimale et selon les besoins de production les ressources de l'atelier de maintenance.

Dans les travaux de [Léger, 1999], l'auteur propose un cadre formel de modélisation de la maintenance des systèmes industriels de production. L'objectif sous-jacent à ses travaux de recherche est de contribuer aux fondements de la maintenance prévisionnelle dans des systèmes industriels en tant que discipline scientifique par l'intégration d'un ensemble de contributions tant académiques qu'industrielles. Ces travaux sont d'un apport incontestable pour la mise en œuvre d'une approche systémique de la maintenance. Par contre, la méthodologie de conception d'un système de maintenance est ignorée.

Les travaux de thèse de [Charles, 2000] sont destinés à l'évaluation des performances d'un

---

atelier de fabrication de composants électroniques en présence de défaillances. L’auteur propose un simulateur basé sur les principes de la simulation à événements discrets, qui permet de déterminer des stratégies efficaces de maintenance et d’optimiser les politiques de maintenance préventives. Les activités de maintenance préventive et corrective sont introduites en tenant compte des hypothèses de réparation **AGAN** (As Good As New) et **ABAO** (As bad As Old). Bien que la maintenance soit intégrée, ces travaux sont liés à notre thématique de recherche puisque les interactions entre les activités de production et de maintenance sont considérées. Seulement, tout ce qui est lié à la conception du service de maintenance et le dimensionnement des différentes ressources n’a pas été abordé.

## 1.4 Notre démarche

Les travaux de [Kattan, 2000] constituent les prémices de la notion d’atelier de maintenance dédié à la réparation des parties défaillantes des machines de production. La modélisation et l’évaluation des performances de l’atelier sont basées sur l’utilisation des réseaux de files d’attente. Toutefois, l’étude est focalisée uniquement sur la maintenance corrective. Ainsi, notre thématique de recherche est une continuité de ces travaux où la démarche de conception de l’atelier et l’optimisation des coûts de maintenance sont abordées.

L’étude bibliographique montre qu’aucune démarche à notre connaissance n’a abordé la mise en œuvre d’une *maintenance centralisée* dans une entreprise manufacturière possédant plusieurs unités de production. De plus, la *méthodologie de conception d’un atelier de maintenance* dédié aux opérations de maintenance des machines de plusieurs unités de production est ignorée. Remarquons que les ateliers de maintenance existants sont plutôt dédiés à la maintenance d’équipements de service (bateaux, avions). Cette maintenance centralisée se place impérativement dans un contexte de production. Cette thèse voit sa contribution dans la mise en application de la méthodologie d’une maintenance centralisée dans des systèmes manufacturiers, et dont les équipements à maintenir sont plutôt des machines de production. Ceci suppose que les parties défaillantes des différentes machines, qu’on nomme ”équipements”, sont déplaçables et réparables pour effectuer des réparations dans l’atelier de maintenance. Ce transfert est justifié par le fait que les différentes phases de réparation (diagnostic, démontage, soudage, etc.) nécessitent des techniciens de compétences variées et l’utilisation de postes assez lourds et coûteux. En ce qui concerne les interventions préventives, celles-ci sont effectuées soit sur le site de production soit dans l’atelier de maintenance. Pour cela, les ressources de maintenance

doivent être en parfaite cohérence avec les différentes activités de maintenance selon la fonctionnalité des machines. De plus, pour ne pas trop pénaliser la productivité à cause de divers arrêts (prévus ou non), il est judicieux d'effectuer un **ordonnancement dynamique** des tâches de maintenance, dans le sens où ces dernières peuvent être retardées ou avancées selon l'état d'autres machines, du niveau des stocks intermédiaires et/ou de la disponibilité des ressources de maintenance.

Le fait de centraliser la maintenance permet, d'une part, d'assurer un **suivi homogène et continu** des équipements et donc une meilleure maîtrise des durées d'interventions, de leurs fréquences ainsi que des coûts de maintenance engendrés. Ce suivi continu n'est pas évident à réaliser si les activités de maintenance sont sous-traitées (cas d'une maintenance externe). D'autant moins si on a affaire à plusieurs prestataires et qu'on ne peut garantir la durabilité de leurs services !

D'autre part, le fait de centraliser les activités de maintenance permet d'optimiser le nombre de ressources, au lieu de munir un service de maintenance pour chaque unité de production (cas d'une maintenance intégrée). Ainsi, une meilleure organisation est obtenue et par conséquent une synergie beaucoup plus forte avec les autres fonctions du système de production telles que la surveillance, la supervision, la commande ainsi que la planification/ordonnancement entre les tâches de production et de maintenance. Ce qui crée une dynamique de progrès continu entre la maintenance et les autres activités. En effet, pour faire face aux contraintes de disponibilité, de productivité et de qualité exigées, la fonction maintenance doit se doter de critères d'analyse plus proches de ceux de la production, vu que les fonctions de production et de maintenance n'ont pas toujours les mêmes règles de priorité : la première raisonne en termes de productivité et de délais tandis que la seconde raisonne en termes de coût, d'ordonnancement et de partage de ressources. Ceci pose un problème d'interprétation et de prise de décision par rapport aux événements qui surviennent.

Nous proposons ainsi une démarche de conception et d'optimisation d'un atelier de maintenance. Nous définissons cet atelier comme étant un ensemble de ressources, à savoir des techniciens de compétences techniques diverses, de l'outillage, des postes de maintenance lourds (soudeuse, perceuse, etc.) et un magasin stock pour les pièces consommables et de rechange pour le remplacement. Cet atelier de maintenance a pour objectif d'assurer la disponibilité des machines des différentes unités de production en réalisant des opérations de maintenance corrective (suite à une défaillance) et préventive (effectuée dans l'in-

tention d'éviter la dégradation et de réduire la probabilité d'occurrence d'une défaillance).

Les principales questions soulevées dans cette thèse et auxquelles nous tentons d'amener des éléments de réponse sont les suivantes :

- Quelle est la *structure de l'atelier de maintenance* adaptée aux unités de production ?
- Quelles sont les *ressources* composant cet atelier de maintenance ?
- Comment évaluer les *performances* de l'atelier de maintenance et sur quels *critères* ?
- Comment *optimiser les coûts* de maintenance ?

Pour résoudre la problématique traitée, le mémoire est structuré comme suit :

Dans le **deuxième** chapitre, la mission de la maintenance dans les systèmes de production est développée. Au début du chapitre, le rôle du service maintenance dans le management de l'entreprise est abordé. Ensuite, les différentes stratégies ainsi que les politiques de maintenance sont détaillées. La mise en œuvre d'une maintenance centralisée est introduite.

Le **troisième** chapitre est dédié à la conception d'un atelier de maintenance. Pour déterminer les types de ressources constituant l'atelier de maintenance, une étude structurelle du système de production s'avère nécessaire pour répertorier puis classer les machines par ordre de priorité suivant des critères tels que la sécurité, la disponibilité, le taux de défaillance et/ou de réparation, etc. Le classement des équipements est obtenu en utilisant une approche multicritère que nous avons adaptée à notre cadre d'étude. Ce qui nous amène à déterminer les types de ressources de l'AdM.

Pour dimensionner l'atelier de maintenance, il est nécessaire d'évaluer ses performances en termes de productivité, de disponibilité des machines et des coûts de maintenance. Dans notre étude, deux cas sont étudiés. Dans le premier cas, seule la maintenance corrective est considérée. Dans le second cas, la maintenance préventive est aussi prise en compte. Différentes méthodes de modélisation et d'analyse sont alors utilisées dans chaque cas pour le dimensionnement des ressources (techniciens, postes de maintenance, stock de pièces de rechange) suivant les critères exigés tels que le nombre de pièces usinées ou le taux de disponibilité des machines. Dans le **quatrième** chapitre, nous avons traité le premier cas (maintenance corrective seule). Les méthodes analytiques basées sur les réseaux de files d'attente nous semblent alors efficaces pour déterminer la structure

optimale de l'AdM.

Le dimensionnement de l'AdM pour le cas des deux types de maintenance est étudié dans **le cinquième** chapitre. Pour tenir compte de la maintenance préventive et des interactions entre les phases de production et de maintenance, la simulation avec les réseaux de Petri Stochastiques Généralisés est utilisée. L'analyse des performances est discutée. L'atelier de maintenance ainsi conçu est jugé efficace si les critères économiques sont optimisés, autrement dit, s'ils réalisent un compromis entre l'amélioration de la productivité et la minimisation des coûts de maintenance. Ainsi, les différents coûts - directs et indirects - associés à la maintenance sont présentés et optimisés. L'optimisation consiste à déterminer la stratégie de maintenance à appliquer sur chaque machine afin de minimiser les coûts de maintenance engendrés.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion et des perspectives de continuation de ce travail.



## Chapitre 2

# *Fonction maintenance dans les systèmes de production*

*Ce chapitre a pour objet de présenter le rôle de la fonction maintenance dans les systèmes de production. Pour cela, la place de la maintenance dans l'approche systémique d'une entreprise est élaborée. Les différentes stratégies et politiques de maintenance sont évoquées. Une description de l'atelier de maintenance et des services qui le constituent est élaborée dans ce chapitre en précisant le rôle de chaque service. La notion d'atelier central de maintenance, basée sur une méthodologie d'une maintenance centralisée, est introduite dans ce chapitre.*





## 2.1 La maintenance : un secteur en mutation

La fonction maintenance, dont la vocation est d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est désormais une des fonctions stratégiques dans les entreprises. Il n'y a pas bien longtemps que le coût et la qualité étaient les seuls facteurs concurrentiels, et la satisfaction des demandes des clients pouvait être assurée en maintenant de grands inventaires de produits finis. Actuellement, les changements technologiques rapides et les petites marges bénéficiaires ont rendu une telle stratégie peu économique, forçant ainsi les industriels à fonctionner avec des niveaux de stockage les plus bas possibles. Toutefois, les clients ont eux aussi changé dans le sens où ils exigent des produits de haute qualité, des livraisons fiables et rapides, tout cela avec des coûts raisonnables. Sous cette pression, les industries sont contraintes de progresser continuellement sur plusieurs dimensions dont les principales sont : le coût de revient, la qualité du produit et les délais de livraison [Van Dijkhuizen, 1998].

Bien que ces trois dimensions (coût, qualité, délai) soient généralement appliquées dans la plupart des industries, leur importance relative varie d'une firme à une autre. Par exemple, les entreprises de fabrication d'aliments dépendent principalement du rendement des machines. Les fabricants de voitures ou de montres tiennent à la qualité de leurs produits pour conserver leur image de marque. Les industries de produits de haute technologie (ordinateurs, télévisions, caméras) quant à elles, dépendent de la vitesse à laquelle leur produit est mis sur le marché. Dans ce contexte, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée au fur et à mesure de l'automatisation et de la complexité des processus de production. Elle évolue au gré de l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, en particulier dans les domaines de la mesure et du contrôle de fonctionnement, de la systématisation progressive de l'usage des normes et des procédures.

Ainsi, le principal objectif de la maintenance est d'assurer la pérennité des équipements, de diminuer les pannes et les imprévus et de réduire les coûts de révision et de remise en état de fonctionnement. On peut synthétiser les missions de la maintenance en les plaçant sur trois plans interdépendants [Monchy, 2000] :

*Sur le plan technique :*

- accroître la durée de vie des équipements,
- améliorer leur disponibilité et leurs performances.

*Sur le plan économique :*

- améliorer les prix de revient en réduisant les coûts de défaillance,
- réduire le coût global de possession de chaque équipement, en particulier les équipements critiques ou sensibles.

*Sur le plan social :*

- réduire le nombre d'événements fortuits, ce qui réduit le risque d'accidents,
- revaloriser la qualité du travail.

Avant d'aborder les différentes stratégies de maintenance existantes, il est intéressant de replacer le contexte de la maintenance dans une vision systémique d'une entreprise.

## 2.2 Management d'une entreprise

Nous évoquons dans ce paragraphe les différentes fonctionnalités existant dans une entreprise en général, et en particulier le rôle de la maintenance dans la conduite de l'entreprise et son implication dans le coût de possession des machines de production.

### 2.2.1 Approche systémique d'une entreprise

L'approche systémique d'une entreprise consiste à identifier et à modéliser toutes les interactions entre l'outil technique de production et des facteurs internes ou externes à l'entreprise tels que la conception, la qualité, le management, la maintenance, l'évolution et l'émergence des nouvelles technologies, les facteurs humains et sociaux ainsi que l'environnement économique mondial. L'approche systémique, si elle est bien maîtrisée, permet aux industriels de mieux gérer leurs projets, en termes de coût, de délai de réalisation mais également en terme de valeur d'usage la mieux appropriée à la demande du marché.

En effet, l'objectif de tout processus industriel est de satisfaire les consommateurs d'un produit fabriqué, et l'atteinte de cet objectif avec les coûts engendrés est déterminante dans la compétition à laquelle l'industriel est nécessairement confronté. De ce fait, la maintenance participe à cette finalité qui englobe à la fois la satisfaction du consommateur et l'amélioration du profil de l'entreprise. Elle est considérée comme un levier permettant d'assurer des gains de productivité - sans être vue uniquement comme un poste inévitable de dépenses - durant la durée du cycle de vie d'un produit. D'où l'importance d'avoir un système de maintenance qui réponde au mieux aux exigences de l'entreprise et qui permette d'améliorer au mieux son profil. Ce système de maintenance doit être en parfaite cohérence avec les autres fonctionnalités de l'entreprise, pour que chaque décision vis-à-vis

du déroulement des tâches de production et de maintenance soit prise dans une optique de la bonne conduite du système de production [Léger, 1999].

### 2.2.2 La maintenance dans la conduite d'une entreprise

La conduite d'un système de production en général est une tâche complexe du fait que deux difficultés majeures s'imposent continuellement. La première difficulté est liée à la complexité du problème d'ordonnancement pour la recherche d'une solution optimale vis-à-vis d'un critère donné, sans pour autant enfreindre les contraintes techniques de fonctionnement du système de production et en satisfaisant les objectifs fixés. La deuxième difficulté correspond à la nécessité de trouver un ordonnancement optimal dans un contexte perturbé, qui provient du fait d'intégrer deux activités complexes et fortement liées, à savoir la production et la maintenance, et qui n'ont pas toujours les mêmes règles de priorité. En effet, la production raisonne en termes de productivité et délai, et la maintenance raisonne en termes de coût et d'efficacité. Ceci pose un problème d'interprétation et de prise de décision par rapport aux événements ou tâches qui surviennent. D'où la nécessité de coordonner les différentes fonctionnalités qui interagissent dans la conduite du système de production. La figure 2.1 schématise les principales fonctionnalités qui sont : la surveillance du système de production en temps réel, la planification et l'ordonnancement des différentes tâches, la supervision permettant le contrôle du système, la commande qui fait exécuter des opérations spécifiques selon l'état du système et enfin la maintenance qui assure la durabilité du service production. Nous décrivons sommairement le rôle de chaque fonctionnalité en soulignant le lien avec le service maintenance.

**Surveillance** La surveillance est chargée de recueillir en permanence tous les signaux, via des indicateurs, provenant du système de production, et de suivre en temps réel les évolutions du système commandé. Elle regroupe ainsi l'ensemble des outils permettant de contrôler l'évolution du comportement du système par rapport à son fonctionnement normal, et de détecter toute anomalie ou défaillance. Dans ce dernier cas, un diagnostic est établi afin de localiser le sous-système responsable du dysfonctionnement et d'identifier la cause de la défaillance. Ce qui permet de spécifier les opérations de maintenance à effectuer afin de remettre le système de production en état de fonctionnement.

**Planification/Ordonnancement** Il s'agit d'établir initialement un planning prévision-

---

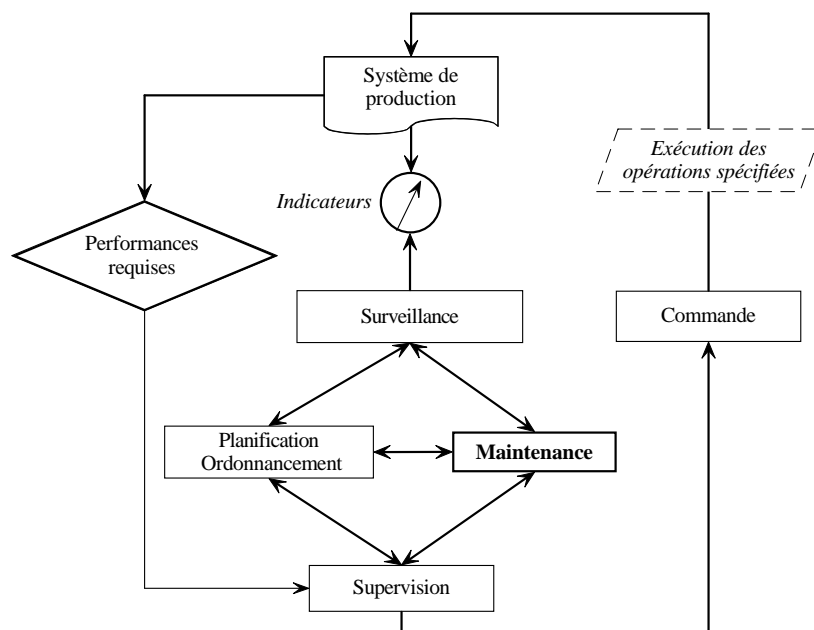


FIG. 2.1 – La maintenance dans la conduite du système de production

nel de toutes les opérations de production et de maintenance selon les besoins de l'entreprise, et en spécifiant les ressources impliquées. Ainsi, les dates de lancement des tâches sont *a priori* connues en fonctionnement normal. En présence d'anomalies, un ré-ordonnancement est alors envisagé, en tenant compte des priorités fixées au départ, pour assurer un retour vers un fonctionnement normal. L'évolution du planning devient alors dynamique suite aux dysfonctionnements du système de production.

**Supervision** La supervision contrôle et gère la conduite du système de production en fonction des performances exigées. Elle recouvre ainsi les aspects *normal* et *anormal* de fonctionnement :

- en fonctionnement normal, son rôle est de prendre en temps réel les décisions permettant d'atteindre les objectifs de production. Pour cela, elle est amenée à faire de l'ordonnancement en temps réel, de l'optimisation et à modifier en ligne la commande à appliquer [Mendez-Azua, 2002] ;
- en présence d'aléas, la supervision doit prendre toutes les décisions nécessaires pour assurer le retour vers un fonctionnement normal. Il s'agit, par exemple, d'effectuer des ré-ordonnements lors de la réintégration d'une machine de production suite à une maintenance compte tenu de l'état du système de production. En effet, après une intervention sur la machine, le passage d'un mode

d'utilisation de type "maintenance" à un état de type "production" nécessite d'amener le système dans un état spécifique compatible avec la réintégration de la machine dans la ligne de fabrication [Charles, 2000].

**Commande** Le rôle de la commande est d'exécuter un ensemble d'opérations sur le système de production en réponse aux consignes de bon fonctionnement. Elle réalise les séquences d'actions préventive et corrective destinées à garantir la pérennité des outils de production. Elle est aussi chargée d'appliquer des actions prioritaires et prédéfinies sur le système commandé afin d'assurer la sécurité de l'installation et du personnel.

**Maintenance** Elle regroupe toutes les activités permettant d'assurer la durabilité des outils de production, selon les conditions données de *sûreté de fonctionnement*. Il s'agit donc de "*l'ensemble des aptitudes nécessaires à un équipement à être disponible aux différents moments de son cycle de vie, en offrant les performances requises, à savoir : la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité (sécurité des équipements, du personnel et de l'environnement)*" [Francastel, 2001]. Ainsi, les opérations de maintenance sont élaborées afin de garantir les performances requises de l'outil de production, en respectant les consignes de sûreté de fonctionnement tout en minimisant les coûts de maintenance engendrés.

### 2.2.3 La maintenance et le coût de possession d'un équipement

D'une manière globale, le coût d'un *produit fabriqué* comprend tous les postes de dépenses nécessaires pendant son cycle de vie. On peut citer :

- les coûts de recherche et de développement du produit,
- les coûts de conception et de fabrication / production,
- les coûts d'exploitation,
- les coûts de **maintenance des équipements de production**,
- les coûts de mise au rebut et de déclassement.

Le coût de possession d'un *équipement de production*, représenté sous forme d'un iceberg (figure 2.2), est composé de deux parties [Francastel, 2001] :

- la partie visible de l'iceberg correspond aux coûts visibles que supporte l'industriel quand il acquiert l'équipement ;
- la partie immergée de l'iceberg représente les coûts directs et indirects de maintenance

qu'il aura à gérer pendant la période où il exploitera son équipement.

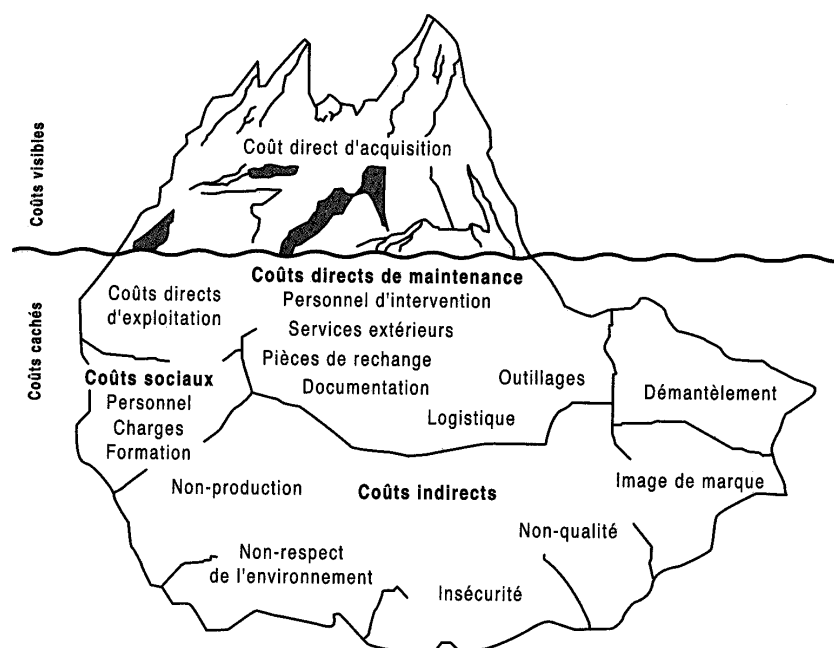


FIG. 2.2 – Différents coûts de maintenance dans le coût de possession d'un équipement

### 2.2.3.1 Coûts d'acquisition

Les coûts d'acquisition représentent les dépenses lors de l'achat de l'équipement de production.

### 2.2.3.2 Coûts de maintenance

Ce sont tous les coûts nécessaires pour réaliser les activités de maintenance. On distingue :

- *les coûts directs* : c'est-à-dire ce que coûtent les moyens mis en œuvre : personnel, matériels, pièces de rechange, services extérieurs, sans oublier les frais généraux qui viennent les affecter (frais de structures, frais d'approches, etc) ;
- *les coûts indirects* : c'est-à-dire ce que coûtent les carences de la maintenance (moyen ou organisation) en termes de pertes de production. Notons toutefois que l'évaluation de certains coûts est délicate et complexe tels que la perte de l'image de marque, le non-respect de l'environnement, ...

Pour rentabiliser au mieux l'équipement, il est judicieux de déterminer la ou les stratégies de maintenance adéquate(s) à appliquer sur chaque équipement. Pour faciliter la compréhension des stratégies existantes, nous allons définir très succinctement les

différentes politiques de maintenance et les notions de fiabilité, de maintenabilité et de disponibilité.

## 2.3 Politiques de maintenance

Par définition, la maintenance vise “ *toutes les activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d’activités techniques, administratives et de management*” ([AFNOR, 1988]). Au sein du service de maintenance, on distingue globalement deux politiques de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. Toutefois, quand une tâche de maintenance préventive est réalisée sur un équipement suite à la défaillance d’un autre équipement, on parle de maintenance mixte ou opportuniste. La définition de chacune de ces politiques est donnée ci-dessous.

### 2.3.1 Maintenance corrective

Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l’apparition d’une défaillance sur un équipement donné. Ces opérations comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification et le contrôle du bon fonctionnement. Il est à souligner que les activités de maintenance corrective sont subies et découlent directement des conséquences de l’apparition d’une défaillance. Ces activités englobent deux types d’interventions :

- Les interventions *palliatives* qui remettent l’équipement en état de fonctionnement provisoirement. Cette maintenance palliative est principalement constituée d’actions à caractère temporaire qui devront être suivies d’actions curatives.
- Les interventions dites *curatives*, qui réparent l’équipement d’une manière définitive. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou des remplacements ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s).

### 2.3.2 Maintenance préventive

Cette maintenance a pour objet d’éviter la dégradation de l’équipement et par conséquent réduire la probabilité d’occurrence d’une défaillance. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d’un nombre prédéterminé de pièces usinées (*maintenance systématique*) ou à partir de critères prédéterminés significatifs



de l'état de dégradation de l'équipement (*maintenance conditionnelle*). On trouve aussi une maintenance dite de *ronde* qui se caractérise par une surveillance régulière de l'équipement sous forme de visite à fréquence élevée, entraînant si nécessaire des travaux mineurs d'entretien. Sommairement, on distingue :

- Maintenance *systématique* : correspond à l'ensemble des actions destinées à restaurer, totalement ou partiellement, la marge de résistance des matériels non défaillants. Elle comprend le remplacement systématique de certains composants critiques en limite d'expiration de leur durée de vie, le remplacement de composants peu coûteux pour éviter les dépenses d'évaluation de leur état et l'essentiel des opérations de service (remplacement des filtres, du fluide, ...). Remarquons que ce type de maintenance est appliqué sur des composants dont on connaît de façon précise la durée de vie moyenne ou lorsque des contraintes réglementaires (souvent liées à la sécurité) sont obligatoires.
- Maintenance *conditionnelle* : elle est effectuée sur la base de critères d'acceptation préétablis, suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs. Elle admet toutefois que l'équipement puisse continuer à fonctionner en dépit de l'occurrence de défaillances progressives, tant que celles-ci n'ont pas atteint les limites spécifiées. En revanche, ce type de maintenance requiert des tâches additionnelles pour évaluer le niveau de dégradation de l'équipement et entamer ensuite les interventions nécessaires.
- Maintenance *prédictive* : ce type de maintenance est subordonné à l'analyse de l'évolution surveillée de la dégradation de l'équipement (par exemple auto-diagnostic, information d'un capteur). Elle permet ainsi d'optimiser - en retardant ou en avançant - la planification des interventions.

### 2.3.3 Maintenance mixte

La maintenance mixte consiste à profiter de l'opportunité offerte par l'arrêt d'un système pour effectuer parallèlement d'autres interventions, prévues ou non, sur d'autres éléments. Le système considéré peut être :

- *une machine* : lors de la défaillance d'un équipement, on profite de l'arrêt de la machine pour effectuer des interventions sur d'autres équipements de la même machine ;
- *une ligne de production* : lors de l'arrêt de la machine, des interventions sont réalisées sur une ou plusieurs machines de la même ligne et dont l'arrêt ne pénalisera pas le fonctionnement de l'unité de production.

La figure 2.3 résume les différents concepts de maintenance qu'on trouve dans la littérature, en indiquant les événements initiateurs.

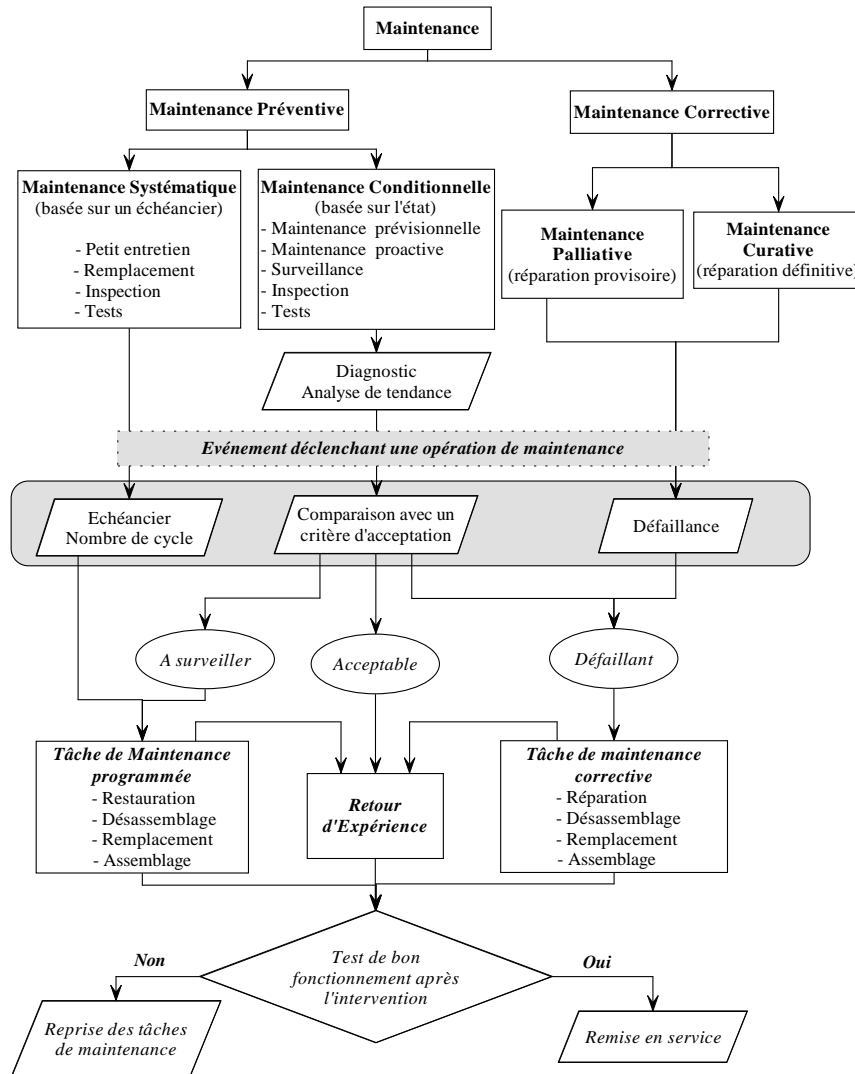


FIG. 2.3 – Diagramme des différents concepts de maintenance

## 2.4 Orientations des politiques de maintenance

Les décisions de la fonction maintenance reposent sur trois notions, qui définissent trois grandes orientations des politiques de maintenance [Charles, 2000]. Les trois notions sont :

- coût,
- disponibilité,
- fiabilité et maintenabilité.

Compte tenu de leurs objectifs, il est à noter que ces orientations des politiques ne sont pas contradictoires dans leur principe, mais peuvent le devenir dans leur application. Nous introduisons dans ce qui suit quelques caractéristiques des stratégies existantes.

### 2.4.1 Stratégie de type Life Cycle Cost (LCC)

La stratégie du Life Cycle Cost est basée sur la détermination du **coût de maintenance** d'un équipement sur la durée de son cycle de vie. La grandeur *Life Cycle Cost* désigne la somme des coûts d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation et des coûts de maintenance, sur la durée de vie de l'équipement. Cette démarche permet l'optimisation du coût global d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. Ce concept est principalement utilisé dans une démarche décisionnelle pour choisir une politique de maintenance à appliquer et l'âge adéquat de remplacement de l'équipement. Cependant, la difficulté majeure de cette approche est l'estimation des différents coûts intervenant durant le cycle de vie d'un équipement.

### 2.4.2 Stratégie de type Total Productive Maintenance (TPM)

La stratégie Total Productive Maintenance a été initiée au Japon dans les années 1970 et s'inscrit dans une stratégie du zéro défaut, zéro délai, zéro stock et zéro panne. Elle met l'accent sur l'organisation des ressources productives pour améliorer la **disponibilité** des équipements qui, par définition est "*l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou durant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs est assurée*" [Monchy, 2000]. Sommairement, la TPM a pour objectifs :

- d'améliorer l'efficacité du service maintenance (maintenance préventive, systématique ou conditionnelle, la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur - GMAO -),
- de mettre en place l'auto-maintenance,
- de suivre quantitativement la productivité des équipements en améliorant le Taux de Rendement Synthétique (TRS),
- d'améliorer la productivité globale des équipements sur tout le cycle de vie.

Ces concepts mettent ainsi l'accent non seulement sur le produit mais aussi sur l'outil de production et notamment sur sa disponibilité opérationnelle.

### 2.4.3 Stratégie de type Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)

La stratégie de type MBF s'établit sur l'amélioration de la **fiabilité** et la **maintenabilité**. Par définition, la fiabilité est "*l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné*". La maintenabilité, quant à elle, est "*l'aptitude d'un bien, dans des conditions données d'utilisation, à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits*". Cette approche, initiée à la fin des années 1970 dans le domaine du transport aérien, cherchait à développer des programmes d'entretien préventifs techniquement consolidés. Sa caractéristique est son orientation sur la compréhension des fonctions de chaque pièce d'un équipement et de l'impact de la défaillance sur ces fonctions. Le noyau de cette approche est basé sur une analyse de type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) [Richet et al., 1996], où une phase de collecte et documentation de données sur le matériel est nécessaire pour identifier et décomposer l'équipement en systèmes fonctionnels. L'objectif est de déterminer le remplacement préventif à mettre en œuvre en fonction des priorités, des facteurs économiques et impératifs de sécurité.

De ce fait, la MBF est une démarche rationnelle et structurée qui exige une vision globale, donc systémique de l'entreprise, pour inclure tous les facteurs contribuant de façon significative à des gains de productivité par réduction des coûts de maintenance. Cette vision globale du coût de possession d'un équipement et de ses liens avec la maintenance basée sur la fiabilité fait appel à des disciplines aussi variées que l'analyse de la valeur, l'analyse fonctionnelle, les méthodes de conception intégrant la maintenabilité, les méthodes de la qualité, la sûreté de fonctionnement, les aspects économiques et financiers ainsi que du Soutien Logistique Intégré (SLI) [Zwingelstein, 1996]. L'expérience de l'aéronautique en est un exemple. La figure 2.4 représente l'application du SLI à des systèmes d'armes (avions, porte-avions) avec les flux d'information et de maintenance associés. Dans le cas général, on distingue trois types de bases de maintenance où l'on réalise les tâches de maintenance et de soutien [Zwingelstein, 1996]. Les activités de maintenance réalisées sur chacun des trois sites sont comme suit :

**Base locale** - Située près du lieu des opérations des systèmes, la base locale possède un personnel de qualification relativement moyenne, un environnement opérationnel et des systèmes de tests. Des tâches de maintenance corrective et préventive sur les

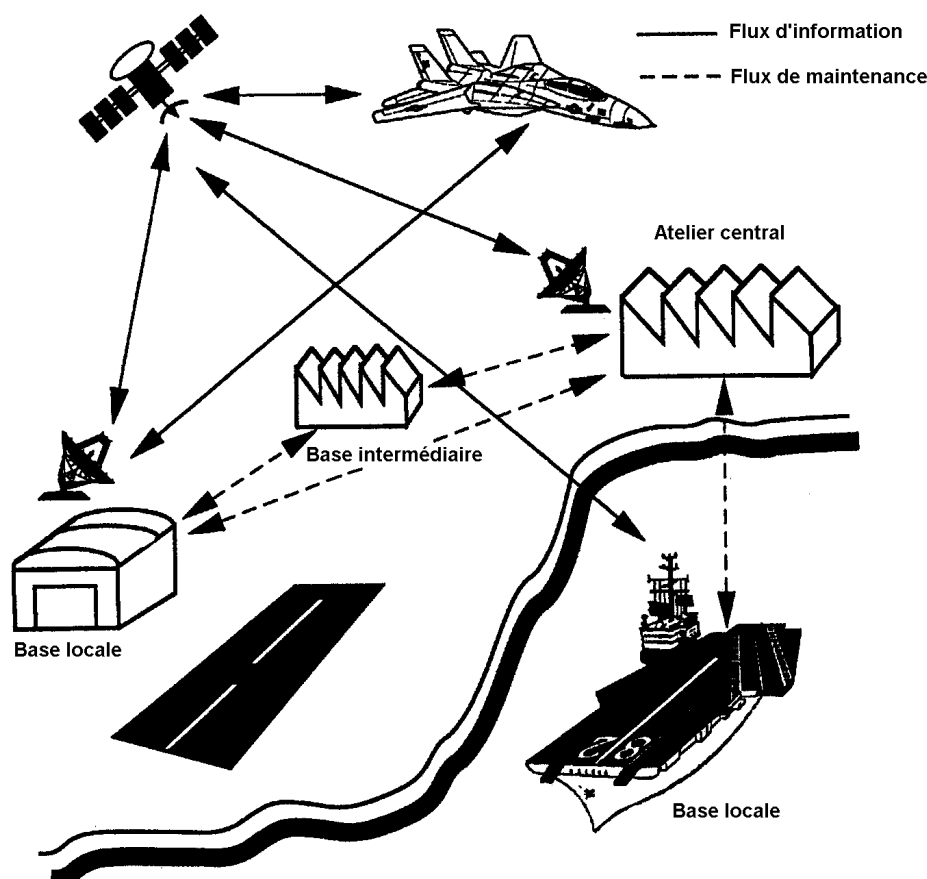


FIG. 2.4 – Organisation du Soutien Logistique Intégré pour un système d'armes

matériels sont effectuées sur cette base ainsi que la fourniture de pièces détachées critiques.

**Base intermédiaire** - Cette base est équipée de moyens plus importants que la base locale tels que des ateliers standards. Des tâches de maintenance corrective et préventive, cette fois-ci au niveau des sous-systèmes, sont effectuées sur cette base ainsi que la fourniture de pièces détachées.

**Atelier central** - Cet atelier appartient souvent au constructeur et est équipé d'installations fixes et de taille importante, des équipements de tests d'usine et d'un personnel qualifié. Dans cet atelier, on effectue :

- des tâches de maintenance corrective et préventive détaillées,
- les révisions et les visites,
- la calibration des instruments,
- la fabrication de pièces,
- les opérations de test et de soutien,
- la fourniture du système de soutien pour les autres bases.

L'avantage de regrouper toutes les ressources de maintenance dans un seul atelier central permet d'économiser considérablement lors de l'investissement dans les ressources, contrairement au cas où les autres bases (locale et intermédiaire) posséderaient les mêmes types de ressources. Remarquons que dans cette stratégie de maintenance, les équipements considérés sont des avions, qui sont des produits de service, entretenus individuellement les uns des autres et dont le déplacement d'une base à une autre ne pose aucune difficulté.

Dans notre thématique de recherche, on propose d'adapter cette notion d'atelier de maintenance à des systèmes de production manufacturiers. Seulement, les équipements à maintenir sont des machines de production forcément reliées entre elles et dont le déplacement n'est pas toujours aussi simple que dans le cas des avions. On s'intéresse alors au cas où les machines sont complexes et composées d'équipements qui sont, eux par contre, réparables et déplaçables vers l'atelier de maintenance central.

## 2.5 Choix d'internalisation-externalisation de la maintenance

La décision d'internaliser ou d'externaliser la maintenance est une initiative assez complexe dans la mesure où elle ne peut être évaluée à la légère. Actuellement, de plus en plus d'entreprises décident d'externaliser des activités en général, mais l'explication la plus souvent donnée pour justifier une décision de sous-traitance est : *“Nous gardons les compétences fondamentales en interne et nous externalisons les activités non fondamentales”*. Mais qu'est-ce qu'une activité *fondamentale* ou *non-fondamentale*? C'est une question qui suscite des discussions très subjectives : *“la distinction entre compétence fondamentale et compétence non fondamentale est une simplification excessive de la réalité de l'entreprise et risque de déboucher sur des décisions regrettables”* [Heikkilä, 2003].

Si on revient aux activités de maintenance, elles sont considérées comme des *compétences de protection* [Heikkilä, 2003], autrement dit ce sont des activités qui peuvent mettre en cause la réussite de l'ensemble de l'entreprise si elles ne sont pas gérées de manière adéquate. Dans les secteurs à risque continu, nous avons vu que l'intégration du service de maintenance ne relevait pas d'un choix mais d'une nécessité. Dans le domaine manufacturier, deux choix se présentent. Le premier choix est de sous-traiter toutes les activités

de maintenance. Néanmoins, la décision de l'externalisation de la maintenance dans ce cas est avantageuse s'il est possible de garantir la pérennité du service sous-traitant et avec un niveau de risque minimal, ce qui est rarement le cas. En effet, en sous-traitant la maintenance et du fait de l'évolution constante des technologies, l'entreprise perdra alors des champs de compétences et de savoirs. Elle manquera alors de recul et de visibilité, pour évaluer la valeur des interventions de maintenance réalisées et deviendra incapable de juger la qualité des interventions, et surtout la pertinence des coûts facturés. Le deuxième choix correspond à l'intégration d'un service de maintenance dans le système de production. Dans ce cas, munir chaque unité de production d'un service de maintenance devient vite très coûteux lors de l'investissement dans les ressources. Par ailleurs, la gestion des différents services serait plutôt décentralisée, et par conséquent le système de maintenance serait forcément différent d'un service à un autre.

Si, par contre, l'entreprise possède plusieurs unités de production et est à la recherche d'un système de maintenance qui soit le plus *flexible* possible en suivant la *dynamique* des différentes unités de production, il est plutôt intéressant de mettre en œuvre une maintenance centralisée. Ainsi, la gestion de l'entreprise, via un atelier de maintenance central, serait **homogène, cohérente et continue**, ce qui permet d'assurer la durabilité de la productivité tout en ayant la possibilité de gérer au mieux les coûts induits en maintenance.

## 2.6 Vers une maintenance centralisée dans les systèmes de production

### 2.6.1 Approche systémique de la maintenance centralisée

On propose une approche systémique de la maintenance centralisée inspirée de l'approche d'une maintenance intégrée [Monchy, 2000]. Cette approche est organisée principalement autour de trois profils ou services : Méthodes, Planification et Réalisation.

**Service Méthodes** - Dans un souci constant d'améliorer les modalités d'intervention, le service Méthodes définit les cahiers des charges et les règles d'actions liées aux spécifications techniques, aux délais, aux coûts et à l'approvisionnement. Ce service veille au bon déroulement du système de maintenance en respectant les consignes de sûreté de fonctionnement tout en identifiant et optimisant les coûts des activités de maintenance.

**Service Décision** - Le rôle de ce service s'oriente d'avantage vers la recherche et la mise en œuvre de solutions techniques visant à remédier aux défaillances et à améliorer le rendement des différentes installations de production. Il a ainsi la charge d'organiser, planifier et coordonner les interventions sur chaque équipement selon la disponibilité des ressources de maintenance requises et suivant des priorités de production. Il doit aussi s'assurer de l'exécution de ces interventions dans le respect des règles de sécurité, des délais impartis et des procédures existantes.

**Service Réalisation** - Ce service regroupe toutes les ressources de maintenance (techniciens ou agents de maintenance de compétences diverses, postes d'intervention, magasin de pièces de rechange). Le rôle des techniciens est centré sur la réalisation des différentes opérations de maintenance qui leur sont assignées selon les gammes opératoires prédéfinies. Tout le matériel est concentré dans un *atelier central* pour effectuer des tâches de maintenance corrective et éventuellement des opérations préventives, puisque ces dernières sont souvent effectuées sur les sites de production par des équipes polyvalentes (par exemple nettoyage, réglage, changement de pièces, ...). Sur le plan technique, la progression de la technologie des machines qui deviennent de plus en plus complexes exige des postes de maintenance assez performants et par conséquent assez coûteux ! D'où l'intérêt de les concentrer dans un seul endroit pour permettre ainsi de réaliser toutes les opérations nécessaires. Le problème du partage des ressources est à la charge du service Décision qui, rappelons-le, s'occupe de la planification et de l'ordonnancement des activités de maintenance en tenant compte de la disponibilité des ressources requises (techniciens, postes de réparation, pièces de rechange).

## 2.6.2 Niveaux de maintenance considérés

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des tâches en nature, en spécificité et en durée. D'où l'utilité de répartir ces tâches en cinq niveaux de familles, suivant la norme *AFNORX60 – 015*. La tendance actuelle de cette organisation, dans une logique TPM, est de se ramener à trois niveaux seulement, comme illustré dans le tableau 2.1 [Monchy, 2000].

La nouvelle organisation des activités de maintenance est comme suit :

**Niveau I** : correspond à une maintenance de première ligne qui est transférée progressivement aux opérateurs de production, assistés si nécessaire par les techniciens de



<i>Niveau (TPM)</i>	<i>Niveau (AFNOR)</i>	<i>Types de travaux</i>	<i>Personnel concerné</i>	<i>Moyens</i>
Niveau I	1	Réglage simple d'équipements accessibles sans démontage. Échange d'éléments.	Opérateur système sur place.	Outillage léger défini dans la notice d'utilisation.
	2	Réparation ou dépannage par échange standard. Opérations simples de prévention.	Technicien habilité sur place.	Outillage standard et pièces de rechange situés à proximité.
Niveau II	3	Identification des origines de pannes. Échange de composants fonctionnels.	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance.	Outillage et appareils de mesure.
	4	Travaux importants de maintenance préventive et corrective. Révision.	Équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central.	Outillage général et spécialisé.
Niveau III	5	Travaux de rénovation, de reconstruction et de réparations importantes, confiés aux sous-traitants.	Équipe polyvalente complète, en atelier central.	Moyens importants proches de ceux du constructeur.

TAB. 2.1 – Niveaux de maintenance existants

maintenance ;

**Niveau II** : représente le domaine d'action des équipes polyvalentes de techniciens de maintenance. Les tâches englobent aussi bien les opérations correctives que préventives (diagnostic, dépannage, réparation, remplacement, test, révision, mise en œuvre d'améliorations, etc.) ;

**Niveau III** : dédié aux travaux spécialisés (rénovation, reconstruction, ...) souvent externalisés pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire défini au niveau II.

Dans le cas de la mise en œuvre d'une maintenance centralisée dans le système de production, nous prendrons en compte le niveau II de la nouvelle organisation dans la logique TPM. Ces activités sont réalisées dans l'atelier central de maintenance.

### 2.6.3 Méthodologie de la maintenance centralisée

Une maintenance centralisée permet d'assurer la cohérence de l'ensemble des activités diversifiées, éparpillées entre les sites de production et l'atelier central, et opérées par des techniciens de qualifications différentes. Cette centralisation est assurée par le bureau des méthodes, centre vital du service, mais aussi par l'existence d'un atelier central de maintenance regroupant des installations fixes et de taille importante, de moyens de test, d'un personnel qualifié et d'un stock de pièces de rechange (figure 2.5). La maintenance

centralisée proposée permet ainsi :

- l’optimisation des ressources de maintenance nécessaires,
- le suivi lors de la réalisation des activités par une assistance technique d’une manière homogène,
- le retour d’expérience par un suivi continu de l’état des équipements et de leur défaillance, et donc une meilleure maîtrise des temps opératifs et des coûts engendrés,
- une standardisation des procédures et des flux de communication interne,
- une meilleure gestion du personnel et du magasin de stock de pièces de rechange.

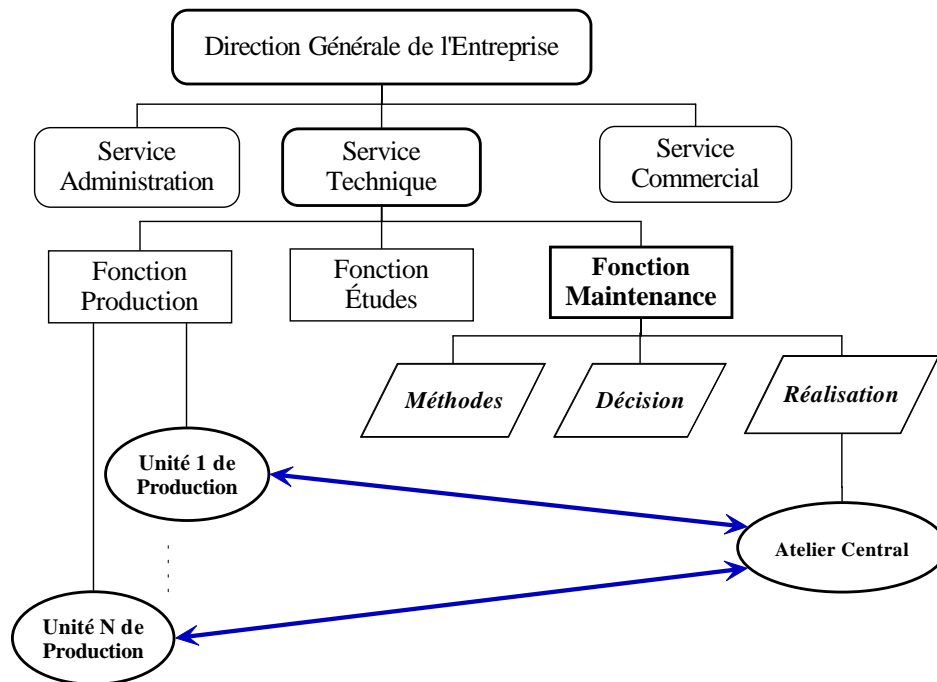


FIG. 2.5 – Organigramme fonctionnel d’une entreprise avec une maintenance centralisée

En revanche, des équipes polyvalentes peuvent être formées pour effectuer des tâches de maintenance sur les unités de production. Ce qui permet une réduction des temps d’intervention. Ces équipes sont composées de techniciens (électronicien, automaticien, hydraulicien, ...), adaptés aux activités à réaliser. Il est clair que la structure empirique *service électrique* et *service mécanique* est incompatible avec des interventions rapides sur des machines à technologies multiples. En effet, les services *entretien* classiques se caractérisent par un taux de rendement faible où de nombreux ouvriers spécialisés sont organisés en ateliers corporatifs (mécaniciens, électriciens, chaudronniers ...). Ce corporatisme originel a fait preuve de son inadaptation face à l’intégration technologique des

systèmes actuels, et surtout face aux logiques de commande et à l'omniprésence de l'informatique. Ces systèmes demandent une plus grande réactivité et plus de polyvalence de la part des équipes. D'où l'utilité de regrouper ces techniciens polyvalents, ainsi que tous les postes lourds de maintenance nécessaires dans un atelier de maintenance afin de répondre au mieux aux attentes des diverses unités de production. En ce qui concerne le magasin de maintenance, comprenant les stocks de consommation et des pièces de rechange, la gestion de l'approvisionnement est assurée par le service Décision.

### 2.6.4 Fonctions de l'atelier de maintenance

Les fonctions de l'atelier de maintenance sont réparties en trois services avec la classification schématique illustrée par la figure 2.6 [Monchy, 2000]. Ces fonctions interagissent entre elles pour assurer une gestion des activités production/maintenance permanente et surtout pour améliorer le rendement de ces activités.

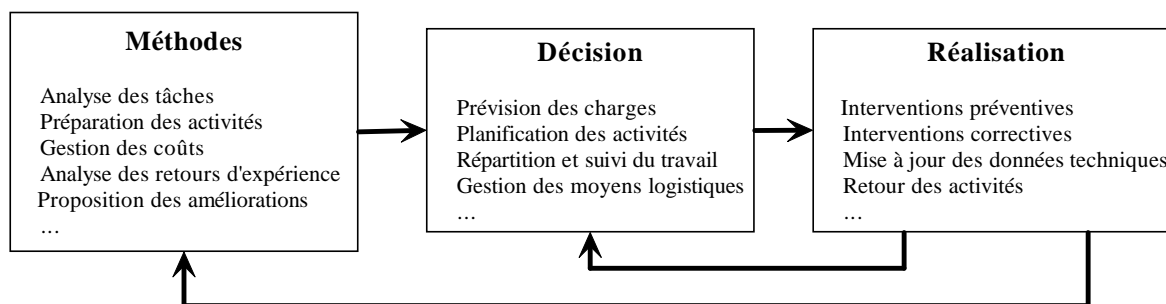


FIG. 2.6 – Fonctions de l'atelier de maintenance

#### 2.6.4.1 Service Méthodes de maintenance

Face aux divers aléas qui peuvent survenir dans les sites de production, le responsable du service Méthodes de maintenance se doit d'acquérir la maîtrise des événements liés à ce genre de perturbations. Il est contraint d'élaborer un plan d'activités qui soit le plus réactif, contrairement au responsable de méthodes de production qui, quant à lui, élabore un plan de tâches souvent répétitif. Parmi les responsabilités de ce service, on cite :

- Choix des politiques de maintenance à mettre en œuvre selon les objectifs de production ;

- Gestion de la documentation technique, des plans de maintenance et des fiches d’analyse des défaillances ;
- Suivi des indicateurs de performance et de l’analyse des tendances, et la détermination des priorités d’action. Le responsable de ce service est donc amené à analyser les interventions à travers des paramètres tels que la nature et la durée de l’intervention, le temps d’arrêt, les coûts directs et indirects engendrés, consommation des pièces de rechange, etc. ;
- Proposition des améliorations en déterminant des cibles pour agir sur les causes des pertes de production. D’où la préconisation d’améliorations aussi bien techniques qu’organisationnelles ;
- Participation aux études et travaux neufs, dans le cas par exemple de restructuration des machines de production par d’autres dont la maintenance est intégrée dès la conception.

#### **2.6.4.2 Service Décision et Ordonnancement**

Comme le service de maintenance est caractérisé par une variété de tâches en nature, en durée et en priorité, il est judicieux d’établir un ordonnancement dans le déroulement des tâches de maintenance en précisant les types de ressources nécessaires pour leur réalisation. Pour cela, la fonction *Décision et Ordonnancement* est chargée de définir les tâches à effectuer par le service *Réalisation* et des moyens à mettre en œuvre. Cette fonction a pour mission :

- de prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches ;
- d’optimiser les moyens nécessaires en fonction des délais de fin de tâches ;
- de prévoir les dates d’approvisionnement du stock des pièces de rechange ;
- de lancer les travaux à la date choisie en rendant tous les moyens nécessaires disponibles ;
- de contrôler l’avancement et la fin des travaux ;
- de gérer les projets de prévision, d’optimisation logistique, d’avancement et de respect des délais ;
- d’analyser les écarts entre le planning des prévisions et leur réalisation afin d’élaborer des améliorations futures.

#### **2.6.4.3 Service Réalisation**

Dans ce service sont regroupés tous les appareils et postes de taille importante pour réaliser les différentes phases de maintenance en général, particulièrement dans le cas d’une maintenance corrective (test et diagnostic, désassemblage, assemblage, calibration, etc.), un personnel qualifié de compétences variées ainsi que des fournitures de pièces

de rechange. A partir de la réalisation des tâches assignées, un retour d'activités est effectué pour que les services *Méthodes* et *Décision/Ordonnancement* puissent établir des améliorations dans la réalisation des interventions.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le rôle de la maintenance dans le management d'une entreprise. Les différentes politiques ainsi que les stratégies de maintenance existantes ont été détaillées. Rappelons que notre thématique de recherche est d'adapter la notion de maintenance centralisé existant dans les secteurs à risque continu au cas de systèmes manufacturiers et de l'appliquer pour la conception d'un atelier de maintenance central. Les différents services constituant cet atelier ainsi que la méthodologie de la maintenance ont été détaillés dans ce chapitre.

Nous abordons dans le chapitre qui suit la méthodologie de conception de l'atelier de maintenance.

# Chapitre 3

## Conception d'un atelier de maintenance

*Concevoir un atelier de maintenance revient à déterminer, dans une première phase, les types de postes d'intervention et les compétences des techniciens nécessaires au cycle de réparation des machines de production et, dans une seconde phase, à organiser les ressources (en postes, techniciens et en pièces de rechange) en tenant compte des différentes politiques de maintenance. Dans ce chapitre, nous abordons ces deux phases de conception de l'AdM. L'organisation structurelle de l'AdM en postes et en techniciens nécessite l'étude du système de production pour sélectionner les machines les plus critiques. Deux méthodes de classement des machines par ordre de priorité à la maintenance sont alors élaborées. Ainsi, pour l'ensemble des équipements sélectionnés, on propose un cycle de réparation déterminant l'organisation structurelle de l'AdM dans le cas d'une maintenance corrective seule. L'organisation de l'ensemble des ressources avec les deux politiques de maintenance est ensuite établie. L'évaluation des performances de l'AdM en vue de dimensionner l'ensemble des ressources fera l'objet des chapitres suivants.*



## 3.1 Introduction

Nous avons élaboré dans le chapitre 2 l'approche d'une maintenance centralisée dans les systèmes manufacturiers. Nous avons évoqué l'intérêt de concevoir un atelier de maintenance dans une entreprise possédant plusieurs unités de production. Seulement, les ressources du système de maintenance doivent être en parfaite concordance avec les machines les plus critiques du système de production. De plus, en raison des diverses technologies que possèdent ces installations et par leurs fonctionnalités multiples, les ressources sont à déterminer, qualitativement en tenant compte des contraintes techniques des différentes machines selon leur criticité, et quantitativement en fonction des objectifs visés du système de production. Dans ce chapitre, nous détaillons la méthodologie de conception d'un atelier de maintenance, structurée en deux phases. Dans la première phase, on détermine le cycle de réparation des équipements des machines les plus critiques vu que, d'une part, le budget d'investissement dans les ressources de l'AdM est limité, et d'autre part, certaines pannes sont assez rares et/ou ont des durées d'intervention assez faibles. Pour cela, un classement des machines par ordre de priorité à la maintenance et selon un ensemble de critères est établi. Deux méthodes de classement des machines sont alors présentées. Pour l'ensemble des équipements sélectionnés, on propose dans la première phase un cycle de réparation basé sur l'étude structurelle du SdP. Dans la seconde phase, l'organisation des ressources nécessaires (techniciens, postes d'intervention, outillages et pièces de rechange) est établie pour effectuer les différentes activités de maintenance.

## 3.2 Intérêt d'un atelier de maintenance centralisé

Nous définissons un atelier de maintenance comme étant un ensemble de ressources (techniciens, postes d'intervention, outillage, pièces de rechange) destiné à garantir la pérennité des machines de production. Son rôle est de détecter l'origine des défaillances sur une machine défectueuse et de rétablir son fonctionnement (maintenance corrective). Afin de réduire la probabilité d'occurrence des défaillances et augmenter le cycle de vie de ces machines, des interventions régulières sont programmées (maintenance préventive systématique). La mission de l'AdM est alors de prévenir et empêcher l'interruption des opérations de production et maintenir la machine dans un état telle qu'elle puisse opérer le plus longtemps possible avec des coûts d'intervention les plus faibles.

Le fait de centraliser la maintenance en concevant un AdM permet d'assurer la productivité de l'entreprise qui possède plusieurs sites ou unités de production en minimisant le



nombre de ressources, et par conséquent garantir son profil global. Ce gain est obtenu en réalisant un compromis entre la disponibilité et l'efficacité des machines à améliorer, le coût global de possession des machines à réduire et les coûts des activités de maintenance à optimiser. Le tableau 3.1 montre, d'une manière non exhaustive, la comparaison des principaux coûts entre trois systèmes de production (SdPs) dont la maintenance est soit :

- sous-traitée,
- intégrée,
- centralisée.

Certains coûts sont en commun pour les trois types de systèmes de production (catégorie B), d'autres coûts sont spécifiques pour chacun des 3 cas (les catégories A et C).

		<i>Types de coût</i>	<i>Maintenance sous-traitée</i>	<i>Maintenance intégrée</i>	<i>Maintenance centralisée</i>
<b>Catégorie A</b>		Coût du contrat	+		
		Coût d'une maintenance corrective	+		
		Frais de transport	+		
<b>Catégorie B</b>		Arrêts de la production	+	+ ↘	+ ↘
		Coûts salariaux non bénéficiés	+	+ ↘	+ ↘
		Manque à gagner	+	+ ↘	+ ↘
		Pénalités de retard	+	+ ↘	+ ↘
		Dévalorisation des machines	+	+ ↘	+ ↘
		Atteinte de l'image de marque	+	+ ↘	+ ↘
<b>Catégorie C</b>	Site 1	Coûts des différents postes de maintenance		+ (à optimiser)	+ (à optimiser)
		Coûts des techniciens de maintenance		+ (à optimiser)	
		Coût des pièces de rechange et du stockage		+ (à optimiser)	
	...		...		
	Site N	Coûts des différents postes de maintenance		+ (à optimiser)	
		Coûts des techniciens de maintenance		+ (à optimiser)	
		Coût des pièces de rechange et du stockage		+ (à optimiser)	

+ : coût pris en compte

↘ : coût qui a tendance à baisser

TAB. 3.1 – Comparaison des coûts entre SdPs selon la stratégie de maintenance appliquée

La catégorie A représente les coûts de maintenance quand celle-ci est sous-traitée [Francastel, 2001]. On trouve principalement le coût du contrat avec le sous-traitant, le coût d'intervention pour une maintenance corrective et les frais de transport.

La catégorie B englobe les coûts communs entre les trois stratégies de maintenance appliquées. Le fait de considérer la maintenance en *interne* (intégrée ou centralisée)

dans le système de production permet de réduire les temps d'indisponibilité, dus particulièrement aux **temps d'attente pour une maintenance corrective**. Ce qui engendre une baisse des coûts de la catégorie B pour une maintenance en interne, avec un choix optimal des ressources de maintenance.

La catégorie C représente les coûts d'investissement dans les ressources de maintenance. Seulement, le fait de *centraliser* ces ressources dans un atelier de maintenance permet de réduire considérablement ces coûts d'investissement par un dimensionnement optimal (optimisation du nombre des postes de maintenance, des techniciens et du stock de pièces de rechange), contrairement au cas d'une maintenance *intégrée* où il faut associer pour chaque site de production ses propres ressources de maintenance.

Pour concevoir un atelier de maintenance, il faut déterminer au préalable l'organisation structurelle du service maintenance à partir du cycle de réparation de l'ensemble des équipements qui visiteront l'AdM.

### 3.3 Organisation structurelle du service maintenance

Comme l'atelier de maintenance est destiné à rétablir le fonctionnement des machines défectueuses et à réduire la probabilité d'occurrence de ces défaillances, il est nécessaire de détailler les différentes phases de réparation de tout équipement défectueux. Le processus de déroulement d'une maintenance corrective de tout équipement peut être schématisé, d'une manière globale, par la figure 3.1. On remarque que depuis la date effective  $t_0$  d'une défaillance jusqu'à la date de l'intervention  $t_5$ , la durée  $(t_5 - t_0)$  est consacrée à la détection, localisation, diagnostic et à la préparation pour l'intervention. Pour améliorer la productivité, c'est cette durée qu'il faudra minimiser par une gestion efficace des ressources de l'AdM et une analyse du retour d'expérience du programme de maintenance.

Dans le cas d'intégration d'un AdM, le cycle de réparation d'un équipement défaillant d'une manière générale, illustré par la figure 3.2, est effectué sur les différents postes d'intervention selon le type de défaillance et la probabilité d'occurrence de cette défaillance. Ces postes sont définis à partir de l'étude structurelle du SdP. Le processus de réparation est comme suit. Le service technique de l'AdM consulte la base des données techniques de l'équipement défectueux. Après une phase de *diagnostic* où la cause de défaillance est détectée, l'équipement est transmis vers l'un des postes dédié à une *tâche précise*, selon une certaine probabilité liée à l'occurrence de la défaillance et au fait que l'équipement soit réparé sur ce poste. Le passage d'un poste  $i$  vers un poste  $j$  s'effectue alors avec une

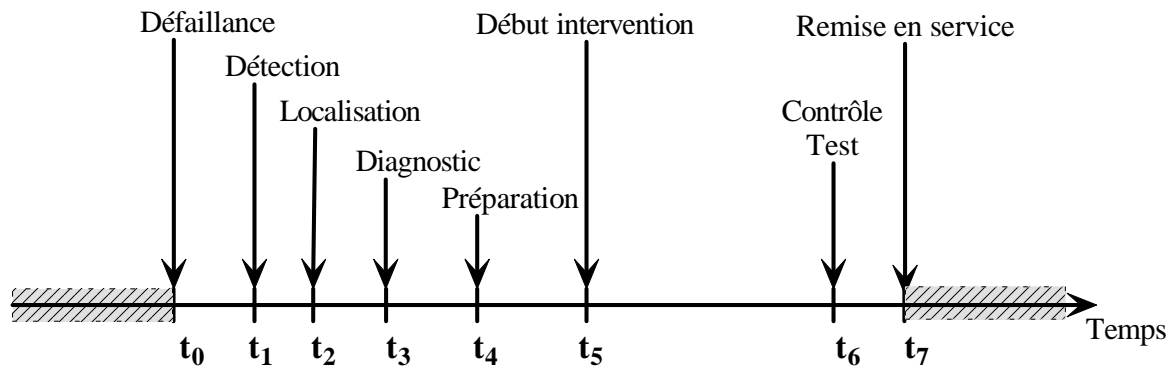


FIG. 3.1 – Processus de déroulement d’une maintenance corrective d’un équipement

probabilité de réparation  $p_{ij}$  sur le poste  $j$  ( $i, j = 1, \dots, N$ ,  $N$  étant le nombre de postes). Une fois la réparation terminée, une phase de *test* est nécessaire pour valider l’intervention.

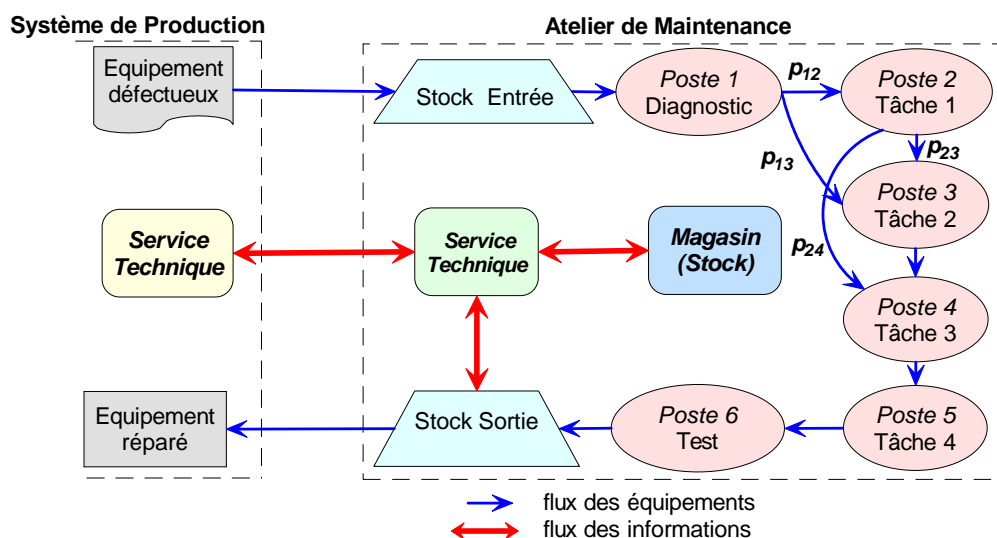


FIG. 3.2 – Cycle de réparation d’un équipement défectueux dans un AdM

L’atelier de maintenance permet ainsi d’améliorer les performances du système de production par la diminution des temps d’indisponibilité des machines défectueuses, dans le cas de la maintenance corrective. Les différentes phases du processus de réparation des équipements sont détaillées dans l’organigramme de la figure 3.3. Suite à une panne d’une machine constatée dans le système de production, l’équipement défectueux est transféré vers l’AdM. Après une phase de diagnostic, l’équipement est acheminé vers l’un des postes de réparation selon le type de défaillance. Enfin, le test permet de vérifier la remise en

état de marche de l'équipement. Si ce n'est pas le cas, il est mis au rebut et une commande est lancée. Notons toutefois que si l'équipement ne peut être déplacé, une équipe polyvalente de techniciens se déplace pour effectuer la maintenance corrective sur le site de production.

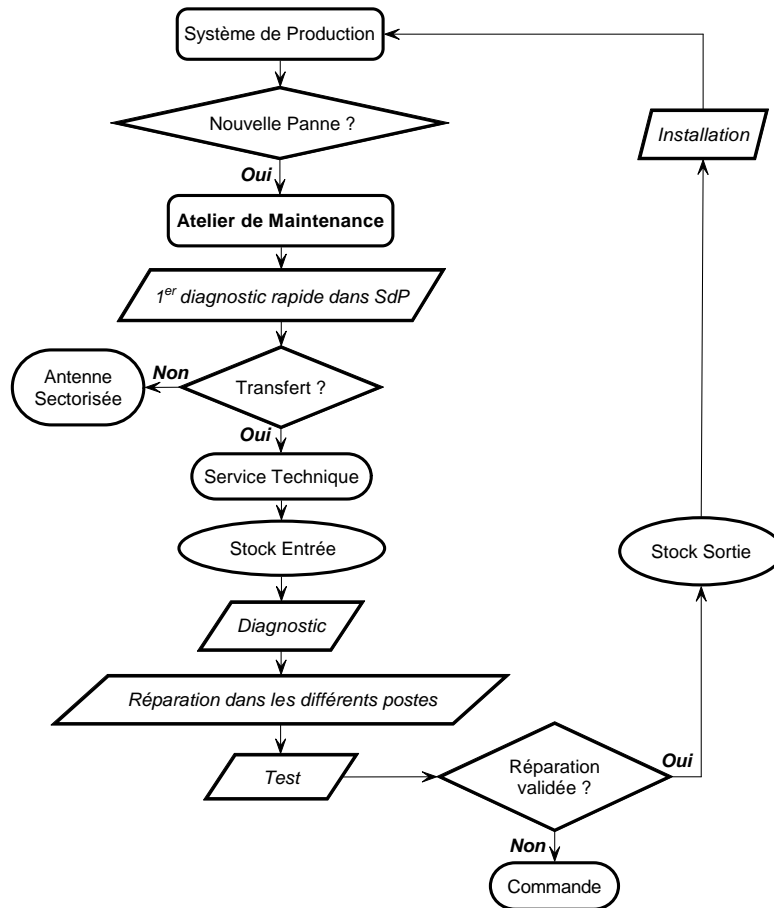


FIG. 3.3 – Cycle de réparation des équipements

Afin de déterminer les types de postes d'intervention, on établit une étude structurale du SdP pour classer les machines par ordre de priorité et déterminer les ressources de maintenance appropriées aux machines sélectionnées.

### 3.4 Étapes de conception d'un atelier de maintenance

Il est clair que le maintien de la productivité dépend, qualitativement et quantitativement, des outils de production utilisés mais aussi de l'efficacité de la maintenance de ces outils.

La maintenance est donc un champ d'action privilégié de la recherche d'amélioration des performances de l'entreprise. Cependant, les méthodes et techniques de maintenance ne possèdent pas un caractère unique et universel. En fonction du type des processus industriels à maintenir et de la nature des systèmes et sous-systèmes ou équipements, il faudra mettre en œuvre des méthodes spécifiques tenant compte des technologies déployées selon les cas :

- systèmes mécaniques dynamiques : moteurs, pompes, ...,
- systèmes numériques programmés,
- systèmes hydrauliques ou thermohydrauliques,
- systèmes électriques ou électroniques : capteurs, automates programmables.

Chacun de ces systèmes assure une ou plusieurs fonction(s) grâce à ses composants ou équipements. Ces fonctions sont hiérarchisées en termes d'importance, et avant d'appliquer une méthode de maintenance, il convient d'analyser ces systèmes et de s'interroger sur les aspects technico-économiques pour déterminer la politique de maintenance à appliquer. Pour cela, il est nécessaire d'identifier :

- les fonctions du système à maintenir en distinguant les missions principales et secondaires et leurs importances relatives,
- la structure du système en analysant ses modes de fonctionnement et les caractéristiques des équipements,
- l'inventaire des moyens de mesure et d'intervention.

Afin de déterminer qualitativement les ressources de l'AdM, l'analyse du système de production s'avère nécessaire. Notre démarche de conception d'un AdM est schématisée par la figure 3.4. Vu que le budget d'investissement dans les ressources de l'AdM est limité et que certaines pannes sont assez rares et/ou ont des durées d'intervention assez faibles, un classement des machines par ordre de priorité est alors réalisé selon un ensemble de critères qu'on détaillera par la suite. On ne retiendra par la suite que les équipements les plus critiques. Pour les équipements qui ont des pannes assez rares ou ceux qui ne peuvent pas être déplacés vers l'AdM, les interventions sont réalisées par les équipes d'antennes sectorisées.

Dans la démarche de conception d'un atelier de maintenance, nous distinguons trois phases principales :

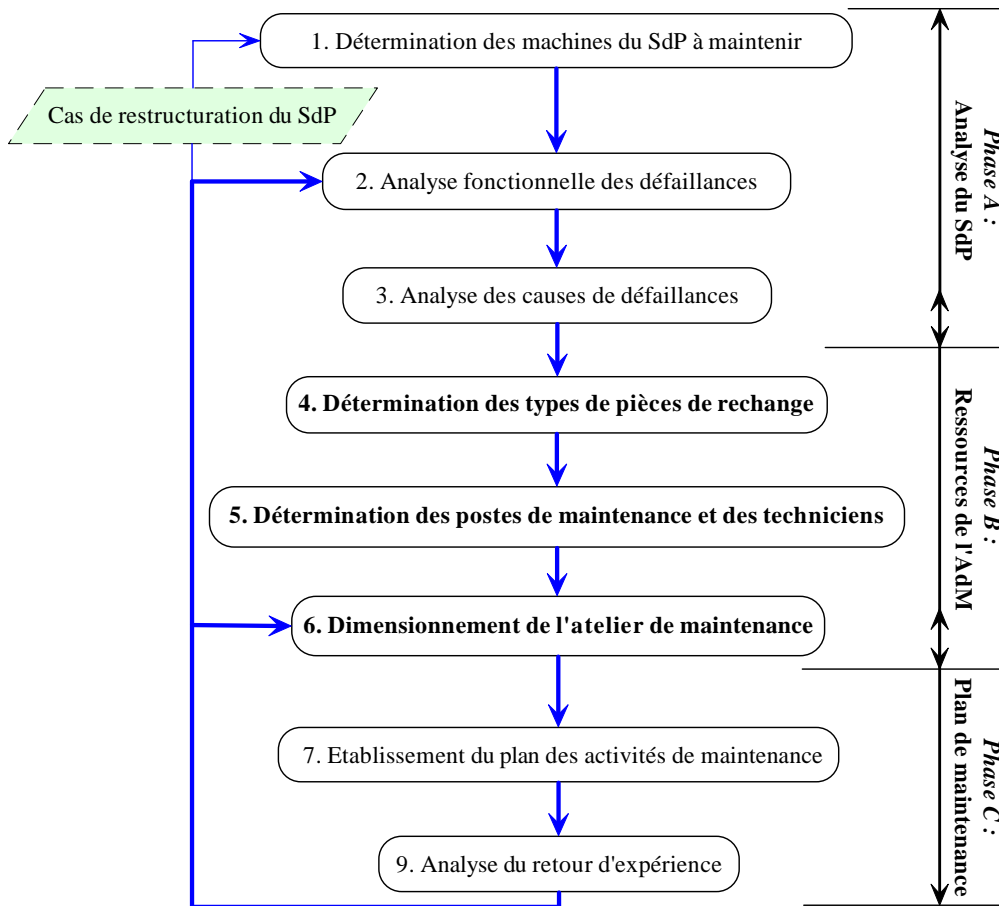


FIG. 3.4 – Étapes de conception d'un Atelier de Maintenance

**Phase A :** *Analyse du SdP*

Cette phase correspond à l'étude de l'ensemble des machines de production. Elle a pour but de déterminer quelles sont les machines à privilégier pour l'étude. Ensuite, les défaillances fonctionnelles des machines sélectionnées sont étudiées et reliées aux défaillances des différents équipements qui les composent. Ces défaillances sont analysées du point de vue mode de défaillance, de ses causes possibles et de ses effets sur les fonctions de l'équipement.

**Phase B :** *Détermination des ressources de l'AdM*

Dans cette phase, nous déterminons qualitativement les ressources que composent l'atelier de maintenance en termes de postes d'intervention, de techniciens et de pièces de rechange pour le remplacement. L'organisation structurelle de l'AdM est alors définie.

#### **Phase C : *Élaboration du plan de maintenance***

Dans cette phase, on définit pour chaque équipement le type d'action qu'il faut mettre en place. Ceci conduit à l'élaboration d'un planning initial des différentes tâches de maintenance. Un retour d'expérience au niveau de l'analyse des défaillances fonctionnelles permet d'améliorer le programme de maintenance au cours du temps.

Nous détaillons dans ce qui suit chaque étape de conception de l'AdM.

#### **3.4.1 Détermination des machines de production à maintenir**

Pour déterminer l'ensemble des machines de production qui visiteront l'atelier de maintenance, deux méthodes de classement des machines par ordre de priorité sont présentées dans ce chapitre. Si on veut réaliser un classement sommaire, avec une évaluation *qualitative* des critères de classement, on utilise une méthode basée sur les degrés de criticité des machines par rapport à la sûreté de fonctionnement, dite la Méthode Basée sur la Fiabilité (MBF). Si on veut affiner le classement des machines par une évaluation à la fois *qualitative* et *quantitative* des critères de classement et en associant des poids aux critères considérés, on utilise la méthode d'agrégation multicritère. Nous détaillons dans les paragraphes suivants le principe de ces deux méthodes accompagné d'un exemple illustratif.

##### **3.4.1.1 Classement avec la méthode MBF**

###### **• *Principe de la méthode MBF***

La classification et le contenu des activités de maintenance doivent être clairement définies pour identifier les compétences des différents intervenants amenés à réaliser la maintenance des équipements. Ces éléments d'informations sont indispensables pour constituer les équipes de maintenance avec toutes les qualifications nécessaires pour des interventions de qualité. Actuellement, la méthode Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) est appliquée dans les entreprises et destinée à établir un programme de maintenance préventive permettant d'atteindre efficacement les niveaux de fiabilité et de sécurité intrinsèques (définis à la conception) des matériels et des structures d'installations in-

dustrielles ou de gros équipements. Parmi ses objectifs, on peut citer [Zwingelstein, 1996] :

- concentrer les efforts de maintenance uniquement sur les matériels dont les conséquences des défaillances sont importantes pour les objectifs de l'entreprise (sûreté de fonctionnement, disponibilité, qualité, coût),
- disposer d'une méthode d'élaboration de tâches de maintenance rigoureuse et documentée,
- optimiser la disponibilité des matériels,
- obtenir les informations nécessaires pour améliorer la conception des éléments dont la fiabilité intrinsèque s'avère inadéquate,
- obtenir des informations permettant l'établissement d'un programme de maintenance évolutif plus performant que le programme initial, par une évaluation systématique et permanente de l'efficacité et des coûts des tâches de maintenance précédemment définies,
- atteindre ces objectifs pour un coût minimal, incluant les coûts directs relatifs à la maintenance ainsi que ceux induits par les défaillances résiduelles,
- structurer le retour d'expérience sur les modes de défaillance afin de déterminer la criticité des défaillances et améliorer le plan de maintenance.

Cette méthode s'appuie sur une démarche de type AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), et considère la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et la gravité des effets associés pour effectuer une classification suivant une matrice de criticité [Richet et al., 1996] pour hiérarchiser les systèmes par ordre de priorité.

#### • *Application de la méthode MBF*

Pour déterminer les machines qui nécessitent une maintenance en priorité, un groupe *pilote*, formé d'un chef de projet et des responsables de production, de maintenance et de qualité, réalise un découpage géographique de l'entreprise en sites ou unités de production  $U_i$ . Puis, il effectue un deuxième découpage fonctionnel en machines notées  $M_{ij}$ , pour identifier l'impact de la défaillance d'une machine selon le premier indice de criticité  $CR_1$  basé sur trois critères retenus, à savoir la sécurité  $S$  (estimation du risque d'incident), la disponibilité  $D$  de l'unité de production et la qualité  $Q$  du produit fabriqué.

La collecte des informations repose sur l'exploitation d'éventuels historiques existants, et

---



permet l'estimation de l'indice de criticité  $CR_1$  de chaque machine recensée. L'estimation mesure d'abord l'impact de la panne sur la sécurité  $S$ , puis une matrice de criticité permet de prendre en compte l'impact sur la disponibilité  $D$  et sur la qualité  $Q$ . Les valeurs des critères sont à adapter par le groupe *pilote* en fonction des objectifs de l'entreprise. Une liste initiale hiérarchisée des machines est ainsi établie.

• **Exemple illustratif**

Considérons un système manufacturier ayant deux unités de production, chacune d'elles est composée de 5 machines. Pour chacun des 3 critères retenus, on attribue un poids selon les cas correspondants (tableau 3.2-a). Ensuite, on associe pour chaque machine  $M_{ij}$  l'indice de criticité  $CR_1$  qui se détermine en multipliant entre eux les poids de chaque critère,  $CR_1 = S * D * Q$  (tableau 3.2-b). La liste initiale est alors établie selon l'ordre décroissant de  $CR_1$ . On ne retiendra par la suite que les machines qui ont au moins un impact sur l'un des critères  $S$ ,  $D$  et  $Q$ , autrement dit les machines ayant l'indice  $CR_1 > 1$ . Ainsi, le classement obtenu par ordre de priorité à la maintenance dans notre exemple est  $M_{14}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{24}$ ,  $M_{25}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{11}$  et  $M_{12}$ . Les autres machines seront maintenues par les équipes d'antennes sectorisées.

Sécurité $S$		Disponibilité $D$		Qualité $Q$		Unité 1					Unité 2				
							$S$	$D$	$Q$	$CR_1$		$S$	$D$	$Q$	$CR_1$
aucun risque	1	pas d'incidence	1	pas d'influence	1	$M_{11}$	1	2	2	4	$M_{21}$	1	1	1	1
risque rare	2	fonctionnement dégradé	2	qualité acceptable	2	$M_{12}$	1	1	2	2	$M_{22}$	1	2	3	6
risque d'incident	3	arrêt après un délai	3	qualité moins bonne	3	$M_{13}$	2	3	2	12	$M_{23}$	2	3	3	18
		arrêt total de l'unité	4	qualité médiocre	4	$M_{14}$	2	4	3	24	$M_{24}$	1	3	3	9
						$M_{15}$	1	1	1	1	$M_{25}$	1	4	2	8

-a-

-b-

TAB. 3.2 – Classement des machines selon l'indice de criticité  $CR_1$ 

La méthode MBF permet ainsi de déterminer les machines *critiques* par rapport aux objectifs fixés en évaluant **qualitativement** les principaux critères de la sûreté de fonctionnement, à savoir la sécurité, la disponibilité et la qualité. Or, le problème de classement des machines par ordre de priorité par rapport à la maintenance est de nature multicritère dont les critères n'ont pas le même poids et certains d'entre eux sont plutôt évalués **quantitativement**. Pour que le classement tienne compte de la diversité des critères et de leur nature, la méthode d'aide multicritère à la décision s'avère efficace afin de hiérarchiser finement les machines de production.

### 3.4.1.2 classement avec la méthode d'agrégation multicritère

- *Définition et principe de la méthode*

La formulation multicritère d'un problème de décision peut être définie comme le modèle " $A, A/F, E$ " [Martel, 1999] où :

- $A$  est l'ensemble des actions potentielles (envisageables, admissibles,...) correspondant aux éléments dont on veut établir une hiérarchisation ;
- $A/F$  est l'ensemble fini des attributs ou critères à partir desquels les actions seront évaluées. Notons que la famille des critères doit néanmoins posséder certaines propriétés : exhaustivité, non redondance, cohérence et indépendance ;
- $E$  est l'ensemble des évaluations des performances des actions selon chacun des attributs ou critères.

En général, lorsqu'on pose un problème multicritère, il s'agit d'en trouver la *solution la plus adéquate* compte tenu d'un ensemble de critères. Pour cela, on opère en quatre grandes étapes :

- dresser la liste des actions potentielles. Une action est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale,
- dresser la liste des critères à prendre en considération et qui découlent des conséquences des actions,
- établir le tableau des performances en construisant entre les actions et selon les critères des relations binaires, appelées *relations de surclassement*, pour représenter les préférences du décideur, compte tenu de l'information disponible. Des seuils de discrimination (indifférence, préférence) sont introduits au niveau de chacun des critères pour modéliser localement les préférences du décideur,
- agréger les performances en établissant des modèles de préférences globales afin de résoudre le problème d'aide à la décision.

Plusieurs méthodes d'agrégation existent dans la littérature [Roy et Bouyssou, 1993]. Pour notre problématique de classement des machines, et par conséquent des équipements, par ordre de priorité selon certains critères et avec des poids différents, on opte pour les approches multicritères de surclassement de synthèse [Chelbi et Ait-Kadi, 2001], en particulier la méthode **PROMETHEE** (Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluation). La philosophie de ces approches repose sur des comparaisons par paires entre les actions sur une famille cohérente de critères où on associe à chacun

des critères un poids correspondant au coefficient d'importance relative.

- **Méthode PROMETHEE pour le classement des machines**

Pour appliquer la méthode PROMETHEE, il faut définir auparavant l'ensemble des actions à classer ainsi que les critères en précisant leurs poids et les fonctions d'évaluation qui leur sont associées.

1. *Ensemble des actions*

Dans notre cas, les actions correspondent aux machines qui doivent être classées par ordre de priorité en vue de sélectionner celles qui seront maintenues dans l'AdM.

2. *Famille de critères*

La liste des critères est établie en collaboration directe avec les responsables de production et de maintenance. Parmi les critères importants, on peut citer :

- Temps d'usinage de la machine ;
- Taux d'utilisation de la machine correspondant au rapport du temps de marche sur le temps théorique de production ;
- Influence de l'arrêt sur l'unité de production (existence d'une machine de secours, d'une machine redondante ou d'un stock intermédiaire, ou bien arrêt total ou partiel de la ligne de fabrication) ;
- Coût de maintenance de la machine ;
- Fréquence de la panne ;
- Temps moyen de réparation (MTTR -Mean Time To Repair-);
- Fiabilité de la machine ;
- Contribution de la machine à la gamme de fabrication des produits ;
- Influence de la défaillance de la machine sur la qualité du produit fabriqué ;
- Influence de la panne de la machine sur la sécurité ;
- ...

3. *Calcul du degré de surclassement*

Par définition, une *relation de surclassement binaire*  $\mathfrak{R}$  définie entre 2 actions  $a$  et  $b$  de l'ensemble  $A$  est telle que : “ $a \mathfrak{R} b$  si, étant donné les préférences du décideur, la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que  $a$  est au moins aussi bon que  $b$ , sans qu'il ait de raison importante de refuser cette affirmation” [Roy et Bouyssou, 1993]. pour cela,

on associe à chaque critère  $j$  deux seuils dans la modélisation des préférences et des jugements des décideurs. Ces seuils peuvent être choisis constants ou variables suivant l'axe d'évaluation du critère  $j$  correspondant :

- le seuil d'*indifférence*, noté  $q_j$  traduit l'imprécision qui peut affecter l'évaluation des performances des actions ;
- le seuil de *préférence*, noté  $p_j$ , exprime la limite à partir de laquelle le décideur a une préférence stricte pour l'une des deux actions comparées ;
- l'intensité de préférence entre les deux seuils  $q_j$  et  $p_j$  varie de façon croissante de 0 à 1.

Pour chaque critère  $j$ , nous lui associons un poids  $k_j$  pour indiquer son importance. Afin d'homogénéiser entre les différents critères, ce poids est directement proportionnel au **coût engendré** par l'influence de la défaillance de la machine  $M_i$  sur le critère  $j$ .

Soit  $g_j(M_i)$  la performance de la machine  $M_i$  selon le critère  $j$ . Pour chaque couple de machines  $(M_i, M_l)$ , nous calculons le degré de surclassement correspondant à la préférence de  $M_i$  sur  $M_l$  de la manière suivante :

Soit  $f(\cdot)$  une fonction positive qui varie proportionnellement en fonction de l'écart entre la performance de  $M_i$  selon le critère  $j$ , notée  $g_j(M_i)$ , sur celle de  $M_l$  selon le même critère, notée  $g_j(M_l)$ . Cet écart s'exprime par :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = f(g_j(M_i) - g_j(M_l)) \quad (3.1)$$

Pour déterminer les  $\sigma_j$ , nous choisissons pour chaque critère l'une des fonctions critères existantes dont l'évaluation peut être soit qualitative soit quantitative (Annexe A). Pour des critères dont l'évaluation est qualitative, nous choisirons des fonctions qui ont des échelles de mesure ordinales. Pour des critères dont l'évaluation est quantitative, nous choisirons plutôt des fonctions qui ont des échelles de mesure cardinales.

Sur l'ensemble des critères, on calcule le degré de surclassement noté :

$$\sigma(M_i, M_l) = \sum_j k_j * \sigma_j(M_i, M_l), \text{ avec } \sum_j k_j = 1. \quad (3.2)$$

#### 4. *Ordre de classement des actions*

Les degrés de surclassement ainsi déterminés entre chaque couple de machines  $(M_i, M_l)$  permettent de calculer les trois flux suivants :

– Flux sortants :

Ces flux représentent les performances *dominantes* de la machine  $M_i$  par rapport aux autres machines. Ils s'expriment par :

$$\phi^+(M_i) = \sum_{l \in A} \sigma(M_i, M_l) \quad (3.3)$$

avec  $i \neq l$  et  $A$  représente l'ensemble des machines.

– Flux rentrants :

Ces flux représentent les performances *dominées* de la machine  $M_i$  par les autres machines. Ils s'expriment par :

$$\phi^-(M_i) = \sum_{l \in A} \sigma(M_l, M_i) \quad (3.4)$$

avec  $i \neq l$  et  $A$  représente l'ensemble des machines.

– Flux nets :

Ces flux permettent d'obtenir une relation d'ordre entre les machines sur l'ensemble des critères considérés. Le flux net de la machine  $M_i$  est calculé comme suit :

$$\phi(M_i) = \phi^+(M_i) - \phi^-(M_i) \quad (3.5)$$

Enfin, la méthode PROMETHEE permet de ranger les actions dans l'ordre décroissant des flux  $\phi(M_i)$ ,  $i \in A$ , pour obtenir - dans notre cas - le classement des machines par ordre de priorité à la maintenance.

#### • *Exemple illustratif*

Considérons le même système manufacturier de l'exemple du paragraphe 3.4, avec deux unités de production chacune d'elles est composée de 5 machines.

##### 1. *Critères retenus*

Pour classer les machines, nous retenons les critères suivants en précisant le type de fonctions associées :

- Taux de défaillance  $\lambda$  (quantitatif) ;
- Coût de maintenance de la machine  $C$  (quantitatif) ;
- Influence sur la productivité  $P$ (qualitatif). Quatre cas sont à distinguer : - recours à une machine parallèle en plus du stock ; - recours seulement au stock ; - production partielle affectée ; - production totale affectée.

2. *Poids des critères et fonctions d'évaluation*

Pour pouvoir évaluer les différentes machines à ranger sur la base des critères retenus, nous associons à chaque critère une fonction d'évaluation de façon à en faire une dimension mesurable. Ainsi, pour les critères 1 et 2 mesurés sur des échelles cardinales - de type quantitatif -, nous choisissons une fonction *linéaire* telle que le degré d'indifférence  $q_j$  corresponde à la valeur minimale du critère  $j$  sur l'ensemble des machines, et le degré de préférence  $p_j$  corresponde à la valeur maximale. En ce qui concerne le critère 3 ayant des échelles de mesure ordinales -de type qualitatif-, nous lui associons une fonction *niveau*.

Nous attribuons aussi pour chaque critère un poids proportionnel au coût engendré quand l'influence de la défaillance d'une machine sur le critère considéré est la plus élevée. Les échelles de mesure des différents critères ainsi que leurs poids sont récapitulés dans le tableau 3.3.

<b>Critère</b>	<b>Fonction d'évaluation</b>	<b>Poids</b>
Taux de défaillance $\lambda$	Linéaire ( $\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ )	15%
Coût de la maintenance $C$	Linéaire ( $C_{\min}, C_{\max}$ )	30%
Influence sur la productivité $P$	Recours à une machine parallèle.....	1/4
	Recours au stock.....	2/4
	Production partielle.....	3/4
	Production totale.....	4/4
		55%

TAB. 3.3 – Échelles de mesure et poids des critères

3. *Performances des machines*

Pour les dix machines constituant les deux unités de production, des scores sont attribués par rapport à chacun des trois critères retenus, sur la base des échelles de mesure décrites précédemment et présentée dans le tableau 3.4.

4. *Classement des machines*

Pour classer les machines, on a utilisé le logiciel *DecisionLab* qui est un

<i>Critère / Machine</i>	$M_{11}$	$M_{12}$	$M_{13}$	$M_{14}$	$M_{15}$	$M_{21}$	$M_{22}$	$M_{23}$	$M_{24}$	$M_{25}$
<i>Taux de défaillance <math>\lambda</math> (<math>\times 10^{-4}</math>)</i>	5	3	2	7	1	2	4	7	4	3
<i>Coût de maintenance <math>C</math> (Euros)</i>	100	140	180	150	140	160	140	100	110	130
<i>Influence sur la productivité <math>P</math></i>	1	1	3	4	2	3	2	1	1	4

TAB. 3.4 – Performances des machines par rapport aux critères retenus

système d'aide à la décision complet reposant sur la méthodologie multi-critère PROMETHEE et est développé par la société canadienne *Visual Decision* [Visual Decision, 2000]. La fenêtre de saisie des différents paramètres pour l'ensemble des machines est illustrée par la figure 3.5.

	Taux Défaillance	Coût Maintenance	Productivité
Min/Max	Maximize	Maximize	Maximize
Weight	15.0000	30.0000	55.0000
Preference Function	Linear	Linear	Level
Indifference Threshold	0.0001	100.0000	2.0000
Preference Threshold	0.0007	180.0000	3.0000
Gaussian Threshold	-	-	-
Threshold Unit	Absolute	Absolute	Absolute
Unit	1 / Temps	Euros	Sans
M11	0.0005	100.0000	Machine
<b>M12</b>	0.0003	140.0000	Machine
M13	0.0002	180.0000	Partielle
M14	0.0007	150.0000	Totale
M15	0.0001	140.0000	Stock
M21	0.0002	160.0000	Partielle
M22	0.0004	140.0000	Stock
M23	0.0007	100.0000	Machine
M24	0.0004	110.0000	Machine
M25	0.0003	130.0000	Totale

FIG. 3.5 – Saisie des paramètres des machines avec le logiciel *DecisionLab*

Le classement complet est basé sur les valeurs des flux nets  $\phi(M_i)$  de l'ensemble des machines. Ainsi, toutes les machines sont classées de la meilleure à la pire et aucune incomparabilité n'est autorisée. Pour le cas étudié, le classement final des machines est donné par la figure 3.6. On remarque que la machine  $M_{14}$  est préférée à toutes les autres machines de façon confirmée. Par contre, les machines  $M_{13}$  et  $M_{21}$  occupent le même rang car elles partagent les mêmes préférences.

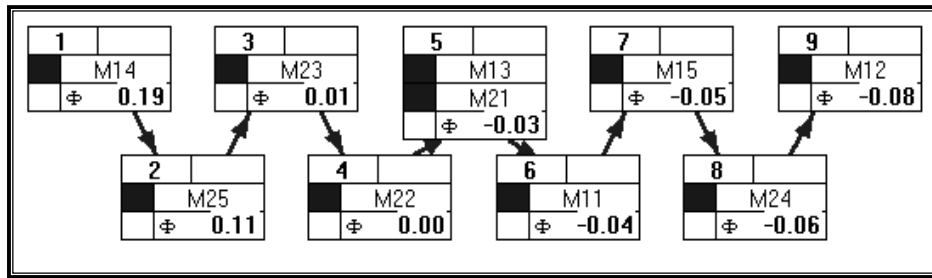


FIG. 3.6 – Classement final des machines

Notons que le classement obtenu est valable pour les critères considérés avec les différents poids associés pour chaque critère. Néanmoins, ce classement peut être toujours valable en déterminant les intervalles de stabilité du poids de chaque critère. Ces intervalles sont obtenus en effectuant une analyse de sensibilité du classement des machines par rapport aux poids des critères.

5. *Analyse de sensibilité du classement*

L'analyse de sensibilité du classement consiste à déterminer pour chaque critère un intervalle de stabilité dans lequel le poids de ce critère peut être modifié sans aucun impact sur le classement calculé auparavant.

Dans le cas de notre exemple, les poids des 3 critères retenus, à savoir : taux de défaillance, coût de maintenance et influence sur la productivité, initialement égaux à 15%, 30% et 55% dans cet ordre, peuvent varier respectivement entre les intervalles [13.92% ; 27.97%], [0 ; 100%] et [35.71% ; 57.14%], sans qu'il y ait un changement dans le classement établi (figure 3.7).

	% Weight	% Interval	
		Min	Max
Taux Défaillance	15.00%	13.92%	27.97%
Coût Maintenance	30.00%	0.00%	100.00%
<b>Productivité</b>	55.00%	35.71%	57.14%

FIG. 3.7 – Sensibilité du classement des machines par rapport aux poids des critères



### 3.4.1.3 Analyse fonctionnelle des défaillances et des causes des défaillances

L'analyse fonctionnelle des défaillances d'une machine consiste à étudier la fonctionnalité de chaque équipement que comporte la machine pour déterminer les types de défaillance et identifier les causes de défaillance de l'équipement en question. Ainsi, deux analyses fonctionnelles sont à effectuer :

- une analyse fonctionnelle externe, où chaque machine est considérée comme étant une *boîte noire*. L'identification des fonctions externes et des interfaces permet de mettre en évidence les modes de fonctionnement de la machine ;
- une analyse fonctionnelle interne, qui associe à chaque fonction identifiée de l'équipement les modes de défaillance susceptibles de causer la perte ou la dégradation de la fonction.

L'analyse fonctionnelle des défaillances des machines est réalisée grâce à l'outil de base AMDEC. Ainsi, la sélection des défaillances à prévenir se fait à partir d'un autre indice de criticité  $CR_2$  déterminé par l'impact prévisionnel de la défaillance de l'équipement sur la fiabilité  $F$  (estimation des durées d'arrêt de fonctionnement), sur la maintenabilité  $M$  (estimation du  $MTTR$  - *Mean Time To Repair* -) et sur la qualité  $Q$  (estimation du taux de défaut). Chaque critère est évalué, ce qui permet d'établir une liste hiérarchisée de toutes les défaillances dans l'ordre décroissant de l'indice  $CR_2$ . Cette liste est limitée aux défaillances les plus significatives.

<i>Fiabilité F</i>		<i>Maintenabilité M</i>		<i>Qualité Q</i>	
panne rare	1	ne nécessite pas une intervention	1	pas d'influence	1
panne occasionnelle	2	intervention faible sur site de production	2	qualité acceptable	2
panne fréquente	3	intervention moyenne	3	qualité moins bonne	3
		intervention longue dans l'AdM	4	qualité médiocre	4

TAB. 3.5 – Matrice de criticité de l'indice  $CR_2$

Notons que, comme pour le cas du classement des machines, on peut utiliser aussi bien la méthode MBF que la méthode d'agrégation multicritère pour évaluer les différents critères de l'indice de criticité  $CR_2$ , et même pour d'autres critères si l'on veut faire un classement très pointu.

#### • *Exemple illustratif*

Pour chaque machine de la liste initiale - prenons  $M_{14}$  (tableau 3.8-a)- où le seuil est

fixé à  $CR_1 > 1$ , on établit la liste des défaillances résiduelles  $DF_j$ ,  $j = 1, 2, \dots$ , et classé selon le 2<sup>e</sup> indice de criticité  $CR_2$ , basé sur les 3 critères : fiabilité  $F$ , maintenabilité  $M$  et qualité  $Q$  (tableau 3.5). De la même manière, chaque critère est évalué pour calculer l'indice  $CR_2 = F * M * Q$  de chaque défaillance  $DF_j$ , et un classement est alors effectué (figure 3.8-b). Comme précédemment, la liste est limitée aux défaillances les plus significatives. Dans notre cas, nous avons considéré les défaillances ayant l'indice  $CR_2 > 2$ . Pour les autres défaillances, celles-ci sont réalisées par les équipes d'antennes sectorisées. Puis, pour chaque défaillance  $DF_j$ , on établit toutes ses causes  $CDF_l$ ,  $l = 1, 2, \dots$ . On ne retiendra que les causes de défaillance les plus habituelles (figure 3.8-c).

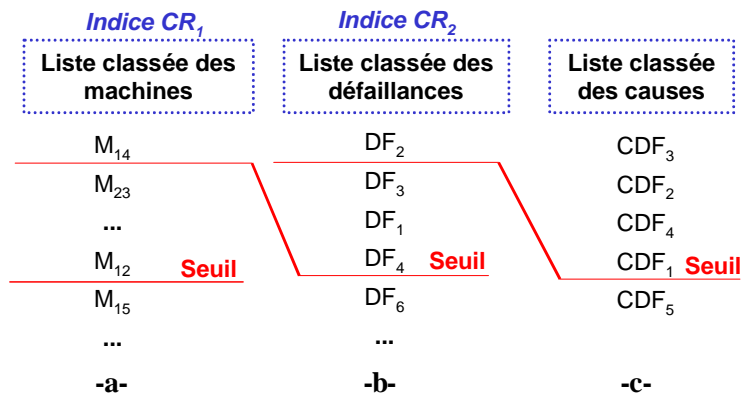


FIG. 3.8 – Analyse des défaillances des machines et des causes

Ainsi, à partir soit de la méthode MBF soit de la méthode d'agrégation multicritère, on établit par ordre de priorité la liste des équipements qui visiteront l'atelier de maintenance. Par conséquent, les ressources de l'atelier sont déterminées.

### 3.4.2 Détermination des ressources de l'AdM

Suite à l'analyse des machines du système de production et des causes de leurs défaillances, on peut déterminer :

- l'ensemble des machines et par conséquent les équipements susceptibles d'être réparés dans l'AdM ;
- les différents postes d'intervention ;
- les compétences des techniciens et par conséquent la qualification de chacun d'eux pour une tâche de maintenance selon la nature de la défaillance (panne électrique, mécanique,

- hydraulique, ...);
- les types de pièces de rechange et les équipements pour le remplacement.

Reste le dimensionnement de cet atelier de maintenance pour déterminer quantitativement les ressources. Ceci dépend des performances de production exigées telles que la disponibilité requise des machines et du budget associé pour l'investissement dans les ressources de maintenance. Ce dimensionnement est déterminé à partir de l'analyse des performances de l'AdM que fera objet le chapitre suivant.

### • *Exemple illustratif*

L'analyse fonctionnelle de chacune des défaillances (figure 3.9-b) ainsi que des causes (figure 3.9-c) permet de répertorier les différentes pièces de rechange nécessaires pour le remplacement (figure 3.9-d) et de déterminer les types de postes ainsi que les compétences des techniciens (figure 3.9-e).

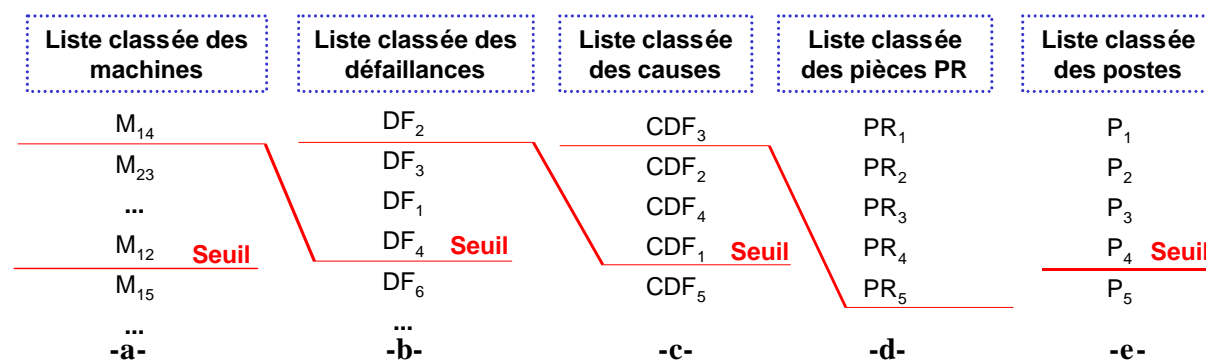


FIG. 3.9 – Détermination des ressources de l'atelier de maintenance

## 3.4.3 Élaboration du plan de maintenance

### 3.4.3.1 Établissement du plan initial des activités de maintenance

Les étapes précédentes aboutissent à une *fiche d'analyse des tâches* correspondant aux modes de défaillance à prévenir pour chaque équipement sur l'ensemble des critères retenus. Cette fiche permet au départ d'établir la liste des actions préventives. Ainsi, la périodicité des interventions est déterminée pour tout équipement ou module, en spécifiant la qualification et le nombre de techniciens ainsi que l'outillage et les postes associés. Les documents techniques utiles et les types de pièces de rechange sont aussi déterminés. Ce qui facilite ensuite la gestion et la réalisation des réparations lors d'une

maintenance corrective.

### 3.4.3.2 Analyse du retour d'expérience

Le plan de maintenance initial, basé sur les informations disponibles au moment de l'analyse et destiné à planifier les interventions, évolue vers un plan *dynamique* enrichi par l'expérience de plusieurs façons :

- par suppression ou rajout de tâches de maintenance ;
- par espacement ou raccourcissement des périodicités des interventions ;
- par transfert de certaines tâches préventives en externalisation (par sous-traitance) ;
- par optimisation des coûts de maintenance, en réalisant un compromis entre les disponibilités des machines attendues et le coût d'investissement dans l'AdM.

Rappelons que lorsqu'une machine tombe en panne, l'équipement défaillant est transféré vers l'atelier de maintenance pour sa réparation, et par conséquent la machine est indisponible durant tout le cycle de réparation de l'équipement. La technique de *réparation par remplacement*, dont le principe est détaillé dans le paragraphe qui suit, peut être appliquée dans notre cas pour minimiser les durées d'attente d'une machine.

## 3.5 Amélioration de la disponibilité des machines

Pour améliorer la disponibilité de l'ensemble des machines de production sélectionnées, nous appliquons la technique de réparation par remplacement, dont on trouve une illustration d'utilisation dans la Compagnie Maritime Hollandaise de Maintenance [Rustenburg, 2000]. Cette technique, schématisée par l'organigramme de la figure 3.10, consiste à remplacer, selon disponibilité dans le stock de l'AdM, l'équipement - ou une partie de l'équipement qu'on nomme *pièce* - défectueux(se) par un autre équipement - ou une autre pièce - équivalent(e), réparé(e) ou neuf(ve), en entamant parallèlement la réparation. Ces équipements et pièces de rechange doivent être approvisionnés et mis dans le stock afin de répondre rapidement aux pannes soudaines des machines.

Notons que lorsqu'on utilise cette technique, la disponibilité d'une machine est optimisée s'il y a suffisamment d'équipements et de pièces de rechange dans le stock, avec un coût d'approvisionnement correspondant. On cherche donc à déterminer un dimensionnement

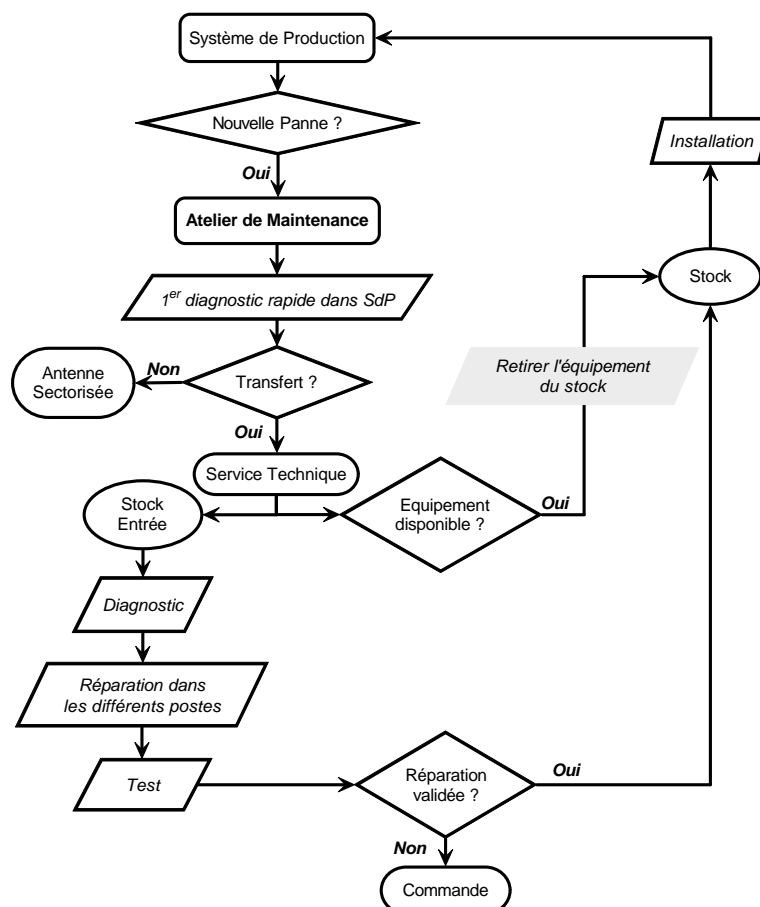


FIG. 3.10 – Technique de réparation par remplacement

optimal des équipements et pièces à stocker, en fonction de la disponibilité requise des machines et du budget associé.

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les étapes de conception d'un atelier de maintenance. Pour répertorier l'ensemble des ressources de maintenance adéquates aux machines de production, à savoir les types de postes d'intervention, les compétences des techniciens et les types de pièces de rechange, une analyse fonctionnelles des machines composant le système de production est nécessaire. La limitation du budget d'investissement dans les ressources de l'AdM nous contraint à classer les machines par ordre d'importance aux activités de maintenance selon des critères exigés en production et/ou en maintenance. Deux méthodes de classement sont présentées que nous avons adaptées pour notre cas. Une fois le classement des machines effectué, nous déterminons qualitativement les ressources de l'AdM ainsi que sa structure organisationnelle. L'évaluation des performances

de l'atelier de maintenance en fonction des objectifs assignés en productivité et en coûts de maintenance nous permet de dimensionner les différentes ressources composant l'AdM. Ainsi, nous abordons dans le chapitre 4 le dimensionnement de l'AdM pour le cas de la maintenance corrective seule. Dans le chapitre 5, le dimensionnement est établi en tenant compte des deux types de maintenance (corrective et préventive).



## Chapitre 4

# ***Dimensionnement de l'AdM : Cas de la maintenance corrective seule***

*Le dimensionnement de l'AdM consiste à trouver les valeurs optimales des ressources associées à l'atelier pour des besoins de production et/ou de maintenance donnés. Deux cas sont à distinguer : le premier cas où la maintenance corrective seule est considérée et le second cas où les deux politiques de maintenance - corrective et préventive - sont prises en compte (le second cas est traité dans le chapitre 5). Une démarche globale de dimensionnement de l'AdM pour chaque cas est alors établie. Au début de ce chapitre, on définit les critères de dimensionnement basés sur les indicateurs de sûreté de fonctionnement. Pour évaluer les performances de l'atelier de maintenance, on peut utiliser le calcul analytique ou la simulation. Dans le cas de la maintenance corrective seule, des méthodes analytiques basées sur les réseaux de files d'attente sont utilisées. Dans le cas d'intégration de diverses politiques de maintenance, la simulation avec les réseaux de Petri stochastiques permet de dimensionner l'atelier de maintenance. Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'évaluation des performances de l'atelier de maintenance pour dimensionner les ressources de l'AdM dans le cas où seule la maintenance corrective est considérée.*





## 4.1 Introduction

D'une manière générale, dimensionner un atelier revient à fixer les valeurs des nombreux paramètres associés à sa structure. Dans le cas d'un atelier de maintenance, le dimensionnement consiste à déterminer le nombre des postes d'intervention, des techniciens affectés aux différents postes et le niveau du stock de pièces de rechange. Ce dimensionnement dépend d'un certain nombre de critères liés principalement aux exigences de production et aux indicateurs de sûreté de fonctionnement.

## 4.2 Indicateurs de sûreté de fonctionnement

Afin de mieux connaître, évaluer et maîtriser les défaillances des machines dans les systèmes manufacturiers de production, les équipements composant ces machines sont caractérisés par des indicateurs fondamentaux de sûreté de fonctionnement. Ces indicateurs liés aux notions de *Fiabilité*, *Maintenabilité* et *Disponibilité* (FMD), permettent d'aider la prise de décision sur le choix de politique de maintenance à appliquer et s'attachent à suivre le bon déroulement des opérations de maintenance. Ainsi, pour une maintenance préventive, deux indicateurs sont principalement suivis : le temps d'intervention et la périodicité. Pour une maintenance corrective, le temps de réparation et la fréquence des défaillances sont les paramètres prépondérants en termes de sûreté de fonctionnement.

Lors du dimensionnement de l'atelier de maintenance, le choix d'indicateurs de performance de chaque machine est établi selon les besoins en production et/ou en maintenance. Les indicateurs les plus usuels sont les suivants :

### 4.2.1 Indicateurs de Fiabilité

Par définition, la fiabilité  $R(t)$  d'un système ( $R$  vient de l'anglais *Reliability*) est la probabilité de bon fonctionnement du système sur la durée  $[0, t]$  en supposant qu'il n'est pas défaillant à l'instant  $t = 0$ . Les indicateurs liés à la fiabilité sont :

$\lambda(t)$  : Taux de défaillance qui représente le nombre de défaillances par unité de temps.

$MTBF$  : Temps moyen entre deux défaillances (*Mean Time Between Failures*).

$MTTF$  : Temps moyen avant première défaillance (*Mean Time To Failure*). Pour un système non réparable, on a :  $MTTF = MTBF$ .

### 4.2.2 Indicateurs de Maintenabilité

La maintenabilité  $M(t)$  est la probabilité de rétablir le fonctionnement du système après sa défaillance, dans des conditions spécifiques et dans un temps  $t$  donné et limité. Les indicateurs de maintenabilité sont :

$\mu(t)$  : Taux de réparation qui s'assimile à la probabilité que le système soit réparé entre l'instant  $t$  et l'instant  $t + dt$ , sachant qu'il n'est pas réparé sur l'intervalle  $[0, t]$ .

$MTTR$  : Moyenne des temps de réparation (*Mean Time To Repair*).

### 4.2.3 Indicateurs de Disponibilité

La disponibilité  $A(t)$  est définie comme étant la probabilité de bon fonctionnement d'un système à l'instant  $t$ . Comme indicateurs de disponibilité, on a :

$DO$  : Indicateur de base de la *Disponibilité Opérationnelle*, qui est le rapport entre le temps moyen de bon fonctionnement sur le temps requis.  $DO$  s'exprime par :

$$DO = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1 \quad (4.1)$$

$MUT$  : Temps moyen de disponibilité effective (*Mean Up Time*).

$MUT_{TRS}$  : Temps moyen de disponibilité effective pendant lequel la machine produit de bonnes pièces.

$MDT$  : Temps moyen d'indisponibilité ou d'arrêt propre (*Mean Down Time*) .

$TRS$  : Taux de Rendement Synthétique qui permet de mesurer la performance d'une machine et d'analyser les causes de non-productivité. Sur une période d'ouverture, le Taux de Rendement Synthétique  $TRS_{M_i}$  de la machine  $M_i$  s'exprime par :

$$TRS_{M_i} = \frac{MUT_{TRS}}{MDT + MUT} \quad (4.2)$$

## 4.3 Critères de dimensionnement

Rappelons que lors du dimensionnement de l'atelier de maintenance, deux parties sont à distinguer. Dans la première partie traitée dans ce chapitre, seule la maintenance corrective est considérée dans l'atelier de maintenance. Dans la seconde partie traitée dans le chapitre suivant, on tient compte des deux politiques de maintenance (corrective et préventive). Ainsi, les indicateurs de performance des machines permettant de dimensionner l'atelier de maintenance dans notre cas sont :

- le temps moyen d'indisponibilité maximum  $MDT_i$  de chaque machine  $M_i$  dans le cas d'une maintenance corrective seule ;

- le taux de rendement synthétique  $TRS_{M_i}$  de chaque machine  $M_i$  dans le cas de la prise en compte d'autres politiques de maintenance.

La figure 4.1 illustre quelques indicateurs liés à la sûreté de fonctionnement précédemment cités.

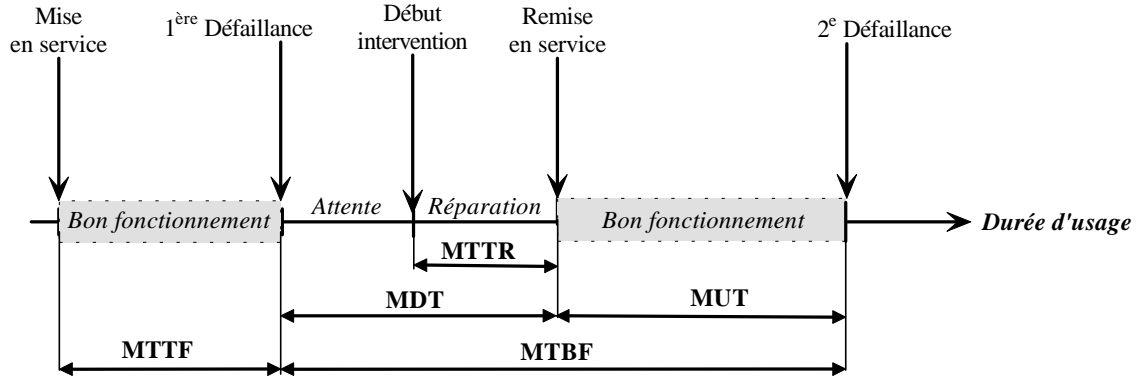


FIG. 4.1 – Durées caractéristiques des indicateurs Fiabilité-Maintenabilité-Disponibilité

Pour évaluer les performances de l'atelier de maintenance, deux approches sont possibles : les méthodes analytiques et la simulation.

## 4.4 Méthodes d'évaluation de performances

En général, concevoir un système sans avoir mené au préalable l'évaluation et l'analyse des performances, peut aboutir à la création d'un système soit sous-dimensionné, donc inutilisable puisqu'il ne respecte pas les objectifs initiaux, soit surdimensionné et pour lequel la conception serait chère inutilement. De ce fait, l'évaluation des performances est nécessaire et intervient, dans cette étude, aussi bien au niveau de la *conception* de l'AdM pour le dimensionnement des ressources qu'au niveau de l'*exploitation* pour l'optimisation des coûts de maintenance. Étant donné que l'AdM n'existait pas auparavant et que l'on ne peut pas par conséquent mesurer directement les paramètres de performances, on passe par un formalisme permettant de concentrer dans un modèle, les comportements et les paramètres reproduisant au mieux le fonctionnement de l'atelier afin d'évaluer ses performances. Différents types de formalismes ont été développés, parmi eux les méthodes analytiques et la simulation.

Dans cette étude, nous utiliserons des méthodes analytiques basées sur les réseaux de files d'attente pour le cas d'une maintenance corrective seule. Pour le cas où les deux

politiques de maintenance sont prises en compte, nous utiliserons la simulation basée sur les réseaux de Petri stochastiques généralisés. Nous introduisons dans ce qui suit quelques rappels sur le réseau de files d'attente, un outil utilisé pour modéliser et évaluer les performances des systèmes informatiques, de télécommunication, de production, . . . , avant d'aborder les méthodes analytiques.

#### 4.4.1 Formalisme d'un réseau de files d'attente

**Une file simple ou station** est constituée d'une file d'attente (ou buffer) et d'un (ou plusieurs) serveur(s). Les clients arrivent de l'extérieur, font une demande d'accès à une ressource et patientent éventuellement dans la file d'attente. Dès l'instant où la ressource est disponible, chaque client entre en service et conserve la ressource pendant toute la durée du service, puis quitte la station [Baynat, 2000].

Toute file est caractérisée par le processus d'arrivée des clients, le temps de service ainsi que la structure et la discipline de service de la file d'attente (figure 4.2).

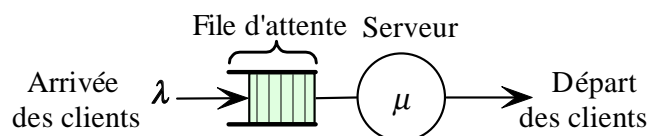


FIG. 4.2 – Formalisme d'une file simple

- L'arrivée des clients à la station est décrite à l'aide d'un processus stochastique de comptage correspondant à la distribution des probabilités des temps interarrivées, notée  $A(t) = P[\text{temps entre 2 arrivées} < t]$ . Le processus de Poisson est le plus couramment employé. C'est un processus de renouvellement qui est tel que les temps interarrivées sont distribués selon une loi exponentielle. D'autres lois de distribution, telles que la loi constante, générale, Erlang, Cox, Phase, . . . , peuvent aussi être utilisées pour modéliser des phénomènes réels.
- Le processus de départ des clients est décrit par une loi de distribution des probabilités de temps de service, notée  $B(t) = P[\text{temps de service} < t]$ . Comme précédemment, cette loi peut être exponentielle, constante, générale, . . .
- La structure de la file est déterminée par le nombre de serveurs  $C$  et sa capacité  $K$  à accueillir des clients en attente de service, qui peut être finie ou infinie. La discipline

de service détermine l'ordre dans lequel les clients sont rangés dans la file et y sont retirés pour recevoir le service. on trouve des disciplines de type FIFO (*First In First Out*), LIFO (*Last In First Out*).

Ainsi, la description d'une file simple est normalisée par la notation de Kendall suivante :  $A/B/C/K$  [Baynat, 2000].

**Un réseau de files d'attente** (RFA) est composé d'un ensemble de files simples (ou stations) interconnectées, à travers lesquelles circulent des entités appelées clients. Afin de spécifier complètement un réseau, il faut caractériser chaque station, le processus d'arrivée des clients, leur routage dans le réseau et éventuellement le nombre total de clients présents, selon le type de réseau. Il existe principalement deux types de réseaux :

- *Réseaux ouverts* : les clients arrivent de l'extérieur, circulent dans le réseau à travers les différentes stations, puis quittent le réseau. Le nombre de clients pouvant se trouver à un instant donné dans un réseau ouvert n'est donc pas limité.
- *Réseaux fermés* : les clients sont en nombre constant, il n'y a donc pas d'arrivée ni de départ des clients.

#### 4.4.2 Résolution analytique

À partir du modèle RFA, on peut écrire un certain nombre d'équations reliant les différents paramètres et les performances du RFA. La résolution (exacte ou approchée) de ces équations permet de calculer les paramètres de performances du système étudié. L'intérêt de ces méthodes réside principalement dans leur résolution, en un temps de calcul très court, avec une précision souvent suffisante. Ainsi, pour un système stable et en régime permanent, le nombre moyen de clients  $Q$ , le temps moyen de réponse  $W$  et le débit moyen  $X$  du système forment à travers une équation que l'on appelle *la loi de Little* :

$$Q = W.X \tag{4.3}$$

Sous certaines hypothèses, et pour une classe particulière de réseaux de files d'attente connue sous le nom de réseaux *à Forme Produit*, on peut facilement évaluer les performances exactes du système étudié par une résolution analytique simple [Jackson, 1963]. Par contre pour des systèmes plus complexes, des méthodes mathématiques approximatives ont été développées pour analyser et dimensionner ces systèmes [Di Mascolo, 1996]. L'idée de ces méthodes est de ramener l'étude du système complexe à l'étude d'un

système simple, ou à une combinaison de systèmes simples que l'on sait analyser.

Dans certains cas, la complexité du système étudié engendre des équations dont la résolution est assez délicate, ce qui rend l'utilisation des méthodes analytiques très difficile. Dans ces cas, on préfère faire appel à la simulation. C'est ce que nous verrons dans le chapitre 5.

## 4.5 Procédure de dimensionnement

Comme nous l'avons mentionné précédemment, deux parties sont à distinguer lors du dimensionnement de l'atelier de maintenance. Dans la première partie, seule la maintenance corrective est considérée dans l'atelier de maintenance. Dans la seconde partie, on tient compte des deux politiques de maintenance (corrective et préventive). Pour obtenir la configuration de l'atelier de maintenance qui répond aux critères de dimensionnement et qui minimise les coûts de maintenance engendrés, la démarche globale de dimensionnement dans chaque partie est comme suit :

### **Partie 1 - *Maintenance corrective seule* :**

Dans une première phase, on établit le cycle de réparation correspondant au cheminement des différents équipements pour leur réparation, afin de dimensionner l'atelier de maintenance vis-à-vis du nombre de techniciens et de postes d'intervention. À l'issue de cette première phase, on obtient une structure de l'atelier qui garantit un temps de réparation inférieur au temps d'indisponibilité maximum toléré. Pour améliorer la disponibilité des équipements, on peut appliquer la technique de réparation par remplacement. La seconde phase consiste alors à dimensionner le niveau du stock des pièces de rechange.

### **Partie 2 - *Maintenances corrective et préventive* :**

Pour éviter la dégradation des équipements et réduire les conséquences des arrêts fortuits, on intègre dans l'AdM la maintenance préventive systématique, en plus de la maintenance corrective. Dans cette partie, des interventions régulières sont alors programmées pour chaque machine et un ordonnancement des tâches est établi en fonction des priorités de production et de maintenance.

Dans chaque partie, on évalue les performances de l'atelier de maintenance. Deux étapes sont établies pour déterminer la configuration optimale de l'AdM :

1. Dans la première étape, on détermine les configuration(s) qui satisfont les indicateurs de performances fixés ;
2. Parmi les configurations trouvées, on détermine dans la seconde étape celle qui engendre les moindres coûts de maintenance.

Ainsi, on dira qu'une configuration de l'AdM est solution de notre problème de dimensionnement si elle satisfait les indicateurs de performances fixés et minimise les coûts de maintenance.

## 4.6 Dimensionnement dans le cas d'une maintenance corrective seule

Dans cette étape, on détermine la structure de l'AdM qui répond aux critères de dimensionnement et qui minimise le coût d'investissement dans les ressources de l'AdM. Les ressources concernent les postes d'intervention et le niveau du stock de pièces de rechange. Ces ressources interviennent plutôt lors de la défaillance d'une machine dans le cycle de réparation d'un équipement ou lors du remplacement de l'équipement pour réduire le temps d'indisponibilité d'une machine défectueuse.

### 4.6.1 Cycle de réparation

Soit le système de production décrit dans l'exemple du chapitre 3 où l'ensemble des machines qui visiteront l'atelier de maintenance est déterminé. La défaillance de chaque machine est due à la panne d'un seul équipement déplaçable et réparable. On suppose que les équipements des différentes machines ont le même taux de défaillance  $\lambda$  et deux causes de défaillance avec des probabilités d'occurrence  $p_{12}$  et  $p_{13}$ . L'étude structurelle du système de production décrite dans le chapitre 3 nous a permis de déterminer les  $N$  types des postes d'intervention nécessaires. Nous considérons par la suite l'atelier de maintenance composé de 6 postes ( $N = 6$ ) destiné à la réparation de ces équipements dont la loi d'arrivée est exponentielle de taux  $\lambda$ . Comme on a deux causes de défaillance, deux types de postes ( $P_2$  et  $P_3$  avec les probabilités respectives  $p_{12}$  et  $p_{13}$ ) sont nécessaires pour la réparation (figure 4.3). Rappelons que pour l'instant, nous nous intéressons seulement à la maintenance corrective.

Un technicien est affecté à chaque poste  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, N = 6$ , avec un taux de service exponentiel  $\mu_i$  et une discipline de service FIFO (les différents équipements ont la même priorité). Les équipements défaillants provenant du SdP arrivent suivant un processus



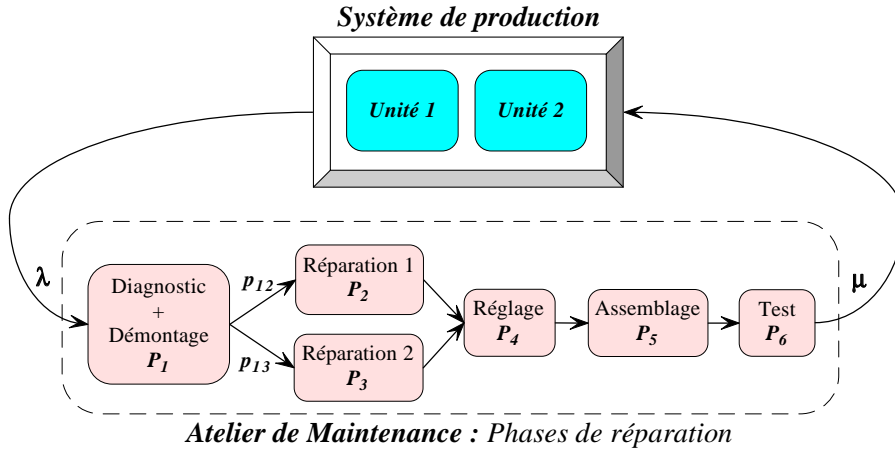


FIG. 4.3 – Interactions entre atelier de production et atelier de maintenance

poissonien de taux  $\lambda$ , au premier poste  $P_1$  de l'AdM pour le *diagnostic* et le *démontage*. Après avoir détecté la cause de la défaillance, supposée d'être due à une et une seule pièce, l'équipement en question est transféré, soit vers le poste  $P_2$  si la réparation est de type *Réparation 1* avec une probabilité  $p_{12}$ , soit vers le poste  $P_3$  si la réparation est de type *Réparation 2* avec une probabilité  $p_{13}$ . Une fois la réparation terminée, la phase de *Réglage* qui s'effectue au poste  $P_4$  est nécessaire avant de passer au poste  $P_5$  pour l'*Assemblage*. Enfin, la réparation est validée après avoir vérifié la mise en service sur le poste  $P_6$  pour un *Test*.

On suppose que :

- le processus d'arrivée des équipements défectueux dans l'AdM est un processus de Poisson de taux  $\lambda$ ,
- le cheminement probabiliste des équipements dans l'AdM est probabiliste,
- chaque poste  $P_i$  contient un seul technicien, de taux de service  $\mu_i$  distribué exponentiellement,
- les files d'attente sont illimitées et gérées par une discipline de service de type FIFO.

On obtient alors un RFA qui vérifie les hypothèses de la *Forme Produit* [Jackson, 1963] et dont les paramètres de performances peuvent être obtenus avec des méthodes analytiques exactes. Le modèle RFA modélisant l'AdM est donné dans la figure 4.4.

Le critère de dimensionnement est  $W_T \leq W_{M1}$ , où  $W_T$  représente la durée d'indisponibilité de chaque équipement, et  $W_{M1}$  correspond à la durée d'indisponibilité autorisée.

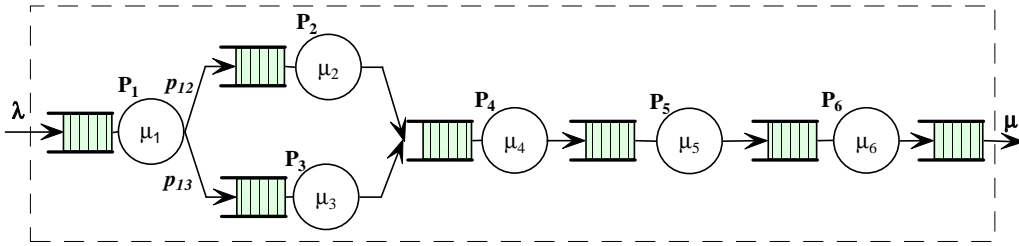


FIG. 4.4 – Réseau de files d'attente modélisant l'atelier de maintenance

Au niveau de chaque poste, on évalue le temps d'attente  $W_i$  correspondant au temps de réparation de l'équipement défaillant sur ce poste. Ce qui permet de calculer le temps de séjour total  $W_T$  de chaque équipement. Si le critère de dimensionnement  $W_T \leq W_{M1}$  n'est pas satisfait, on duplique le poste du processus de réparation le plus chargé. Pour minimiser par la suite le coût d'investissement dans l'AdM, on dresse dans chaque étape de duplication de postes la liste des postes dans l'ordre décroissant par rapport au taux de charge. On réévalue les performances de l'AdM et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la configuration de l'AdM qui répond au critère de dimensionnement. Une fois la contrainte sur le temps de séjour est satisfaite, on balaye l'ensemble des  $N$  postes pour déterminer le poste à dupliquer le moins coûteux tout en satisfaisant la contrainte de dimensionnement.

Les étapes du dimensionnement de l'AdM pour un cycle de réparation donné sont décrites dans l'algorithme suivant.

**Algorithme 4.1.** *Dimensionnement de l'AdM pour un cycle de réparation donné :*

**Pas 1 -** Calculer :

$P_{ij}$  : Proportion d'équipements qui quittent le poste  $i$  et vont au poste  $j$  :

$$P_{i1} + P_{i2} + \dots + P_{iN} \leq 1 \quad (4.4)$$

$P_{i0}$  : Proportion d'équipements qui quittent le poste  $i$  et sortent définitivement :

$$P_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^N P_{ij} \quad (4.5)$$

$v_i$  : Taux de visite d'un équipement au poste  $i$  :

$$v_i = P_{0i} + \sum_{j=1}^N v_j \cdot P_{ji} \quad (4.6)$$

$X_i$  : Débit moyen du poste  $i$  :

$$X_i = \lambda.v_i \quad (4.7)$$

**Pas 2** - Vérifier la condition de stabilité (uniquement la première fois) :

$$\lambda \leq \min[X_1, X_2, \dots, X_N] \quad (4.8)$$

**Pas 3** - Calculer le temps de séjour moyen total d'un équipement :

$$W_T = \sum_{j=1}^N v_j.W_i = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{j=1}^N \frac{1}{\left(\frac{\mu_i}{X_i} - 1\right)} \quad (4.9)$$

$W_i$  représente le temps de séjour moyen d'un équipement au poste  $i$  :

$$W_i = \frac{1}{\mu_i - X_i} = \frac{1}{\mu_i - \lambda.v_i} \quad (4.10)$$

**Pas 4 - SI  $W_T > W_{M1}$  ALORS**

4.1- Établir la liste des postes par ordre décroissant par rapport au taux de charge  $\frac{X_i}{\mu_i}$  ;

4.1- Dupliquer le poste qui a un taux de charge le plus élevé (donc en début de liste de rang  $l$ , avec  $l = 1$ ) ;

4.2- Actualiser le nombre de postes  $N := N + 1$  ;

4.3- Aller au **Pas 1**

**SINON**

4.4- Calculer le coût d'investissement total  $CT_{Inv}$  ;

4.5- Aller au **Pas 5**

**Pas 5 - TANT QUE  $W_T \leq W_{M1}$**

5.1- Dupliquer plutôt le poste de rang suivant, c'est-à-dire le poste classé au rang  $l$ , avec  $l = l + 1$  ;

5.2- Recalculer le nouveau temps de séjour moyen total d'un équipement  $W_T$  ;

**5.3- SI  $W_T \leq W_{M1}$  ALORS**

5.2.a- Calculer le nouveau coût d'investissement total  $C_{Inv}$  ;

5.2.b- **SI  $C_{Inv} < CT_{Inv}$  ALORS** Mémoriser la nouvelle structure de l'AdM.

5.2.c- Aller au **Pas 5**

■

• **Exemple d'application**

Soit l'atelier de maintenance illustré dans la figure 4.3 destiné à la réparation de pinces provenant des 2 unités du système de production. On suppose un taux d'arrivée  $\lambda$  poissonien égale à 0,2, ce qui correspond en moyenne à 8 pinces par semaine. les taux de services de différents postes sont exponentiels et sont donnés dans le tableau 4.1. Les probabilités de réparation sur les postes  $P_2$  et  $P_3$  sont, respectivement  $p_{12} = 0,7$  et  $p_{13} = 0,3$ . Le temps de séjour maximum  $W_{M1}$  d'une pince autorisé dans l'AdM durant une semaine est  $W_{M1} = 11$  heures.

On applique les étapes **Pas 1** jusqu'à **Pas 3** de l'**algorithme 4.1** pour évaluer le temps de séjour total  $W_T$  d'une pince (par semaine). Le calcul du temps de séjour total  $W_T$  d'une pince (par semaine) nous permet d'évaluer par la suite le coût des pertes de production dûes à l'indisponibilité des machines pendant une année noté  $CP_A$ , puis pendant 5 ans noté  $CP_{5A} = 5 * CP_A$ .

Les résultats obtenus et donnés dans le tableau 4.1 montrent que le critère de dimensionnement n'est pas satisfait ( $W_T > W_{M1}$ ), avec une perte de production évaluée à 3996,50 k Euros pendant une période de 5 ans. Afin de minimiser la durée de réparation des machines, on détermine le ou les postes le(s) plus chargé(s) et on réévalue le nouveau temps de séjour total  $W_T$  (**Pas 4** de l'**algorithme 4.1**).

		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
Taux de service	$\mu_i$	0,65	0,40	0,48	2,00	0,40	1,80
Temps d'attente au poste $P_i$	$w_i$	2,22	<u>3,84</u>	2,38	0,55	<u>5,00</u>	0,62
Temps moyen d'attente d'une pince	$W_T$	11,81 (heures/semaine)					
Temps moyen d'attente total annuel	$WT_A$	4440,56 (heures)					
Perte annuelle	$CP_A$	799,30 (k Euros)					
Perte pendant 5 ans	$CP_{5A}$	3996,50 (k Euros)					

TAB. 4.1 – Performances de l'AdM

Nous remarquons que les temps de séjour d'une pince dans les postes  $P_2$  et  $P_5$  sont les plus significatifs. Nous dupliquons alors, dans chaque cas, un des deux postes  $P_2$  et  $P_5$ , et évaluons les performances du nouvel AdM. Nous supposons que le coût d'investissement d'un nouveau poste ( $P_2$  ou  $P_5$ ) est estimé à  $C_{Res} = 7,500$  k Euros et les frais annuels à  $F_A = 600$  Euros.

– ***P2 dupliqué***

Le principe consiste à rajouter un autre poste, y compris un technicien, équivalent à  $P_2$ , ce qui nous amène à considérer les postes  $P_{21}$  et  $P_{22}$  avec le même taux de service que  $P_2$  ( $\mu_{21} = \mu_{22} = \mu_2 = 0,40$ ). Dans le modèle initial, la probabilité d'acheminement d'une pince du poste  $P_1$  vers le poste  $P_2$  est égale à 0,7. Dans le nouveau modèle, cette probabilité devient 0,35 vers chacun des postes  $P_{21}$  et  $P_{22}$ . Le réseau de files d'attente modélisant l'AdM avec le poste  $P_2$  dupliqué est donné dans la figure 4.5.

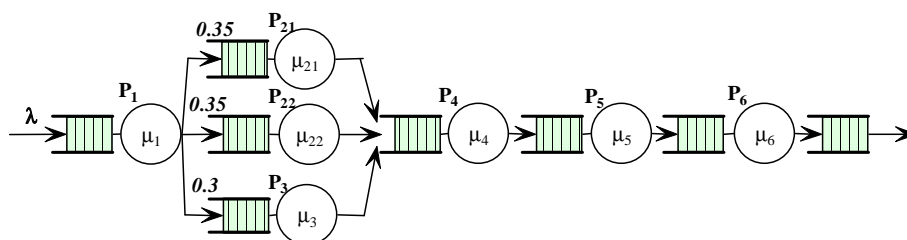


FIG. 4.5 – Modèle RFA avec le poste P2 dupliqué

Les performances de l'AdM avec  $P_2$  dupliqué sont données dans le tableau 4.2. Dans ce cas, le gain au bout de 5 ans  $G_{5A} = CP_{5A} - [(5 * C_{PA}) + CI_{1A} + (4 * CI_{AS})]$  est évalué à 185,80 k Euros,  $CP_{5A} = 3996,50$  k Euros étant la perte pendant 5 ans dans le cas du modèle initial.

		$P_1$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
Taux de service	$\mu_i$	0,65	0,4	0,40	0,48	2,00	0,40	1,80
Temps d'attente au poste $P_i$	$w_i$	2,22	3,03	3,03	2,38	0,55	5,00	0,62
Temps moyen d'attente d'une pince	$W_T$	11,23 (heures/semaine)						
Temps d'attente total annuel	$WT_A$	4222,48 (heures/semaine)						
Perte annuelle	$C_{PA}$	760,04 (k Euros)						
Coût d'investissement 1 <sup>ère</sup> année	$CI_{1A}$	8,10 (k Euros)						
Coût d'investissement année suivante	$CI_{AS}$	0,60 (k Euros)						
Gain au bout de 5 ans	$G_{5A}$	185,80 (k Euros)						

TAB. 4.2 – Performances de l'AdM avec le poste  $P_2$  dupliqué– ***P5 dupliqué***

De la même manière, nous rajoutons dans ce cas, un autre poste équivalent à  $P_5$ , ce qui nous amène à considérer les postes  $P_{51}$  et  $P_{52}$  avec  $\mu_{51} = \mu_{52} = \mu_5 = 0,40$ . La probabilité de passage du poste  $P_4$  vers chacun des postes  $P_{51}$  et  $P_{52}$  devient 0,5. Le RFA modélisant l'AdM avec le poste  $P_5$  dupliqué est donné dans la figure 4.6. Les performances du nouvel AdM avec le poste  $P_5$  dupliqué sont données dans le tableau 4.3. Le coût d'installation du poste  $P_5$  et les frais annuels sont supposés identiques à ceux du cas précédent.

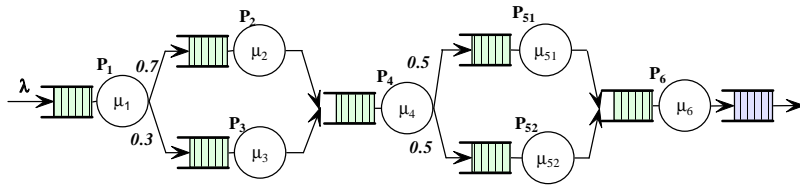


FIG. 4.6 – Modèle RFA avec le poste  $P_5$  dupliqué

		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_{51}$	$P_{52}$	$P_6$
Taux de service	$\mu_i$	0,65	0,40	0,48	2,00	0,40	0,40	1,80
Temps d'attente au poste $P_i$	$w_i$	2,22	3,84	2,38	0,55	3,33	3,33	0,62
Temps moyen d'attente d'une pince	$W_T$	10,14 (heures/semaine)						
Temps d'attente total annuel	$WT_A$	3812,64 (heures)						
Perte annuelle	$C_{PA}$	686,27 (k Euros)						
Coût d'investissement 1 <sup>ère</sup> année	$CI_{1A}$	8,10 (k Euros)						
Coût d'investissement année suivante	$CI_{AS}$	0,60 (k Euros)						
Gain au bout de 5 ans	$G_{5A}$	554,65 (k Euros)						

TAB. 4.3 – Performances de l'AdM avec le poste  $P_5$  dupliqué

### – Comparaison

Les performances obtenues dans les 3 cas (le modèle initial, le modèle avec  $P_2$  dupliqué et le modèle avec  $P_5$  dupliqué) sont récapitulées dans le tableau 4.4. On remarque que la duplication du poste  $P_5$  permet d'avoir un plus grand gain au bout de 5 années, que la duplication du poste  $P_2$ . Pour cette phase de rajout d'un poste d'intervention, la duplication du poste  $P_5$  donne un meilleur gain.

	Modèle initial	$P_2$ dupliqué	$P_5$ dupliqué
Temps moyen d'attente d'une pince (heures/semaine)	11,81	11,23	10,14
Pertes de production pendant 5 ans (k Euros)	3996,50	3800,23	3431,37
Coûts d'investissement durant 5 ans (k Euros)	0,00	10,48	10,48
Gain au bout de 5 ans (k Euros)	0,00	185,80	554,65

TAB. 4.4 – Comparaison des performances

On obtient alors la configuration du nouvel AdM qui permet d'avoir un temps de séjour  $W_T \leq 11$  heures en dupliquant le poste  $P_5$ .

### 4.6.2 Technique de réparation par remplacement

Pour améliorer la disponibilité des machines, la technique de réparation par remplacement peut être appliquée. Le principe consiste à stocker des équipements et des pièces dans le magasin pour diminuer le temps d'attente et améliorer par conséquent la disponibilité des

machines. Dans notre exemple, on suppose que la défaillance d'un équipement est due à une seule pièce. Deux cas sont alors traités : soit stocker uniquement des équipements (remplacement *1<sup>er</sup> niveau*), soit stocker simultanément des équipements et des pièces de rechange (remplacement *2<sup>e</sup> niveau*). On peut envisager de stocker à plusieurs niveaux selon la décomposition de chaque machine. Dans notre cas, on se limite à 2 niveaux. L'objectif est de dimensionner le stock d'équipements et des pièces.

Considérons la nouvelle configuration de l'AdM modélisée par les RFA et décrite par la figure 4.6. A partir de ce modèle où le poste  $P_5$  est dupliqué, nous appliquons maintenant la réparation par remplacement pour réduire le temps d'attente dans l'AdM. Les nouvelles performances de l'AdM sont évaluées pour chacun des deux cas cités.

#### 4.6.2.1 Remplacement d'équipements : 1<sup>er</sup> niveau

Le principe de cette technique est comme suit : dès qu'un équipement défaillant se présente dans l'AdM, sa réparation est entamée. Parallèlement, si un autre équipement est disponible dans le stock, celui-ci est pris pour le remplacement. Ainsi, le temps d'indisponibilité correspond seulement au temps de transfert du nouvel équipement et de son installation. Le modèle RFA correspondant à cet AdM avec remplacement de 1<sup>er</sup> niveau est illustré par la figure 4.7.

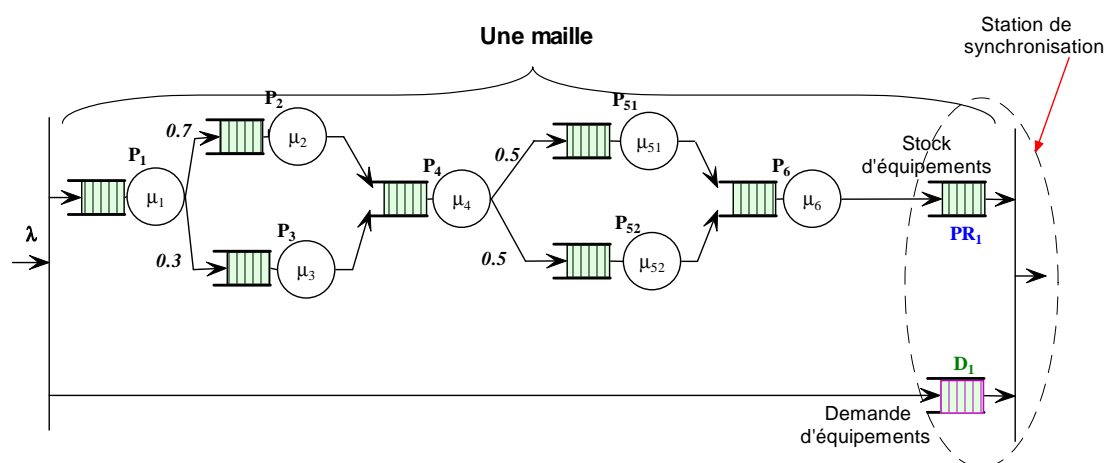


FIG. 4.7 – Modèle RFA de l'AdM avec remplacement de 1er niveau

La file  $PR_1$  représente le stock d'équipements avec un niveau initial  $S_1$ . Les équipements arrivent selon un processus poissonien de taux  $\lambda$ . Dès qu'un équipement est transféré vers

l'AdM, il est mis dans la file d'attente du poste  $P_1$  pour le diagnostic. Instantanément, une information est mise dans la file  $D_1$  indiquant qu'une demande d'équipement est en attente. S'il y en a un de disponible dans la file  $PR_1$ , le remplacement est alors effectué, ce qui est représenté par la *station de synchronisation* de la figure 4.7. L'objectif est de déterminer le nombre d'équipements dans le stock selon la disponibilité requise.

Dans cette technique de remplacement, on retrouve une modélisation d'un système de production composé d'une seule maille et adoptant une gestion de type **Base Stock** [Duri, 1997]. Le but de cette gestion est de ramener la file  $PR_1$  à son niveau maximal  $S_1$  tout en satisfaisant les demandes qui se trouvent dans la file  $D_1$ . Pour ce type de modèle, des méthodes analytiques approximatives ont été développées dans le contexte des systèmes de production. Nous utiliserons l'une de ces méthodes développée au Laboratoire d'Automatique de Grenoble (LAG) [Duri, 1997] pour analyser les performances de l'AdM.

• **Exemple d'application**

Nous avons analysé les performances de la nouvelle structure de l'AdM illustrée par la figure 4.6 en fonction du nombre de pinces dans le stock. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.5.

Nombre de pinces	$S_I$	0	1	2	3	4
Durée totale de séjour (heures/ semaine)	$W_T$	10,14	6,14	3,44	1,82	0,93
Coût de perte annuel (k Euros)	$CP_A$	686,27	415,56	232,82	123,18	62,94
Coût d'investissement la 1 <sup>ère</sup> année	$CI_{1A}$	8,10	43,10	78,10	113,10	148,10
Frais annuels (à partir de la 2 <sup>ème</sup> année)	$CI_{AS}$	0,60	5,60	10,60	15,60	20,60
Coût des pertes au bout de 5 ans	$CP_{5A}$	3441,88	2143,28	1284,60	791,39	545,21
Gain total au bout de 5 ans (k Euros)	$G_{5A}$	554,62	1853,22	2711,90	3205,11	3451,29

TAB. 4.5 – Performances de l'AdM avec remplacement de premier niveau

Pour les calculs, on a supposé que le coût d'une pince est estimé à 30 k Euros, avec une durée de maintenabilité de 5 ans, et les frais annuels additionnels sont estimés à 5 k Euros.  $CI_{1A}$  désigne le coût d'investissement (du poste  $P_5$  et des pinces) de la 1<sup>re</sup> année.  $CI_{AS}$  représente les frais annuels, à partir de la 2<sup>e</sup> année. Selon le nombre de pinces mis dans le stock, nous calculons le gain total  $G_{5A}$  au bout de 5 ans. Pour rappel, ce gain est exprimé par  $G_{5A} = CP_{5A} - [(5 * C_{PA}) + CI_{1A} + (4 * CI_{AS})]$ .



#### 4.6.2.2 *Remplacement d'équipements et des pièces : 2<sup>e</sup> niveau*

La défaillance d'un équipement est due principalement à une seule pièce démontable et réparable. Ainsi, lorsqu'un équipement est transféré vers l'AdM, trois cas se présentent :

- Si un équipement est disponible dans le stock, on effectue le remplacement de l'équipement ;
- S'il n'y a aucun équipement alors qu'il y a une pièce disponible dans le stock, la pièce défectueuse est remplacée. Ainsi, on passe directement aux phases d'*Assemblage* et de *Test* (postes  $P_5$  et  $P_6$ ) ;
- Si ni équipement ni pièce ne sont disponibles dans le stock et dans les différents postes, on attend toutes les phases de réparation pour que la machine devienne à nouveau disponible.

Dans cette technique de remplacement 2<sup>e</sup> niveau, on retrouve une modélisation d'un système de production composé de deux mailles et adoptant une gestion de type **Base Stock**. Le modèle RFA correspondant à cet AdM est donné dans la figure 4.8. Dans la 1<sup>re</sup> maille, on a un stock d'équipements avec un niveau initial  $S_1$ , et dans la 2<sup>e</sup> maille, un stock de pièces avec un niveau initial  $S_2$ . La particularité de ce modèle est que dès qu'un équipement est transféré vers l'AdM, au niveau de chaque maille, une information est instantanément transmise vers une autre file  $D_i$ . Ainsi, une demande d'équipements est transmise vers la file  $D_1$  et une autre demande, cette fois-ci de pièces, est transmise vers la file  $D_2$ .

On utilise à nouveau les méthodes analytiques développées au LAG [Duri, 1997]. Ainsi, on détermine le niveau du stock d'équipements et de pièces de rechange à partir d'un temps de séjour  $W_{M2}$  toléré pour chaque équipement dans l'AdM.

- ***Exemple d'application***

Soit le RFA correspondant à l'AdM avec remplacement du 2<sup>e</sup> niveau donné dans la figure 4.8. On utilise les méthodes analytiques approximatives pour évaluer les nouvelles performances de l'AdM en fonction du nombre de pinces et de pièces mises dans le stock, en particulier le temps de séjour de chaque pince dans l'AdM.

On utilise à nouveau la méthode approximative développée dans les travaux de thèse [Duri, 1997] pour évaluer les performances du nouvel AdM. On suppose que le coût d'une pièce est de 4 k Euros, avec une durée de maintenabilité d'une année, et

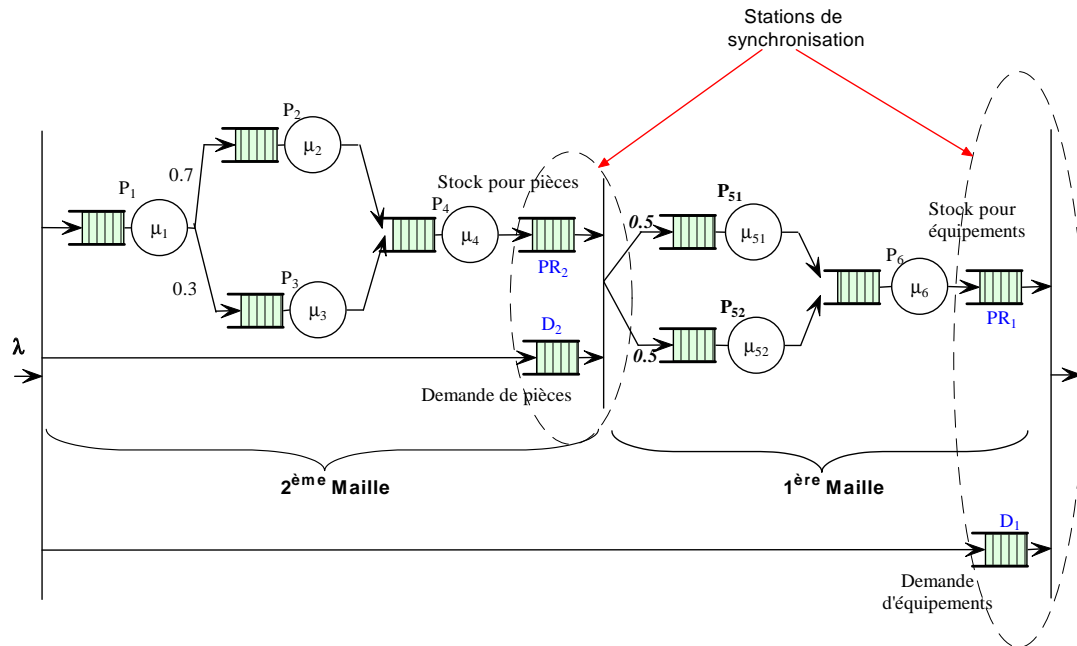


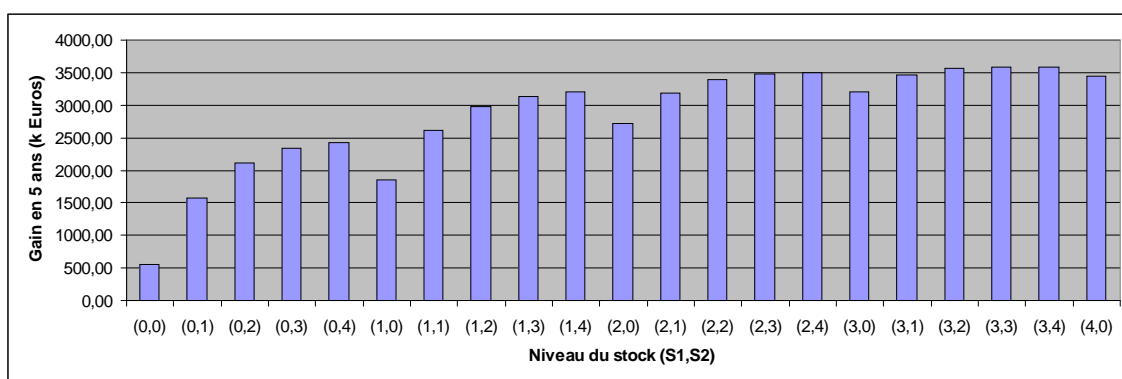
FIG. 4.8 – Modèle RFA de l'AdM avec remplacement du 2e niveau

les frais annuels supplémentaires sont estimés à 2 k Euros. On analyse les paramètres de performances de l'AdM pour différentes combinaisons des valeurs de  $S_1$  et  $S_2$ . Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.6.

$(S_1, S_2)$	$W_T$	$C_{PA}$	$CI_{1A}$	$CI_{AS}$	$CP_{SA}$	$G_{SA}$
(0,0)	10,14	686,28	8,10	0,60	3441,88	554,62
(0,1)	7,01	474,44	14,10	6,60	2412,68	1583,82
(0,2)	5,37	363,44	20,10	12,60	1887,71	2108,79
(0,3)	4,59	310,65	26,10	18,60	1653,76	2342,74
(0,4)	4,24	286,96	32,10	24,60	1565,32	2431,18
(1,0)	6,14	415,56	43,10	5,60	2143,28	1853,22
(1,1)	3,80	257,18	49,10	11,60	1381,42	2615,08
(1,2)	2,62	177,32	55,10	17,60	1012,11	2984,39
(1,3)	2,07	140,10	61,10	23,60	855,99	3140,51
(1,4)	1,82	123,18	67,10	29,60	801,39	3195,11
(2,0)	3,44	232,82	78,10	10,60	1284,60	2711,90
(2,1)	1,97	133,33	84,10	16,60	817,15	3179,35
(2,2)	1,25	84,60	90,10	22,60	603,50	3393,00
(2,3)	0,90	60,91	96,10	28,60	515,06	3481,44
(2,4)	0,77	52,11	102,10	34,60	501,07	3495,43
(3,0)	1,82	123,18	113,10	15,60	791,39	3205,11
(3,1)	0,99	67,00	119,10	21,60	540,52	3455,98
(3,2)	0,59	39,93	125,10	27,60	435,16	3561,34
(3,3)	0,41	27,75	131,10	33,60	404,24	3592,26
(3,4)	0,32	21,66	137,10	39,60	403,79	3592,71
(4,0)	0,93	62,94	148,10	20,60	545,21	3451,29

TAB. 4.6 – Performances de l'AdM avec remplacement du 2ème Niveau

Les nouvelles performances obtenues déterminent, pour un coût d'investissement  $CI_{5A}$  en pièces et en pinces pendant 5 ans, les coûts de perte  $CP_{5A}$  ainsi que le gain  $G_{5A}$  pour la même période, c'est-à-dire 5 ans. L'histogramme de la figure 4.9 détermine le gain  $G_{5A}$  obtenu au bout de 5 ans en fonction du niveau des stocks  $S_1$  et  $S_2$ . Ce qui permet de dimensionner d'une manière optimale le magasin du stock de pièces de rechange, autrement dit trouver un compromis entre la minimisation du temps de séjour, l'investissement dans le stockage des pinces et des pièces ainsi que l'augmentation du bénéfice. A titre d'exemple, il est préférable de stocker 2 pinces et 3 pièces ( $(S_1, S_2) = (2, 3)$ ), que de stocker 3 pinces uniquement ( $(S_1, S_2) = (3, 0)$ ). En effet, à partir des résultats obtenus, pour le cas  $(S_1, S_2) = (2, 3)$ , les coûts d'investissement durant les 5 années sont évalués à 124,70 k Euros et le gain au bout de 5 ans à 3481,44 k Euros. Par contre, pour le cas  $(S_1, S_2) = (3, 0)$ , les coûts d'investissement sont évalués à 128,70 k Euros et le gain au bout de 5 ans à 3205,11 k Euros seulement.

FIG. 4.9 – Gain en fonction du niveau des stocks  $(S_1, S_2)$ 

## 4.7 Mise en œuvre d'une interface graphique d'un atelier de maintenance

Dans le cadre d'un stage de deuxième année ingénieur en Informatique Industrielle et Instrumentation [Giovannacci, 2003], une interface graphique a été réalisée pour concevoir et évaluer les performances d'un atelier de maintenance à partir du modèle développée dans le paragraphe 4.6. Cette interface est une extension du logiciel ALOSURF (Atelier LOGiciel de SUReté de Fonctionnement) développé au départ par O. Daniel [Daniel, 1995] et amélioré par C. Sassine [Sassine, 1998] en intégrant les différentes politiques de maintenance. Le stagiaire s'est basé sur l'organisation structurelle développée dans notre

étude pour élaborer un processus de réparation donné.

A partir de cette interface, on peut établir plusieurs structures organisationnelles de l'atelier de maintenance et évaluer ses performances. Notons que l'application considère seulement la maintenance corrective dans l'AdM sans appliquer la technique de réparation par remplacement. La figure 4.10 illustre la fenêtre principale pour élaborer le cycle de réparation d'un équipement défectueux.

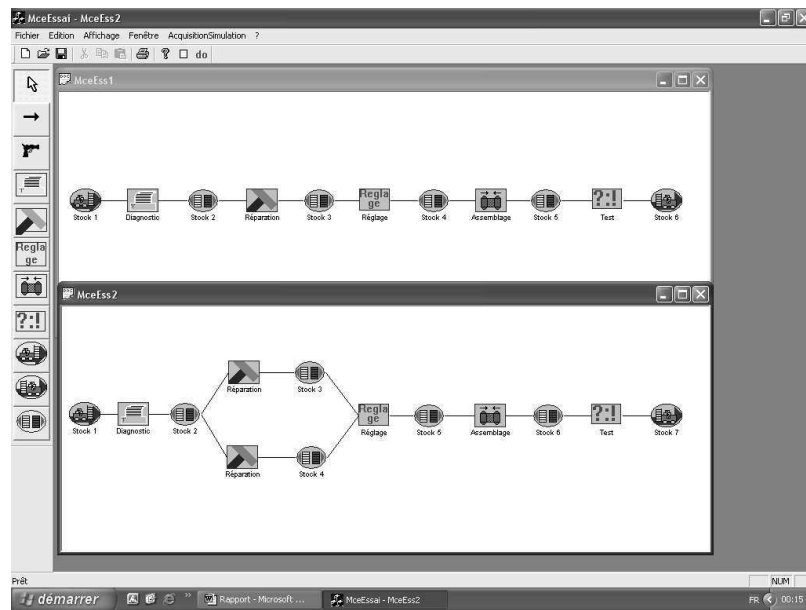


FIG. 4.10 – Elaboration du cycle de réparation avec l'interface graphique

Une fois le cycle de réparation établi, on saisit les différents paramètres liés à chaque poste d'intervention tels que le taux de chargement et le taux de service du poste. La fenêtre de saisie des paramètres est illustrée dans la figure 4.11.

Avant de lancer la simulation, il faut bien sûr préciser le taux d'arrivée - qui est aléatoire - des équipements dans l'atelier de maintenance ainsi que la durée de simulation. Les résultats de la simulation sous forme d'histogramme déterminent le taux d'occupation de chaque poste d'intervention. Ceci est intéressant pour déterminer le poste d'intervention le plus chargé pour le dupliquer afin d'améliorer les performances de l'atelier de maintenance. Les résultats de simulation de l'exemple décrit dans la figure 4.10 sont illustrés dans la figure 4.12.

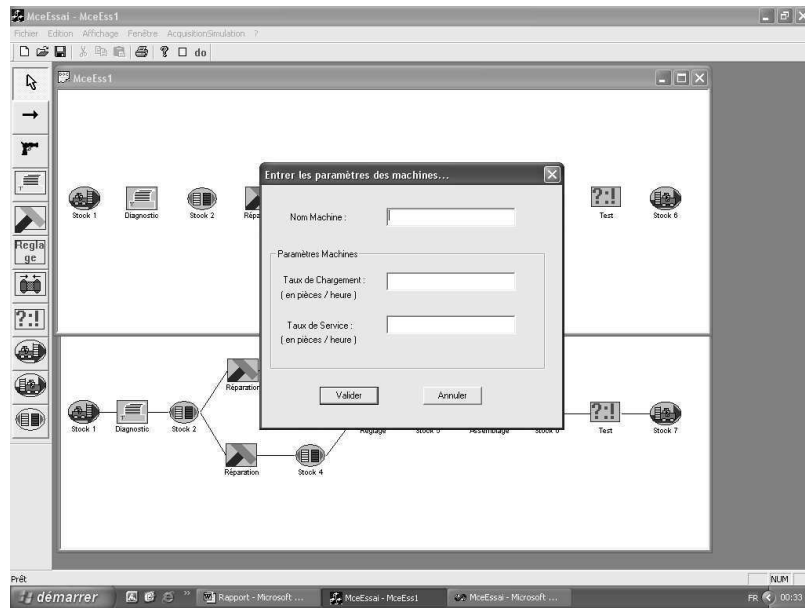


FIG. 4.11 – Saisie des paramètres des postes d'intervention

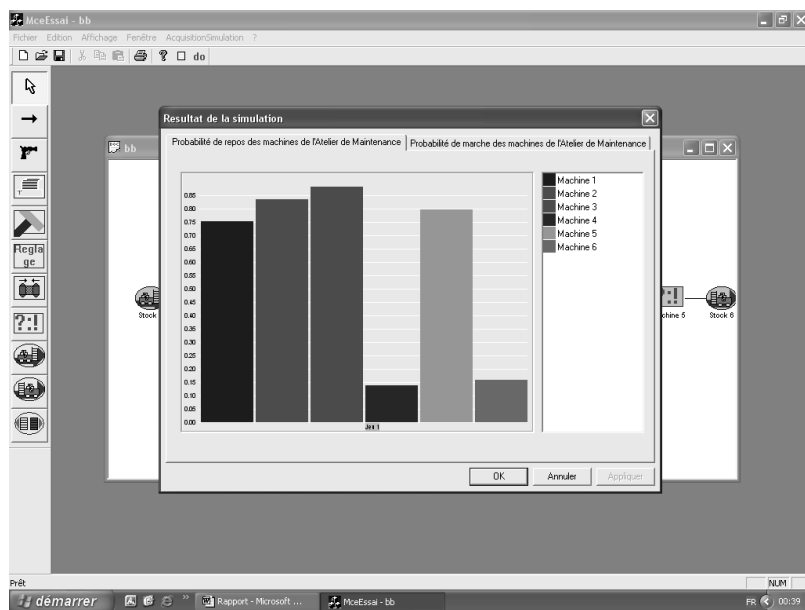


FIG. 4.12 – Résultats de la simulation

## 4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le dimensionnement de l'atelier de maintenance selon des contraintes fixées au départ pour le cas de la maintenance corrective seule. Le principal indicateur de performances retenu dans ce cas est le temps d'indisponibilité limite d'une machine. Deux phases ont été établies. Dans une première phase, on détermine

le cycle de réparation des différents équipements pour obtenir une structure de l'atelier qui garantit un temps de réparation inférieur au temps d'indisponibilité maximum toléré et engendre le moindre coût. Dans la seconde phase, on applique la technique de réparation par remplacement pour améliorer la disponibilité des équipements. Ce qui nous a permis de dimensionner d'une manière optimale le niveau du stock des équipements et des pièces de rechange. Toutefois, la maintenance préventive n'a pas été prise en compte lors du dimensionnement. Le chapitre suivant est dédié au dimensionnement de l'AdM dans le cas où les deux politiques de maintenance sont appliquées.



## Chapitre 5

# *Dimensionnement de l'AdM : Cas des deux types de maintenance*

*Dans ce chapitre, les deux politiques de maintenance (corrective et préventive) sont prises en compte lors du dimensionnement de l'atelier de maintenance. On tient compte aussi de la priorité des machines et de la technicité des opérateurs. Les réseaux de Petri stochastiques généralisés sont utilisés pour modéliser et évaluer les performances de l'AdM. Pour rendre l'impact de l'atelier de maintenance plus efficace par rapport aux critères économiques de l'entreprise, la minimisation du coût des opérations de maintenance est établie selon deux stratégies de maintenance appliquées sur les machines des unités de production (maintenance intégrée ou maintenance par sous-traitance). Ainsi, le choix de stratégie de maintenance appliquée est à déterminer pour chaque machine afin d'améliorer le gain total de l'entreprise.*





## 5.1 Introduction

Dans le chapitre 3, on a abordé en détail les différentes phases de conception d'un atelier de maintenance. Rappelons qu'à partir de l'analyse fonctionnelle des machines de l'ensemble des unités de production, on définit l'organisation structurelle de l'AdM et on détermine les types de ressources adéquates aux machines sélectionnées par ordre de priorité à la maintenance. Aussi, un plan de maintenance peut être établi à partir des informations disponibles au moment de l'analyse et sur des critères à prédominance technique. L'évaluation des performances de l'atelier de maintenance établie au chapitre 4 nous permet de dimensionner les ressources de l'AdM selon les besoins de production et/ou maintenance dans le cas de la maintenance corrective seule.

Dans ce chapitre, on intègre la maintenance préventive systématique dans l'AdM pour éviter la dégradation des machines et réduire le nombre d'arrêts fortuits. On tient compte aussi de la priorité des machines obtenue lors de leur classement par rapport à la maintenance, de la compétence des techniciens et des types d'équipements à mettre dans le stock associés à chaque type de machine. On obtient alors un modèle plus complexe. De ce fait, l'utilisation des méthodes analytiques pour évaluer les performances de l'AdM devient fastidieuse. En effet, la prise en compte des paramètres d'aide à la décision sur le choix de stratégie de maintenance à appliquer pour chaque machine, est assez délicate vue la complexité de résolution des équations engendrées. Plutôt que de développer un outil basé sur les méthodes analytiques pour dimensionner l'atelier de maintenance vis-à-vis des différentes ressources, on utilisera la simulation basée sur les réseaux de Petri stochastiques généralisés. Nous introduisons dans ce qui suit quelques rappels sur la simulation et sur l'outil réseau de Petri stochastique.

### 5.1.1 Utilisation de la simulation

Dans certains cas, la complexité du système étudié engendre des équations dont la résolution est assez délicate, ce qui rend l'utilisation des méthodes analytiques très difficile. Dans ces cas, on préfère faire appel à la simulation qui consiste à reproduire l'évolution du modèle, pas à pas, et en étudiant une réalisation particulière du modèle stochastique. L'avantage de la simulation est d'offrir une approche très générale permettant d'étudier n'importe quel modèle dès l'instant où l'outil de simulation est adapté au modèle considéré. Seulement, le gros inconvénient de la simulation est le temps de calcul qui peut être considérable.

Il existe plusieurs logiciels de simulation, basés sur différents modèles. Dans le cas où les deux politiques de maintenance sont intégrées, nous utiliserons le logiciel MissRdP [GFI, 2002] reposant sur le modèle Réseau de Petri Stochastique Généralisé (RdPSG). Nous présentons dans ce qui suit quelques notions de base sur les réseaux de Petri stochastiques (RdPS).

### 5.1.2 Réseaux de Petri stochastiques

Les réseaux de Petri constituent un outil très bien adapté à la modélisation et l'analyse de systèmes complexes présentant de la concurrence et de la synchronisation. Ils ont été introduits par Carl Adam Petri en 1962 afin de décrire le comportement global des systèmes complexes et effectuer des analyses qualitatives. Plus tard, en 1978, G. Florin et S. Natkin ont introduit les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) dont la définition est comme suit :

**Définition 5.1.** Un réseau de Petri stochastique est un 5-uplet [Florin et al., 1991] :

$$RdP = (P, T, E, \mu, M_0) \tag{5.1}$$

**P** : ensemble des places :  $P = (P_1, P_2, \dots, P_x)$  ;

**T** : ensemble des transitions  $T = (T_1, T_2, \dots, T_y)$ . A chaque transition  $T_i$  est associé un taux de franchissement  $\mu_i$  ;

**E** : ensemble des arcs ;

$\mu$  : ensemble des taux de franchissement  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_y)$  ;

$M_0$  : vecteur marquage initial.

■

Les RdPS ont été introduits pour répondre à des problèmes informatiques liés à la sûreté de fonctionnement. Ces problèmes faisant intervenir des phénomènes aléatoires, on associe des temps de franchissement aléatoires (donc non déterministes) distribués par une loi exponentielle aux transitions du réseau de Petri (figure 5.1).

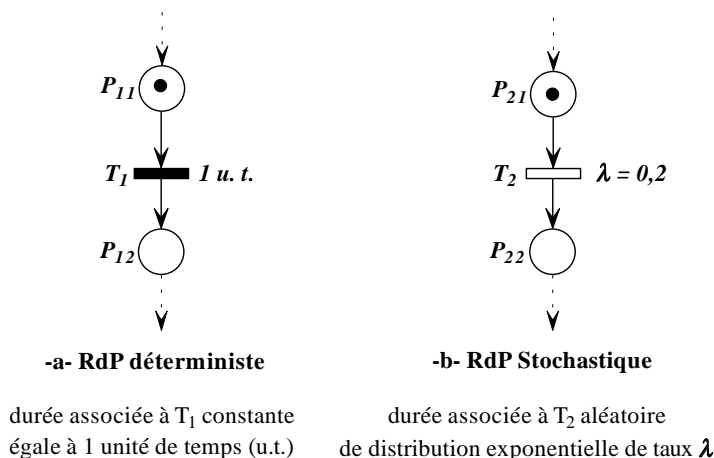


FIG. 5.1 – RdP déterministe et RdP stochastique

### 5.1.3 Classes de réseaux de Petri stochastiques

De nombreuses classes de RdPS sont proposées pour l'analyse des performances des systèmes de production. Les caractéristiques des différentes classes se situent essentiellement dans la nature des transitions utilisés, où des lois autres qu'exponentielle leur sont associées [Amodeo, 1999]. Parmi les classes existantes, on cite :

- *Réseaux de Petri stochastiques généralisés* : le réseau se compose, en plus des transitions avec une temporisation aléatoire de loi de distribution exponentielle, des transitions avec une temporisation nulle (transitions immédiates) [Marsan et al., 1991].
- *Réseaux de Petri stochastiques et déterministes* : cette classe de réseau contient des transitions immédiates, des transitions à temporisation déterministe et des transitions à temporisations stochastiques distribuées avec une loi exponentielle [Ciardo et Lindemann, 1993].
- *Réseaux de Petri stochastiques régénérateurs markoviens* : c'est une généralisation des réseaux de Petri stochastiques généralisés [Choi et al., 1994]. Le réseau comporte des transitions immédiates, des transitions déterministes et des transitions à temporisations stochastiques distribuées avec une loi quelconque.
- *Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés à Synchronisations Internes* : ces réseaux permettent de réaliser une modélisation modulaire et fonctionnelle d'un système [Daniel, 1995]. Chaque fonctionnalité du système est décrite par un réseau de Petri Stochastique Généralisé et ses différents réseaux sont synchronisés entre eux par émission et réception de données.

Dans cette étude, dans le cas de prise en compte d'autres politiques de maintenance, nous aurons recours à la simulation vu la complexité de résolution des équations sous-jacentes. Il existe plusieurs logiciels de simulation basés sur différents outils. Nous choisissons d'utiliser le logiciel MissRdP (Modélisation Interactive et Simulation de systèmes basée sur les Réseaux de Petri), avec possibilité d'émettre et de recevoir des données entre les différents blocs modulaires modélisant les fonctionnalités du système de production et de l'atelier de maintenance.

## 5.2 Dimensionnement dans le cas des maintenances corrective et préventive

On considère le même système de production décrit dans l'exemple du chapitre 3, dont les machines sont classées par ordre de priorité. On considère que la défaillance de chaque machine est due à un seul équipement. Par contre, les équipements des diverses machines sont différents les uns des autres. De plus, vue la diversité techniques des machines, les phases de réparation sur les postes  $P_2$  et  $P_3$  ainsi que le remplacement d'un équipement par un autre équivalent, nécessitent un technicien d'une compétence de type  $A$  (par exemple un "automaticien"). Tandis que les autres phases restantes de réparation sur les postes  $P_1$ ,  $P_4$ ,  $P_5$  et  $P_6$  sont effectuées par un autre technicien de compétence de type  $B$  (par exemple un "mécanicien"). En ce qui concerne les activités de maintenance préventive, elles peuvent être réalisées par les deux types de techniciens. Pour des raisons de clarté des modèles obtenus, on applique dans cette partie la technique de réparation par remplacement seulement au 1<sup>er</sup> niveau.

### 5.2.1 Procédure de dimensionnement

Le critère de dimensionnement dans le cas d'intégration des deux politiques de maintenance est d'avoir un taux de rendement synthétique minimal  $TRS_{MaxM_i}$  de chaque machine  $M_i$  sans dépasser la charge horaire maximale  $CH_{Max}$  fixée pour tous les techniciens sans distinction de compétence.

Initialement, le stock d'équipements de rechange est vide et l'atelier de maintenance possède les postes de réparation et un seul technicien pour chaque compétence requise. On note :

$PR_i$  : Nombre d'équipements dans le stock pour le remplacement en cas de défaillance

---

de la machine  $M_i$  ;

$Nb_{Tech_k}$  : Nombre de techniciens de compétence de type  $k$ .

Les étapes du dimensionnement de l'AdM dans le cas d'intégration des politiques de maintenance préventive et corrective sont décrites dans l'algorithme suivant.

**Algorithme 5.1.** *Dimensionnement de l'AdM avec intégration des 2 politiques de maintenance :*

**Pas 1** - Pour une durée d'ouverture donnée, évaluer :

$TRS_{M_i}$  : le taux de rendement synthétique de chaque machine  $M_i$  ;

$CH_{jk}$  : la charge horaire de chaque technicien  $Tech_j$  de compétence de type  $k$ .

**Pas 2** - Vérifier les critères de dimensionnement :

**2.1-** Sur l'ensemble de toutes les machines :

**TANT QUE**  $TRS_{M_i} < TRS_{Max_{M_i}}$

$PR_i := PR_i + 1$  ;

**2.2-** Sur l'ensemble de tous les techniciens :

**TANT QUE**  $CH_{jk} > CH_{Max}$

$Nb_{Tech_k} := Nb_{Tech_k} + 1$  ;

**2.3-** Aller au **Pas 1**.

■

## 5.2.2 Exemple illustratif

Soit une unité de production composée de 3 machines (figure 5.2). On suppose qu'il y a toujours des pièces brutes dans le stock d'entrée  $SE$ . Les machines  $M_1$  et  $M_2$  exécutent des tâches différentes ayant chacune un stock intermédiaire respectivement  $SI_1$  et  $SI_2$ , et  $M_3$  est une machine d'assemblage avec un stock de sortie  $SS$ . Tous les stocks sont supposés à capacité non limitée. Lors du classement des machines par rapport à la maintenance à partir de leurs caractéristiques techniques, l'ordre de priorité est comme suit :  $M_3$ ,  $M_1$  puis  $M_2$ . L'arrêt imprévu d'une machine est dû à la défaillance d'un seul équipement. Les équipements des 3 machines sont différents les uns des autres.

La structure de l'atelier de maintenance est celle représentée par la figure 4.3. Seulement, deux types de techniciens sont nécessaires :

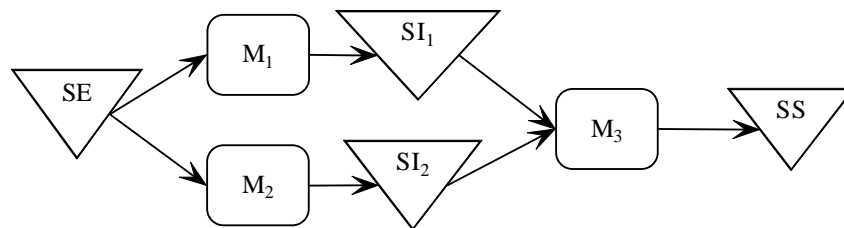


FIG. 5.2 – Exemple d’une unité de production composée de 3 machines

- Un technicien ayant une compétence de type  $A$  pour des interventions sur les postes  $P_2$  et  $P_3$  ainsi que pour le remplacement d’un équipement défaillant ;
- Un technicien ayant une compétence de type  $B$  pour des interventions sur les postes  $P_1, P_4, P_5$  et  $P_6$ .

Néanmoins, les deux types de techniciens sont en mesure de réaliser les interventions préventives sur les 3 machines. Pour la notation,  $Tech(T_A, T_B)$  désigne l’ensemble des techniciens, où  $T_A$  correspond au nombre de techniciens ayant une compétence de type  $A$ , et  $T_B$  correspond au nombre de techniciens ayant une compétence de type  $B$ .

Initialement, le stock d’approvisionnement en équipements de rechange est vide. Ce stock est désigné par  $S(S_1, S_2, S_3)$ , où  $S_i$  représente le nombre d’équipements pour la machine  $M_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

### 5.2.3 Modélisation avec les réseaux de Petri stochastiques

Par souci de clarté, trois phases de modélisation sont établies : - phase de production ; - phase de maintenance ; -phase du cycle de réparation dans l’AdM.

#### 5.2.3.1 Modélisation des phases de production

Le modèle réseaux de Petri stochastiques (RdPS) obtenu est illustré dans la figure 5.3.

Chaque machine  $M_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) est caractérisée par 2 états :

$M_i\_L$  : la machine  $M_i$  est libre ;

$M_i\_O$  : la machine  $M_i$  est occupée.

Comme le stock d’entrée  $SE$  est supposé toujours non vide, son marquage est régénéré dès le chargement de pièces sur chacune des 2 machines  $M_1$  et  $M_2$ , représenté par la transition

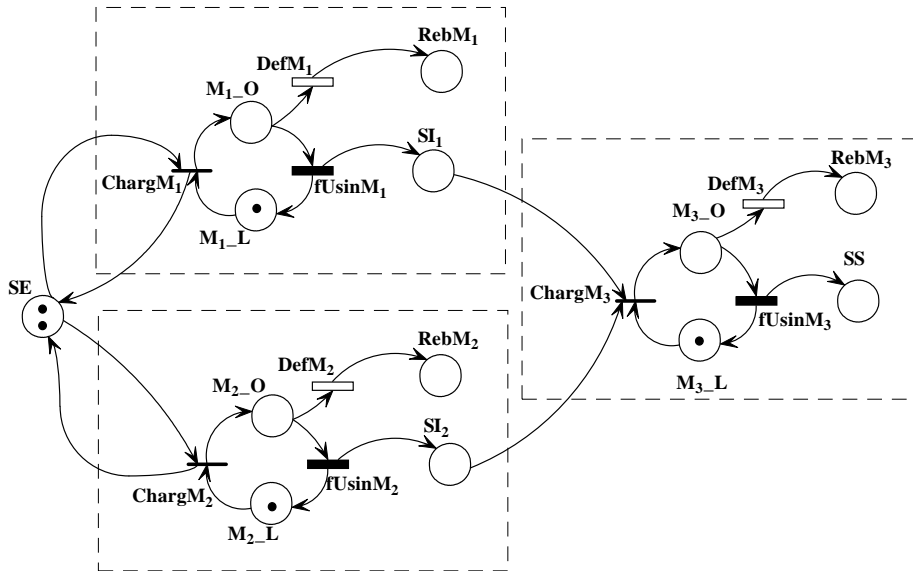


FIG. 5.3 – Modélisation des phases de production

immédiate respective  $ChargM_1$  et  $ChargM_2$ . Les durées d'usage sont associées aux transitions déterministes  $fUsinM_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Les durées associées aux transitions  $DefM_i$  sont aléatoires de distribution exponentielle avec un taux correspondant au taux de défaillance de la machine  $M_i$ . Si l'usage est bon, une pièce est mise dans le stock aval de la machine correspondante ( $SI_1$ ,  $SI_2$  ou  $SS$ ). Si par contre la machine  $M_i$  tombe en panne au cours d'usage, la pièce est mise au rebut, représenté par la place  $RebM_i$ .

### 5.2.3.2 Modélisation des phases de maintenance

Le modèle RdPS représentant les phases de maintenance d'une machine  $M_i$  est illustré dans la figure 5.4.

On désigne les 2 états de fonctionnement (libre, occupé) de chaque machine  $M_i$  par un état *opérationnel*, désigné par la place  $M_i\_Op$ . Deux phases de maintenance sont à distinguer : phase de maintenance corrective et phase de maintenance préventive.

Rappelons que les réseaux de Petri stochastiques utilisés sont à synchronisations internes. Ainsi, quand une machine  $M_i$  tombe en panne, la transition  $Def\_M_i$  de la figure 5.3 est franchie et une information est générée précisant que  $M_i$  est hors-service. La transition immédiate  $M_iDef$  est alors franchie et  $M_i$  est en état d'attente d'une maintenance corrective, représenté par la place  $M_i\_AMC$ , avec transfert de la partie défaillante de la



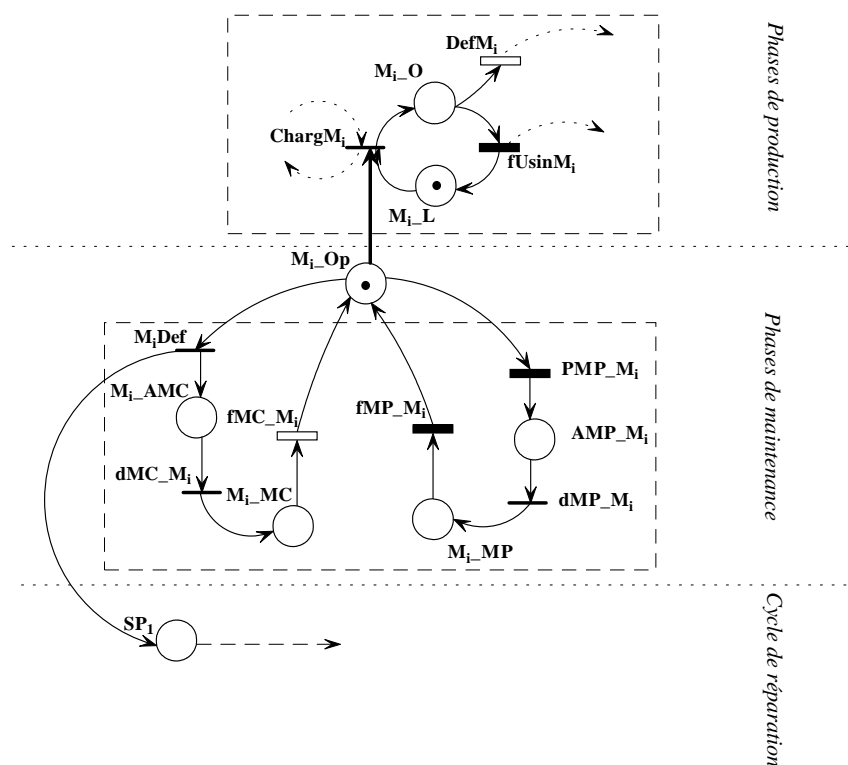


FIG. 5.4 – Modélisation des phases de maintenance de la machine  $M_i$

machine vers le stock d'entrée  $SP_1$  du poste *Diagnostic et Désassemblage* de l'AdM. Si un équipement équivalent de la machine  $M_i$  est disponible dans le stock et un technicien de compétence de type *A* est disponible, on effectue le remplacement. Si le poste *Diagnostic et Désassemblage* et un technicien de compétence de type *B* sont libres, on entame la réparation sur ce poste.

Concernant la phase de maintenance préventive, un échancier est déclenché pour chaque remise d'une machine  $M_i$  en état de fonctionnement. Une fois cet échancier atteint, la machine  $M_i$  est mise en état d'attente d'une maintenance préventive, représenté par la place  $M_i\_AMP$ . S'il y a un technicien de disponible, on effectue la maintenance préventive, état représenté par la place  $M_i\_MP$ .

### 5.2.3.3 Modélisation du cycle de réparation dans l'atelier de maintenance

Lors de la défaillance d'une machine, l'équipement défectueux est transféré vers le poste  $P_1$  du service maintenance. Au niveau de la modélisation, chaque poste d'intervention  $P_i$  est caractérisé par deux états :

$P_i\_L$  : le poste  $P_i$  est libre ;

$MP_i\_O$  : le poste  $P_i$  est occupé.

Le modèle RdPS représentant le cycle de réparation d'un équipement dans l'AdM est illustré dans la figure 5.5.

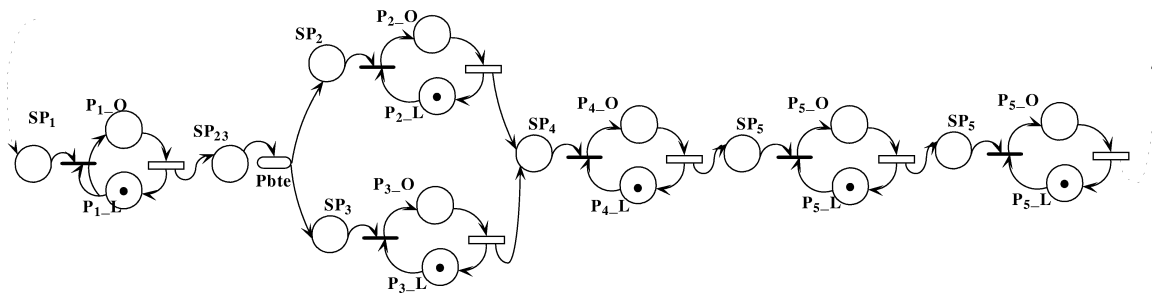


FIG. 5.5 – Modélisation du cycle de réparation dans l'AdM

### 5.2.4 Évaluation et dimensionnement de l'atelier de maintenance

Lors de l'évaluation et l'analyse des performances de l'atelier de maintenance, on a utilisé un logiciel nommé *MissRdP* (Modélisation Interactive et Simulation des Systèmes avec Les Réseaux de Petri) [GFI, 2002] et basé sur la théorie des réseaux de Petri colorés et stochastiques. Comme valeurs numériques des contraintes imposées, le taux de rendement synthétique minimum des 3 machines est fixé à 67% et la charge horaire maximale des différents techniciens à 60%. On réitère l'algorithme 5.1 jusqu'à ce que les critères de dimensionnement soient satisfaits. On obtient les résultats suivants selon la configuration de l'atelier de maintenance.

1. *Configuration* :  $S(0, 0, 0)$  et  $Tech(1, 1)$

Initialement, le stock est vide ( $S(0, 0, 0)$ ) et deux techniciens de compétence différente sont disponibles ( $Tech(1, 1)$ ). En utilisant le logiciel *MissRdP*, on évalue les performances de l'AdM. Les résultats sont récapitulés dans l'histogramme de la figure 5.6.

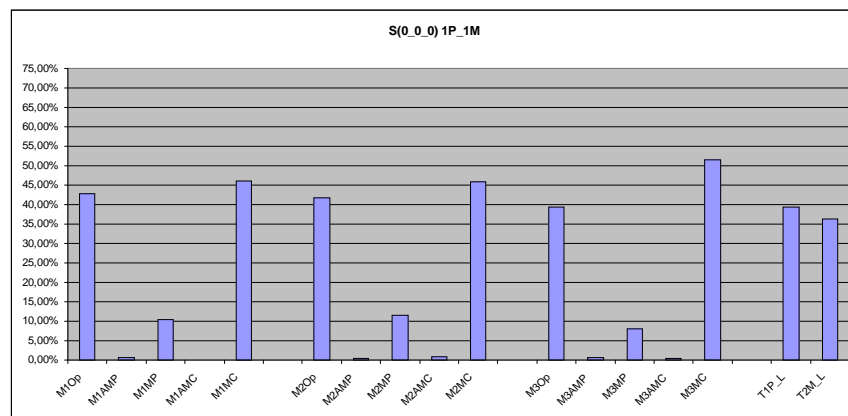


FIG. 5.6 – Performances de l’AdM pour la configuration  $S(0, 0, 0)$  et  $Tech(1, 1)$

En comparant les performances obtenues par rapport aux critères de dimensionnement fixés, on remarque que cette configuration ne permet pas de satisfaire les contraintes imposées, en particulier les taux de rendement synthétiques des 3 machines. Dans la configuration suivante, on mettra un équipement de rechange pour chaque machine.

2. Configuration :  $S(1, 1, 1)$  et  $Tech(1, 1)$

Pour la nouvelle configuration de l’AdM, les performances obtenues sont récapitulées dans l’histogramme de la figure 5.7.

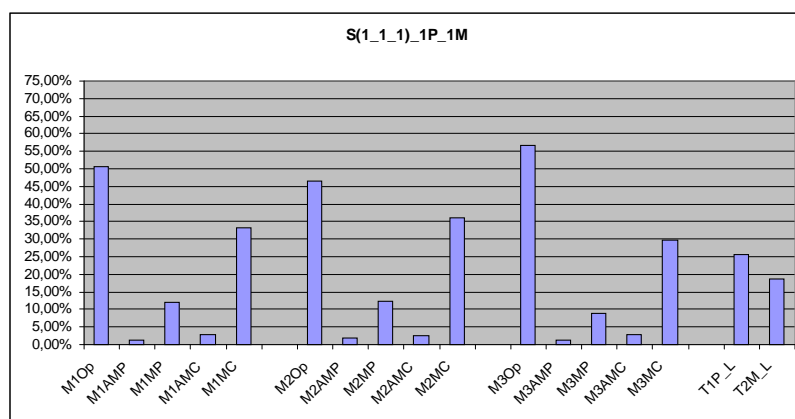


FIG. 5.7 – Performances de l’AdM pour la configuration  $S(1, 1, 1)$  et  $Tech(1, 1)$

On remarque que pour cette nouvelle configuration, les contraintes ne sont pas encore satisfaites. En effet, les taux de rendement synthétiques sont inférieurs à ceux imposés. De plus, la charge du technicien de compétence de type  $B$  dépasse

la charge horaire autorisée. On rajoute alors un autre technicien de compétence de type  $B$  ainsi qu'un autre équipement de rechange pour chacune des 3 machines.

### 3. Configuration : $S(2, 2, 2)$ et $Tech(1, 2)$

Les performances de cette nouvelle configuration de l'AdM sont récapitulées dans l'histogramme de la figure 5.8.

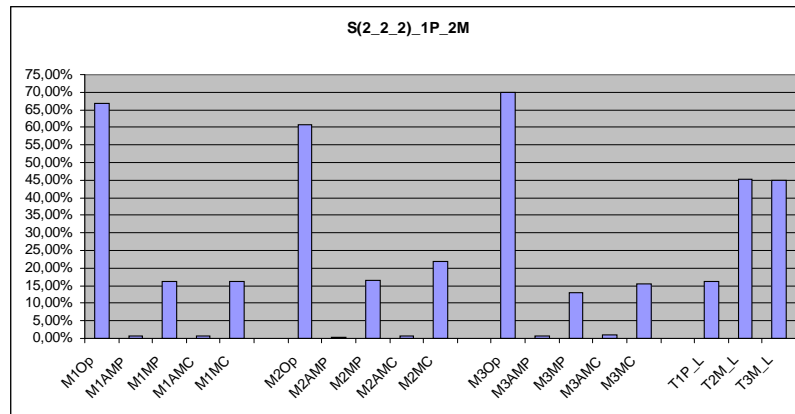


FIG. 5.8 – Performances de l'AdM pour la configuration  $S(2, 2, 2)$  et  $Tech(1, 2)$

Pour cette configuration, on voit bien que la condition sur le taux de rendement synthétique de chaque machine est satisfaite. Néanmoins, la charge du technicien, cette fois-ci de compétence de type  $A$  dépasse la charge horaire autorisée. On rajoute alors dans la prochaine configuration un autre technicien de compétence de type  $A$ .

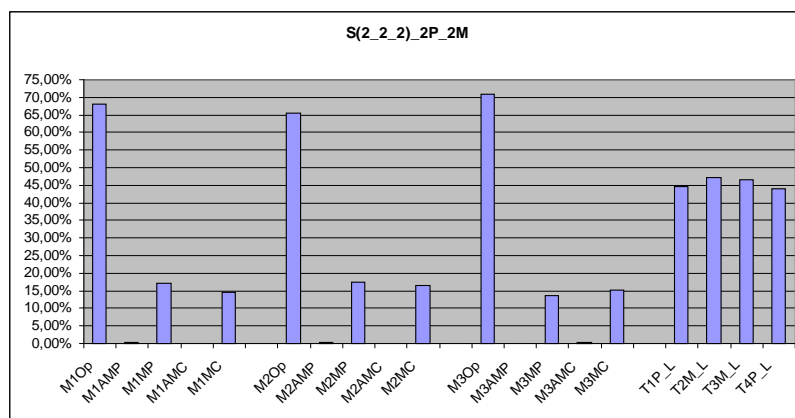
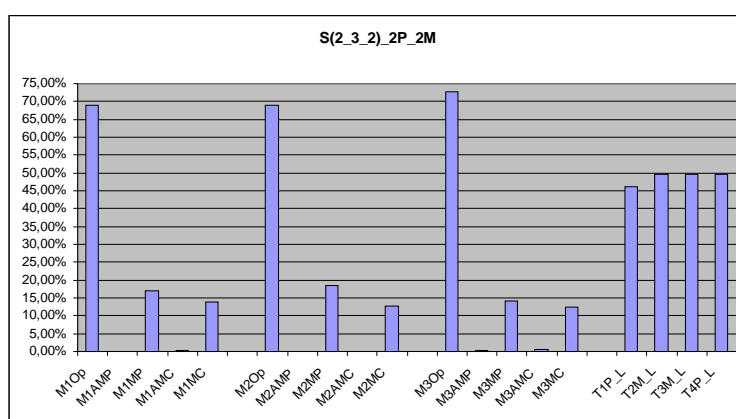
### 4. Configuration : $S(2, 2, 2)$ et $Tech(2, 2)$

Les résultats obtenus avec le logiciel MissRdP pour la nouvelle configuration sont récapitulés dans l'histogramme de la figure 5.9.

Cette fois-ci, les charges horaires sont respectées. Reste seulement le taux de rendement synthétique de la machine  $M_2$  qui n'est pas satisfait. On rajoute dans la configuration suivante un équipement de remplacement uniquement pour la machine  $M_2$ .

### 5. Configuration : $S(0 = 2, 3, 2)$ et $Tech(2, 2)$

Les performances obtenus pour cette configuration sont récapitulées dans l'histogramme de la figure 5.10.

FIG. 5.9 – Performances de l'AdM pour la configuration  $S(2, 2, 2)$  et  $Tech(2, 2)$ FIG. 5.10 – Performances de l'AdM pour la configuration  $S(2, 3, 2)$  et  $Tech(2, 2)$ 

Cette fois, les critères de dimensionnement de l'AdM sont tous satisfaits. Ainsi, on obtient la configuration de l'AdM qui répond aux besoins attendus.

## 5.3 Minimisation du coût des opérations de maintenance

### 5.3.1 Rôle du retour d'expérience

Le plan de maintenance initial établi à partir des informations disponibles au moment de l'analyse des différentes machines de production constitue la base d'un programme de maintenance évolutif et dynamique, qui sera modifié au fur et à mesure par le retour d'expérience. L'ensemble des machines sélectionnées nécessite une logistique de maintenance permettant de collecter les données et de les analyser durant le cycle de vie de

chaque machine. De cette façon, le retour d'expérience permet d'améliorer le programme de maintenance en examinant l'efficacité de chaque intervention de maintenance et en comparant son coût par rapport au coût de la défaillance qu'elle évite ou par rapport au coût engendré si cette action de maintenance aurait été sous-traitée surtout pendant les périodes de grande activité où les ressources de maintenance sont moins disponibles. La détermination de type de stratégie de maintenance (interne, externe) à appliquer pour chaque machine pose en effet un problème de choix entre ces deux alternatives dont les coûts engendrés ne sont pas toujours évidents à évaluer. Procéder à ce type de choix nécessite alors de tenir compte de facteurs économiques et techniques dynamiques caractérisant chaque machine.

En outre, connaître les coûts de maintenance en détail : par nature (personnel interne, sous-traitants, outillage, pièces de rechange), par type (maintenance préventive, maintenance corrective), par unité de production, permet d'orienter efficacement toutes les décisions liées à la gestion de la maintenance du site de production. Seulement, l'évaluation exacte de ces coûts s'avère délicate vu les diverses interactions entre les phases de production et celles de maintenance. Néanmoins, certaines questions auxquelles il faut répondre permettent d'orienter les stratégies de maintenance, afin d'améliorer le bénéfice de l'entreprise, telles que :

- Quel est le budget maximal pour l'investissement dans les ressources de maintenance ?
- Quel serait le niveau du stock de pièces de rechange le plus économique et qui satisfasse la disponibilité requise ?
- Serait-il opportun de sous-traiter telle machine ?
- Ne vaut-il pas mieux appliquer une maintenance mixte sur cet ensemble d'équipements ?

Rappelons que le fait de centraliser le service maintenance vise deux objectifs principaux :

- minimiser le coût d'investissement dans les différentes ressources de maintenance ;
- réduire les coûts directs des interventions de maintenance ;
- atteindre un objectif de disponibilité des machines fixé, afin de limiter les perturbations du flux de production consécutives aux arrêts de maintenance.

L'objectif final, d'ordre économique, consiste à minimiser les coûts des activités de maintenance qu'il faut donc évaluer. Ainsi, les principaux coûts *directs* et *indirects* sont pris en compte dans le calcul du coût d'une intervention de maintenance.

### 5.3.2 Estimation des coûts associés aux activités de maintenance

#### *Notation*

$\tau_i$  - taux d'usinage de la machine  $M_i$ .

$P_i$  : prix de la pièce usinée à l'étape  $i$  de  $M_i$ .

$P$  : prix de la pièce finale usinée.

$M_i^S$  : machine  $M_i$  dont les interventions de maintenance sont effectuées par la sous-traitance.

$M_i^I$  : machine  $M_i$  dont les interventions de maintenance sont effectuées en interne.

$CM(M_i^S)$  : coût des activités de maintenance sur la machine  $M_i^S$ .

$CM(M_i^I)$  : coût des interventions de maintenance sur la machine  $M_i^I$ .

$CHTech$  : coût horaire d'un technicien (Euros/heure).

$CHOp$  : coût horaire d'un opérateur (Euros/heure).

$C_{Po}(M_i)$  : coût du (des) poste(s) nécessaire(s) pour une intervention corrective sur  $M_i$ .

$C_{PR}(M_i)$  : coût des pièces de rechange de  $M_i$  pour la réparation par remplacement.

$N_{Pcc}(M_i)$  : nombre de pièces usinées par  $M_i$ .

$N_{MP}(M_i)$  : nombre d'interventions préventives sur  $M_i$ .

$N_{MC}(M_i)$  : nombre d'interventions correctives sur  $M_i$ .

$N_{Preb}(M_i)$  : nombre de pièces mises en rebut lors de la défaillance de  $M_i$ .

$N_{Pat}(M_i)$  : nombre de pièces en attente suite à la défaillance de  $M_i$ .

$D_{MP}(M_i)$  : durée d'une intervention préventive (heure).

$DT_{MP}(M_i)$  : durée totale des interventions préventives (heure).

$DT_{MC}(M_i)$  : durée totale des interventions correctives (heure).

$At_{MP}(M_i)$  : durée d'attente de la machine  $M_i$  pour des interventions préventives.

$At_{MC}(M_i)$  : durée d'attente de la machine  $M_i$  pour des interventions correctives.

$T_{NP}(M_i)$  : temps d'indisponibilité de  $M_i$ .

Soit une unité de production composée d'un ensemble de  $M$  machines. Chaque machine  $M_i$  est sujette à des défaillances aléatoires causées par un seul équipement démontable, de taux de défaillance  $\lambda_i$ . La réparation de tout équipement est réalisée dans l'atelier de maintenance pour effectuer les différentes phases (diagnostic, réparation proprement

dite, réglage et test). Ce qui permet de remettre l'équipement dans son état neuf. Afin de minimiser le nombre de défaillances, des interventions préventives sur chaque machine  $M_i$  sont programmées, de fréquence  $F_i$  et de durée  $D_{MP}(M_i)$ .

Soit  $G_P$  le gain de production réalisé par l'unité de production, et  $C_M$  le coût global des interventions de maintenance sur toutes les machines. Le bénéfice total  $G_B$  rapporté par l'unité est exprimé par :

$$G_B = G_P - C_M = G_P - \sum_{i=1}^M C_M(M_i) \quad (5.2)$$

L'optimisation du bénéfice total revient à réaliser un compromis entre le gain de production à améliorer et le coût des actions de maintenance à minimiser. La minimisation des coûts de maintenance, principalement dus aux défaillances, consiste à réduire les temps d'attente  $At_{MC}(M_i)$  et de réparation  $DT_{MC}(M_i)$  de chaque machine  $M_i$ . La solution apportée, comme nous l'avons évoqué dans les chapitres précédents, est d'établir une maintenance en interne, autrement dit, intégrer un atelier de maintenance. On peut encore minimiser les temps d'attente en appliquant la réparation par remplacement. Seulement, pendant des périodes de grande activité pendant lesquelles les ressources de maintenance sont moins disponibles, il est peut-être plutôt rentable de sous-traiter certaines activités de maintenance.

La problématique revient alors à déterminer, pour chaque machine  $M_i$ , le type de stratégie de maintenance (sous-traitance  $M_i^S$ , en interne  $M_i^I$ ) à appliquer. Ainsi, l'unité de production composée de  $M$  machines, correspondent  $2^M$  scénarios de stratégies. Pour déterminer la stratégie efficace de chaque machine, on évalue pour chaque scénario le bénéfice de l'unité de production, et on détermine celui qui donne un meilleur gain. Pour cela, les différents coûts de maintenance sont à évaluer en tenant compte des interactions entre les machines.

L'évaluation des coûts de maintenance de chaque machine  $M_i$  diffère selon si les activités de maintenance sont réalisées en interne (donc par intégration d'un atelier de maintenance) ou plutôt en externe (par des sous-traitants). Dans ce qui suit, nous élaborons les principaux coûts de maintenance en précisant l'expression correspondante du coût pour chaque alternative (maintenance en interne, maintenance en externe). Quand aucune spécification n'est mentionnée, l'expression du coût est identique pour les deux alternatives.



Les coûts de maintenance engendrés par la machine  $M_i$  correspondent à l'ensemble des coûts (directs et indirects) liés aux activités de maintenance.

$$C_M(M_i) = C_{DIR}(M_i) + C_{IND}(M_i) \quad (5.3)$$

### 5.3.2.1 Coûts directs de maintenance

Les coûts directs correspondent principalement aux coûts des interventions de maintenance préventive et corrective.

$$C_{DIR}(M_i) = C_{MP}(M_i) + C_{MC}(M_i) \quad (5.4)$$

#### - Coût de maintenance préventive

##### *Maintenance dans l'AdM*

Le coût de maintenance préventive est inclus dans l'investissement des techniciens de l'AdM.

##### *Maintenance par sous-traitance*

Le coût correspond à la durée totale des interventions préventives multipliée par le coût horaire d'un technicien.

$$C_{MP}^I(M_i) = DT_{MP}^I(M_i) \cdot CH_{Tech}^I = N_{MP}^I(M_i) \cdot D_{MP}^I(M_i) \cdot CH_{Tech}^I \quad (5.5)$$

#### - Coût de maintenance corrective

##### *Maintenance dans l'AdM*

Le coût de maintenance corrective est inclus dans l'investissement des techniciens de l'AdM.

##### *Maintenance par sous-traitance*

Le coût correspond à la durée totale des interventions correctives multipliée par le coût horaire d'un technicien.

$$C_{MC}^I(M_i) = DT_{MC}^I(M_i) \cdot CH_{Tech}^I \quad (5.6)$$

### 5.3.2.2 Coûts indirects de maintenance

Généralement, Les différents coûts indirects identifiés sont :

**- Coût de non production**

Ces coûts dus à l'indisponibilité de la machine sont calculés différemment suivant la nature de la machine considérée et de sa position dans l'unité de production [Charles, 2000] :

**Cas a** - Soit la machine représente un goulot d'étranglement. Elle est alors caractérisée par une machine *limitante*. Systématiquement, tout arrêt est comptabilisé comme une perte de production ;

**Cas b** - Soit la machine ne représente pas un goulot d'étranglement dans l'unité de production, elle est donc une machine *non limitante*. Dans ce cas, la perte de production est estimée par le nombre de pièces dans le stock en amont, ayant attendues suite à la défaillance de la machine.

Ainsi :

**Cas a** -

$$C_{NP}(M_i) = T_{NP}(M_i) \cdot \tau_i \cdot P_i \quad (5.7)$$

avec

$$T_{NP}(M_i) = DT_{MP}(M_i) + DT_{MC}(M_i) + At_{MP}(M_i) + At_{MC}(M_i) \quad (5.8)$$

**Cas b** -

$$C_{NP}(M_i) = NP_{At}(M_i) \cdot P_i \quad (5.9)$$

Ou, d'une manière générale :

$$C_{NP}(M_i) = T_{NP}(M_i) \cdot \tau_i \cdot P_i \cdot l_i + NP_{At}(M_i) \cdot P_i \cdot (l_i - 1) \quad (5.10)$$

avec  $l_i = 1$  pour une machine  $M_i$  limitante

**- Coût de main d'œuvre non occupée**

Ce coût dépend de la configuration de l'unité de production. Si on suppose que chaque machine lui est associée un opérateur, le coût de main d'œuvre non occupée s'exprime par :

$$C_{NOp}(M_i) = T_{NP}(M_i) \cdot CH_{Op} \quad (5.11)$$

**- Coût de non-qualité des pièces usinées**

Lors d'une défaillance pendant l'usinage d'une pièce, celle-ci est mise au rebut. De plus, quand une intervention préventive sur la machine  $M_i$  n'a pas été pas réalisée à sa période ou fréquence précise  $F_i$  faute d'indisponibilité d'un technicien, cela engendre une non-qualité des pièces usinées au-delà de cette période, avec une certaine probabilité  $p_i$ . Le coût de non-qualité peut être exprimé par :

$$C_{NQ}(M_i) = NP_{Reb}(M_i).P_i \quad (5.12)$$

**- Coût des ressources supplémentaires***Maintenance dans l'AdM*

L'intégration d'un atelier de maintenance nécessite un investissement en ressources telles que des techniciens, des postes d'intervention et des pièces de rechange pour la réparation par remplacement, pour maintenir l'ensemble des machines de production sélectionnées. Ce qui signifie que ces ressources existent déjà lors de la conception de l'AdM. Si, par retour d'expérience, on constate que sous-traiter les opérations de maintenance de telle machine reviendrait moins cher, les techniciens et les postes seront toujours utiles pour d'autres machines. Il n'y aura que les pièces de rechange pour le remplacement qui seront spécifiques pour cette machine (si les machines sont différentes les unes des autres). De ce fait, le coût de ressources supplémentaires dans ce cas s'exprime par :

$$C_{Sup}^I(M_i) = Nb_{PR}(M_i).C_{PR}(M_i) \quad (5.13)$$

*Maintenance par sous-traitance*

Dans le cas où les opérations de maintenance de  $M_i$  sont sous-traitées, le coût du contrat de sous-traitance (transport, assurance,...) est à rajouter à l'ensemble des coûts précédemment cités. Ainsi, le coût supplémentaire dans ce cas s'exprime par :

$$C_{Sup}^S(M_i) = C_{Cont}(M_i) \quad (5.14)$$

**5.3.3 Évaluation des coûts de maintenance de chaque machine**

A partir de l'estimation des principaux coûts, on peut évaluer les coûts de maintenance de chaque machine  $M_i$  et selon la stratégie de maintenance (interne, externe) appliquée. On suppose que le coût horaire d'un technicien est plus cher que celui d'un opérateur (cette hypothèse est vraisemblablement évidente vu les compétences techniques exigées d'un technicien). Pour simplifier les équations, on note :

$$CH_{op} = 0,80.CH_{Tech} \quad (5.15)$$

### 5.3.3.1 Coûts de maintenance en interne

Si les opérations de maintenance sur la machine  $M_i$  sont effectuées dans l'atelier de maintenance, les coûts engendrés s'expriment par :

$$C_M^I(M_i) = [NP_{Reb}^I(M_i) + (1 - l_i)NP_{At}^I(M_i)].P_i \quad (5.16)$$

$$+ l_i.[At_{MP}^I(M_i) + DT_{MP}^I(M_i) + At_{MC}^I(M_i) + DT_{MC}^I(M_i)].\tau_i.P_i \quad (5.17)$$

$$- 0,80.[At_{MP}^I(M_i) + DT_{MP}^I(M_i) + At_{MC}^I(M_i) + DT_{MC}^I(M_i)].CH_{Tech} \quad (5.18)$$

$$+ Nb_{PR}(M_i).C_{PR}(M_i) \quad (5.19)$$

### 5.3.3.2 Coûts de maintenance en externe

Les coûts de maintenance engendrés par la machine  $M_i$  dont les opérations sont sous-traitées s'expriment par :

$$C_M^S(M_i) = [NP_{Reb}^S(M_i) + (1 - l_i)NP_{At}^S(M_i)].P_i \quad (5.20)$$

$$+ l_i.[DT_{MP}^S(M_i) + At_{MC}^S(M_i) + DT_{MC}^S(M_i)].\tau_i.P_i \quad (5.21)$$

$$+ [0,80.[DT_{MP}^S(M_i) + At_{MC}^S(M_i)] + 2.DT_{MC}^S(M_i)].CH_{Tech} \quad (5.22)$$

$$+ C_{Cont}(M_i) \quad (5.23)$$

## 5.4 Exemple de détermination de stratégies efficaces

Soit une unité de production composée de deux machines  $M_1$  et  $M_2$  en série avec un stock intermédiaire. Initialement, toutes les opérations de maintenance s'effectuent dans l'atelier de maintenance. On voudrait comparer les coûts de maintenance selon les différents scénarios de stratégies de maintenance à appliquer sur les deux machines. Quatre cas de figure se présentent :

**Cas a** - Toutes les actions de maintenance des deux machines sont réalisées en interne ;

**Cas b** - Seules les interventions de maintenance sur la machine  $M_1$  sont en interne ;

**Cas c** - Seules les interventions de maintenance sur la machine  $M_2$  sont en interne ;

**Cas d** - Toutes les actions de maintenance des deux machines sont sous-traitées.

Les caractéristiques techniques des deux machines sont récapitulées dans le tableau 5.1.

On simule la dynamique de fonctionnement de l'unité de production en utilisant à nouveau le logiciel MissRdP, basé sur les réseaux de Petri stochastiques. Notons toutefois

<i>u.t : heure</i>		$M_1$	$M_2$
Taux de service	$\tau_i$	1	0.6
Période de la maintenance préventive (heure)	$P(M_i)$	336	336
Durée de la maintenance préventive (heure)	$D_{MP}(M_i)$	3	2
Taux de défaillance (/ heure)	$\lambda_i$	0.007	0.009
Pièce de rechange pour le remplacement	$PR_i$	$PR_1$	$PR_2$

TAB. 5.1 – Caractéristiques techniques des deux machines de production

que le recours à la simulation n'est pas fortuite. Vu les interactions entre les deux machines vis-à-vis des phases de production et de maintenance, certains paramètres tels que les temps d'attente ou le nombre de pièces mis au rebut ne peuvent être obtenus par des formulations mathématiques.

Les coûts de maintenance selon le scénario sont exprimés en fonction du coût horaire du technicien  $CH_{Tech}$ , du prix de la pièce finale  $P$  et du coût de l'ensembles des équipements pour le remplacement  $C_{PR}(M_i)$  de chaque machine  $M_i$ ,  $i = 1, 2$ .

Après simulation, on obtient l'expression du bénéfice total de la ligne dans chaque cas :

Cas a -

$$G_B(M_1^I, M_2^I) = 19754.P - 2316.CH_{Tech} - C_{PR}(M_1) - C_{PR}(M_2) \quad (5.24)$$

Cas b -

$$G_B(M_1^I, M_2^S) = 12350.P - 1643.CH_{Tech} - C_{PR}(M_1) \quad (5.25)$$

Cas c -

$$G_B(M_1^I, M_2^S) = 10320.P - 1956.CH_{Tech} - C_{PR}(M_2) \quad (5.26)$$

Cas d -

$$G_B(M_1^S, M_2^S) = 11875.P - 1852.CH_{Tech} \quad (5.27)$$

A partir des valeurs numériques des paramètres  $CH_{Tech}$ ,  $P$  et  $C_{PR}(M_i)$ ,  $i = 1, 2$ , on détermine la stratégie de maintenance qui garantit un bénéfice global optimal.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pris en compte les deux politiques de maintenance pour dimensionner l'atelier de maintenance. Les priorités des machines ainsi que la technicité des opérateurs sont considérées. Pour évaluer l'efficacité de actions de maintenance par

rapport aux critères économiques de l'entreprise, une étude sur le choix de stratégie de maintenance à appliquer sur chaque machine est établie. Pour cela, les principaux coûts impliqués dans chaque stratégie sont formulés. Ce qui nous permet de sélectionner la stratégie de maintenance efficace à appliquer sur chaque machine en fonction de certains paramètres de décision afin d'améliorer le gain total de l'entreprise.



## *Conclusions et Perspectives*

L'une des contributions principales de ce travail de recherche est la mise en œuvre de la méthodologie d'une maintenance centralisée dans les systèmes manufacturiers. A partir de l'état de l'art sur le service maintenance dans les différentes industries en général et dans les systèmes manufacturiers en particulier, nous avons constaté que la maintenance dans les systèmes de production est soit intégrée soit sous-traitée. Notre problématique s'est portée sur la mise en place d'un système de maintenance dans une entreprise possédant plusieurs unités de production. Nous avons évoqué les avantages mais aussi les inconvénients des deux stratégies de maintenance appliquées (maintenance en interne ou maintenance par la sous-traitance).

L'approche d'une maintenance centralisée proposée nous a permis concevoir un atelier de maintenance. Pour déterminer l'organisation structurelle de l'atelier de maintenance et répertorier l'ensemble des ressources adéquates au système manufacturier, une étude fonctionnelle des machines de production est établie. Comme il y a restriction sur le budget d'investissement dans les ressources de maintenance, nous sommes contraintes de classer les machines par ordre de priorité selon des exigences en production et en maintenance afin de ne retenir que les machines les plus critiques. Deux méthodes de classement des machines sont présentées selon si l'on veut faire un classement sommaire avec une évaluation qualitative des critères, ou plutôt un classement plus fin où des échelles de mesure ainsi que des poids sont attribués aux différents critères. Une fois le classement des machines établi, on élabore la structure de l'atelier de maintenance à partir du cycle de réparation de l'ensemble des équipements qui visiteront l'AdM. Les ressources sont aussi déterminées qualitativement, à savoir les types de postes d'intervention, les différentes compétences des techniciens nécessaires et les types d'équipements et de pièces pour le remplacement. Cette étude a été concrétisée par la publication de la communication [Abbou et al., 2002b]. Toutefois, les politiques intégrées dans l'AdM sont les maintenances corrective et préventive systématique. De plus, la gestion du stock n'est considérée que pour la maintenance corrective. L'une des perspectives de cette partie



est de développer la structure de l'AdM pour d'autres politiques de maintenance telles que la maintenance préventive prédictive et tenir compte du stock de pièces de rechange lors d'une intervention prévention systématique. Il serait aussi intéressant d'affiner la structure de l'AdM au niveau des postes d'intervention. En effet, dans notre cas, nous avons considéré que la réparation complète d'un équipement s'effectue sur un seul poste selon bien sûr le type de défaillance. Il est donc possible de détailler tout le processus de réparation sur ce poste.

Le dimensionnement des ressources de l'atelier de maintenance passe par l'évaluation des performances de l'atelier. Pour cela, il est nécessaire de déterminer les indicateurs de performances pertinents. Dans cette étude, nous avons distingué deux cas : le premier cas correspond à la maintenance corrective seule, le second cas correspond à l'intégration des deux politiques de maintenance, à savoir la maintenance corrective et la maintenance préventive systématique. Pour chaque cas, nous avons sélectionné les indicateurs pertinents de performances de l'AdM. Pour le premier cas, nous avons choisi comme indicateur de performances le temps moyen de séjour d'un équipement dans l'AdM. Pour l'évaluation des performances, nous avons utilisé les méthodes analytiques basées sur les réseaux de files d'attente. Afin d'améliorer la disponibilité des machines, nous avons appliqué la technique de réparation par remplacement. La concrétisation des résultats de l'étude fait l'objet de la communication [Abbou et al., 2002a] et de l'article [?]. Signalons que lors de la prise en compte de la technique de réparation par remplacement, nous avons utilisé les réseaux de files d'attente de type *Base Stock* et nous nous sommes limitées à deux niveaux. Cette méthode reste valable pour plusieurs niveaux dans la mesure où la défaillance d'un équipement est due à un seul composant. On peut envisager la perspective d'étendre les méthodes analytiques pour le cas de défaillances diverses, et par conséquent dimensionner le niveau du stock de pièces de rechange pour des remplacements multiples. L'autre perspective concerne les compétences des techniciens. En effet, dans notre étude pour le premier cas, nous avons considéré que tous les techniciens étaient polyvalents. Une extension des méthodes analytiques peut être effectuée en tenant compte de la diversité des compétences.

Lors de l'intégration des deux politiques de maintenance (corrective et préventive) dans le second cas, la résolution des modèles obtenus par les méthodes analytiques devient complexe. Nous avons donc fait appel à la simulation et avons choisi comme outil les réseaux de Petri stochastiques généralisés à synchronisations internes. Une étude comparative des deux méthodes est détaillée dans la communication [Abbou et al., 2003c]. Dans la

phase de modélisation, nous avons pris en compte les interactions entre les phases de production et de maintenance. L'utilisation des réseaux de Petri stochastiques généralisés à synchronisations internes nous a permis d'introduire des variables de décision. Ces variables sont liées au choix d'une activité de maintenance selon différents critères, comme les priorités des machines, les compétences des techniciens le niveau du stock de pièces de rechange. Nous avons choisi dans notre étude comme indicateurs de performances les taux de rendement synthétiques des machines, le taux de disponibilité des techniciens et le niveau du stock de pièces de rechange. La communication [Abbou et al., 2003b] est dédiée à la modélisation et l'analyse des performances de l'AdM avec les réseaux de Petri stochastiques.

Dans notre démarche d'évaluation des performances, seuls les critères de production ont été pris en compte. Pour que l'atelier de maintenance ait un impact efficace aussi bien sur le plan technique qu'économique de l'entreprise, nous avons intégré les coûts de maintenance dans le chapitre 5. Dans notre étude, la minimisation des coûts de maintenance est établie sur deux aspects : minimisation du budget d'investissement dans les ressources de maintenance et minimisation des coûts des opérations de maintenance. Pour le premier aspect, il s'agit de choisir la configuration de l'atelier de maintenance qui satisfait les exigences retenues et qui soit la plus économique. En ce qui concerne le deuxième aspect de minimisation des coûts de maintenance, il s'agit de déterminer quelle stratégie de maintenance appliquer - soit la maintenance dans l'AdM soit la maintenance par la sous-traitance - pour chaque machine afin d'améliorer le gain total de l'entreprise. Comme méthode de modélisation et d'analyse, nous avons utilisé à nouveau la simulation basée sur les réseaux de Petri stochastiques pour tenir compte de toutes les interactions entre les phases de production et de maintenance. Cette étude a aboutit à des résultats satisfaisants et publiés dans la communication [Abbou et al., 2003a]. Néanmoins, lors de l'intégration du critère coût, nous avons considéré les coûts classiques que l'on peut rencontrer. Il serait intéressant d'étendre l'étude pour détailler les coûts engendrés lors de l'intégration de l'atelier de maintenance, ou lorsque les actions de maintenance sur un ensemble de machines sont sous-traitées. La résolution peut être envisagée avec la programmation non linéaire pour optimiser les coûts, à condition de connaître les différents paramètres qui rentrent en jeu tels que les durées d'indisponibilité d'une machine parce qu'elle est en attente d'une ressource de maintenance ou parce que le stock amont est vide.

Enfin, comme nos travaux de recherche sont dédiés à la conception et l'optimisation d'un AdM basée sur la méthodologie d'une maintenance centralisée, une autre perspective est

d'exploiter les résultats obtenus pour la mise en œuvre d'une télé-maintenance. En effet, la télé-maintenance permet aux techniciens d'intervenir sur des machines pour régler à distance des défaillances "classiques" qu'un opérateur sur place peut effectuer afin de gagner du temps. A partir des données recueillies sur site de production, il est possible d'établir un diagnostic précis et de dépanner en direct. Dans ce cas, un ordonnancement des tâches de maintenance est à réaliser pour gérer efficacement les ressources de l'atelier de maintenance.





# Bibliographie

- [Abbou et al., 2004] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2004). « Conception et évaluation des performances d'un atelier de maintenance ». *Journal Européen sur les Systèmes Automatisés*, vol. 38, n° 1-2/2004, pages 197-222.
- [Abbou et al., 2003a] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2003). « Approche d'évaluation des performances d'une ligne de fabrication selon les stratégies de maintenance ». *4ème Congrès International pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement, Qualita 2003, Nancy, France*.
- [Abbou et al., 2003b] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2003c). « Les réseaux de Petri pour la modélisation et l'analyse des performances d'un atelier de maintenance ». *4ème Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation, MOSIM'03, Toulouse, France*.
- [Abbou et al., 2003c] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2003). « Méthodes de modélisation et d'analyse des performances d'un atelier de maintenance ». *Conférence Internationale sur la Productique, CIP'2003, Alger, Algérie*.
- [Abbou et al., 2002a] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2002). « Etude structurale d'un atelier de maintenance ». *4ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF 2002, Paris, France*.
- [Abbou et al., 2002b] Abbou R., Simeu-Abazi Z., Di Mascolo M. (2002). « Queueing networks for performance evaluation in maintenance workshops ». *European Conference on System Dependability and Safety, Lambda-Mu 13, Lyon, France*, pages 519–524.
- [AFNOR, 1988] AFNOR (1988). *Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité*. Recueil de Normes Françaises, AFNOR.
- [Amodeo, 1999] Amodeo L. (1999). « Contribution à la simplification et à la commande des réseaux de Petri stochastiques : Application à la maintenance des systèmes de production ». Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comte.

- 
- [Banerjee et Flynn, 1987] Banerjee A., Flynn B. (1987). « A simulation study of some maintenance policies in a group technologie shop ». *International Journal of Production Research*, vol. 25, n°11, pages 1595–1609.
- [Baynat, 2000] Baynat B. (2000). *Théorie des files d'attente : des chaînes de Markov aux réseaux à forme produit*. Editions HERMES.
- [Bergot et al., 1994] Bergot M., Grudzien L., Ménéxiadis D. (1994). « Une approche intégrée des fonctions de maintenance ». *Revue d'Automatique et de Productique*, vol. 7, n°5, pages 581–594.
- [Charles, 2000] Charles A-S. (2000). *Modélisation des défaillances des équipements d'une unité de production de composants électroniques. Optimisation des stratégies de maintenance*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Chelbi et Ait-Kadi, 2001] Chelbi A., Ait-Kadi D. (2001). « Classement des équipements par ordre de priorité pour la maintenance : une approche multicritère ». *Revue Internationale d'Ingénierie de Production Mécanique*, vol. IV, n°5, pages 39–46.
- [Choi et al., 1994] Choi H., Kulkarni V., Trivedi K. (1994). « Performance modeling using markov regenerative stochastic Petri nets ». *Performance Evaluation*, vol. 20, n°1-3.
- [Châtelet et al., 2002] Châtelet E., Bérenguerand C., Jellouli O. (2002). « Performance assessment of complex maintenance policies using stochastic Petri nets ». *Lambda-Mu 13 Lyon ESREL 2002*, pages 532–537.
- [Ciardo et Lindemann, 1993] Ciardo G., Lindemann C. (1993). « Analysis of deterministic and stochastic Petri nets ». *5th International Workshop on Petri Nets and Performance Models, Toulouse, France, 19-22 Octobre 1993*, pages 160–169.
- [Combeau, 2002] Combeau J. (2002). « Situation et tendances de l'évolution de la maintenance dans les entreprises manufacturières industrielles ». Rapport Technique ADEPA.
- [Cuignet, 2002] Cuignet R. (2002). *Management de la maintenance*. Edition DUNOD.
- [Daniel, 1995] Daniel O. (1995). *Les Réseaux de Petri Stochastiques pour l'évaluation des attributs de la sûreté de fonctionnement des systèmes manufacturiers*. Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [Deborde et Georjon, 1999] Deborde R., Georjon A. (1999). *Maintenance des Systèmes industriels*. Edition HACHETTE Technique.
- [Dekker, 1996] Dekker R. (1996). « Applications of maintenance optimization models : a review and analysis ». *Reliability Engineering and System Safety*, n°51, pages 229–240.
- [Dekker et Roelvink, 1995] Dekker R., Roelvink I. (1995). « Marginal cost criteria for preventive remplacement of a group of components ». *European journal of Operational Research*, n°84, pages 467–480.
-

- 
- [Dekker et Skarf, 1998] Dekker R., Skarf P. (1998). « On the impact of optimisation models in maintenance decision making : state of art ». *Reliability Engineering and System Safety*, n°60, pages 111–119.
- [Deniaud et al., 1999] Deniaud S., Zerhouni N., El-Moudni A., Morel F. (1999). « Sur une modélisation de maintenance préventive à l’Alstom ». *Revue Internationale d’Ingénierie des Systèmes de Production Mécanique*, vol. V, n°2, pages 53–65.
- [Di Mascolo, 1996] Di Mascolo M. (1996). « Sur l’évaluation de performances et le pilotage de systèmes de production ». Mémoire d’habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Dijkstra et al., 1994] Dijkstra M., Kroon L., Salomon M., Van-Nunen J., Van-Wassen L. (1994). « Planning the size and organization of KLM’s aircraft maintenance personnel ». *Interfaces*, vol. 24, n°6, pages 47–58.
- [Duri, 1997] Duri C. (1997). *Étude comparative de gestions à flux tiré*. Thèse de Doctorat en Automatique-Productique, Laboratoire d’Automatique de Grenoble.
- [Enscore et Burns, 1983] Ensore E., Burns D. (1983). « Dynamic scheduling of a preventive maintenance program ». *International Journal of Production Research*, vol. 21, n°3, pages 357–368.
- [Florin et al., 1991] Florin G., Fraize C., Natkin S. (1991). « Stochastic Petri nets : Properties, applications and tools ». *Microelectronics and Reliability*, vol. 31, n°4, pages 669–697.
- [Flynn, 1989] Flynn B. (1989). « Critical machines preventive maintenance policies for group technology shops ». *International Journal of Production Research*, vol. 27, n°12, pages 2009–2020.
- [Francastel, 2001] Francastel J.C. (2001). *Externalisation de la maintenance : Stratégies, méthodes et contrats*. Edition DUNOD.
- [GFI, 2002] GFI (2002). MissRdP : Logiciel pour la modélisation interactive et simulation des systèmes avec les réseaux de Petri. Société Française GFI. <http://www.gfi.fr/>.
- [Giovannacci, 2003] Giovannacci M. (2003). Mise en œuvre de l’interface graphiques d’un atelier de maintenance. Note interne, Laboratoire d’Automatique de Grenoble.
- [Heikkilä, 2003] Heikkilä J. (2003). Penser clairement l’externalisation. Rapport Technique, Les Echos.
- [Jackson, 1963] Jackson J. (1963). « Jobshop-like queueing systems ». *Management Science*, n°10, pages 131–142.
-



- 
- [Kaffel, 2001] Kaffel H. (2001). *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec.
- [Kattan, 2000] Kattan B. (2000). *Évaluation des performances d'un atelier de maintenance*. Diplôme d'Études Approfondies, Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [Kelly et al., 1997] Kelly C., Mosier C., Mahmoodi F. (1997). « Impact of maintenance policies on the performance of manufacturing cells ». *International Journal of Production Research*, vol. 35, n°3, pages 767–787.
- [Keskinocak et Tayur, 1998] Keskinocak P., Tayur S. (1998). « Scheduling of time-shared jet aircraft ». *Transportation Science*, n°32, pages 277–294.
- [Kralj et Petrovic, 1988] Kralj B., Petrovic R. (1988). « Optimal preventive maintenance scheduling of thermal generating units in power systems - a survey of problems formulations and solution methods ». *European journal of Operational Research*, n°35, pages 1–15.
- [Kuhn, 1999] Kuhn H. (1999). « Performance evaluation of automated flow line systems with limited repair capacities ». *2nd Aegean International Conference on Analysis and Modeling of Manufacturing Systems*, pages 79–88.
- [Léger, 1999] Léger J.B. (1999). *Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes industriels de production : proposition d'un cadre formel de modélisation*. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy.
- [Lie et al., 1977] Lie, C., Hwang, C., and Tillman, F. (1977). « Availability of maintained systems : a state of the art ». *AIIE Transactions*, vol. 9, n°3, pages 247–259.
- [Luce et Pavan, 1995] Luce S., Pavan A. (1995). « Gestion de stocks en maintenance corrective ». *Revue d'Automatique et de Productique Appliquées*, vol. 8, n°2-3, pages 285–290.
- [Ly, 1999] Ly F. (1999). *Optimisation de la maintenance dans les systèmes flexibles de production manufacturière : Approche par la structuration et la surveillance prédictive indirecte*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologie de Lille.
- [Mahmoodi et Dooley, 1991] Mahmoodi F., Dooley K. (1991). « A comparison of exhaustive and non-exhaustive group scheduling heuristics in a manufacturing cell ». *International Journal of Production Research*, vol. 29, n°9, pages 1923–1939.
- [Marsan et al., 1991] Marsan M.A., Balbo G., Chiola G., Conte G., Donatelli S., Franceschinis G. (1991). « An introduction to generalized stochastic Petri nets ». *Microelectronics and Reliability*, vol. 31, n°4, pages 699–725.
- [Martel, 1999] Martel J.M. (1999). « L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications ». *41<sup>e</sup> Congrès National sur la Recherche Opérationnelle, SCRO'99, Canada*.
-

- 
- [Mendez-Azua, 2002] Mendez-Azua H. (2002). *Commande / surveillance supervisée : exploitation des modes de marches pour l'intégration des stratégies d'entreprise*. Thèse de Doctorat en Automatique-Productique, Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [Monchy, 2000] Monchy F. (2000). *Maintenance : Méthodes et Organisations*. Edition DUNOD.
- [Pintelon et Gelders, 1992] Pintelon L., Gelders L. (1992). « Maintenance management decision making ». *European Journal of Operational Research*, vol. 58, pages 301-317.
- [Richet et al., 1996] Richet D., Gabriel M., Malon D., Blaison G. (1996). *Maintenance Basée sur la Fiabilité*. Edition MASSON.
- [Roy et Bouyssou, 1993] Roy B., Bouyssou D. (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Édition Economica, Paris.
- [Ruben et al., 1993] Ruben R., Mosier C., Mahmoodi F. (1993). « A comprehensive analysis of group scheduling heuristics in a job shop cell ». *International Journal of Production Research*, vol. 31, n°6, pages 1343–1369.
- [Rustenburg, 2000] Rustenburg J. (2000). *A System Approach to Budget-Constrained Spare Parts Management*. Thèse de Doctorat, Eindhoven University of Technology.
- [Rustenburg et al., 2000] Rustenburg W., Houtum G. V., Zijm W. (2000). « Spare parts management for technical systems : resupply of spare parts under limited budgets ». *IIE Transactions*, 32 :1013–1026.
- [Sassine, 1998] Sassine C. (1998). *Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [Sherif et Smith, 1981] Sherif Y., Smith M. (1981). « Optimal maintenance models for systems subject to failure : a review ». *Naval Research Logistics Quarterly*, n°28, pages 47–74.
- [Simeu-Abazi, 2000] Simeu-Abazi Z. (28-30 mars 2000). « Optimisation de la maintenance préventive dans les systèmes de production ». *Colloque National de Sûreté de fonctionnement  $\lambda\mu 12$ , Montpellier*, pages 395–400.
- [Simeu-Abazi et al., 2000] Simeu-Abazi Z., Iung B., Léger J.B., Ly F. (2000). « Maintenance in the manufacturing systems ». *International Conference MCPL'2000, Grenoble*, pages 831–836.
- [Valdez-Flores et Feldman, 1989] Valdez-Flores C., Feldman R. (1989). « A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems ». *Naval Research Logistics*, n°36, pages 419–446.
-

- [Van Dijkhuizen, 1998] Van Dijkhuizen G. (1998). *Maintenance meets Production : On the Ups and Downs of a Repairable System*. Thèse de Doctorat, Proefschrift Universiteit Twente, Enschede.
- [Visual Decision, 2000] Visual Decision (2000). Decision Lab 2000. Société Canadienne. <http://www.visualdecision.com/>.
- [Zemouri et al., 2001] Zemouri R., Racoceanu D., Zerhouni N., Durand S. (2001). « Simulation et évaluation des performances d'un atelier de maintenance ». *Proceeding of the Symposium International sur la Maintenance Industrielle, SIMI'2001, 21-23 janvier 2001, Alger, Algérie*.
- [Zijm, 1999] Zijm W. (1999). « Queuing models for multi-echelon, multi-indenture maintenance systems ». *2nd Aegean International Conference on Analysis and Modelling of Manufacturing Systems*, pages 177–178.
- [Zijm et al., 2001] Zijm W., Van-Houtum G., Rustenburg W. (2001). « Resupply strategies for general two-echelon, multi-indenture maintenance systems ». *3rd Aegean International Conference on Design and Analysis of Manufacturing Systems*, pages 11–16.
- [Zwingelstein, 1996] Zwingelstein, G. (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité : Guide pratique d'application de la RCM*. Edition HERMES.

# Annexe A

## Les différentes fonctions critères

### A.1 Définition du degré de surclassement

Par définition, une *relation de surclassement binaire*  $S$  définie entre 2 actions  $a$  et  $b$  de l'ensemble  $A$  est telle que : “ $aSb$  si, étant donné les préférences du décideur, la qualité des évaluations des actions et la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que  $a$  est au moins aussi bon que  $b$ , sans qu'il ait de raison importante de refuser cette affirmation”. pour cela, on associe à chaque critère  $j$  un poids  $k_j$  et deux seuils dans la modélisation des préférences et des jugements des décideurs. Ces seuils peuvent être choisis constants ou variables suivant l'axe d'évaluation du critère  $j$  correspondant :

- le seuil d'*indifférence* noté  $q_j$ , qui traduit l'imprécision qui peuvent affecter l'évaluation des performances des actions. Ce seuil peut aussi représenter le degré d'indifférence du décideur ;
- le seuil de *préférence* noté  $p_j$ , qui exprime la limite à partir de laquelle le décideur a une préférence stricte pour l'une des deux actions comparées ;
- l'intensité de préférence entre les deux seuils  $q_j$  et  $p_j$  varie de façon croissante de 0 à 1.

Soit  $f(\cdot)$  une fonction positive qui varie proportionnellement en fonction de l'écart entre la performance de  $M_i$  selon le critère  $j$ , notée  $g_j(M_i)$ , sur celle de  $M_l$  selon le même critère, notée  $g_j(M_l)$ . Cet écart représente le *degré de surclassement* de  $M_i$  sur  $M_l$  sur le critère  $j$  et s'exprime par :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = f(g_j(M_i) - g_j(M_l)) \quad (\text{A.1})$$

Pour déterminer les  $\sigma_j$ , on choisit pour chaque critère l'une des fonctions critères existantes.

## A.2 Fonctions critères

Il existe principalement 6 fonctions, certaines ont des échelles de mesure ordinales (les fonctions 1, 2 et 4), et d'autres des échelles de mesure cardinales (les fonctions 3, 5 et 6). Pour les nominations, on peut trouver des variantes principalement en anglais, celles-ci sont indiquées entre parenthèses.

1. **Vrai-critère (usual)** : définie comme suit (figure A.1) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(M_i) \leq g_j(M_l) \\ 1 & \text{si } g_j(M_i) > g_j(M_l) \end{cases}$$

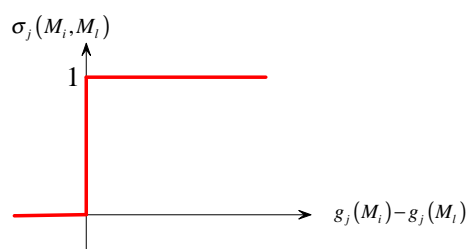


FIG. A.1 – Fonction Vrai-critère

2. **Quasi-critère (U-shape)** : définie comme suit (figure A.2) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq q_j \\ 1 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) > q_j \end{cases}$$

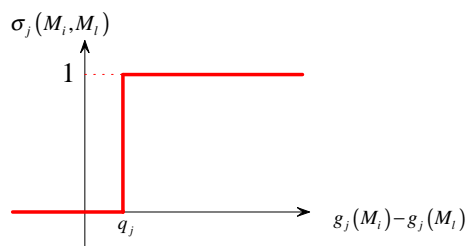


FIG. A.2 – Fonction Quasi-critère

3. **Pré-critère (V-shape)** : définie comme suit (figure A.3) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq q_j \\ \frac{g_j(M_i) - g_j(M_l)}{p_j} & \text{si } q_j < g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq p_j \\ 1 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) > p_j \end{cases}$$

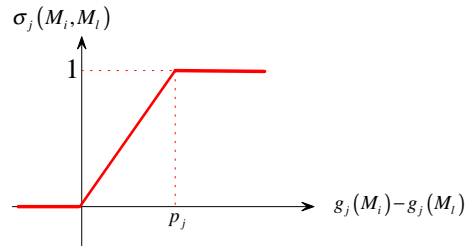


FIG. A.3 – Fonction Pré-critère

4. **Niveau** : définie comme suit (figure A.4) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq q_j \\ \frac{1}{2} & \text{si } q_j < g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq p_j \\ 1 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) > p_j \end{cases}$$

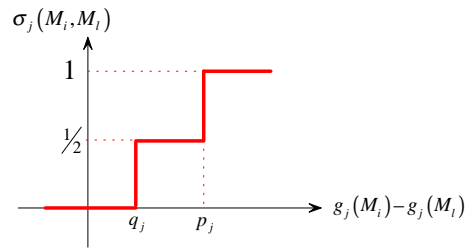


FIG. A.4 – Fonction Niveau

5. **Linéaire** : définie comme suit (figure A.5) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq q_j \\ \frac{g_j(M_i) - g_j(M_l) - q_j}{p_j - q_j} & \text{si } q_j < g_j(M_i) - g_j(M_l) \leq p_j \\ 1 & \text{si } g_j(M_i) - g_j(M_l) > p_j \end{cases}$$

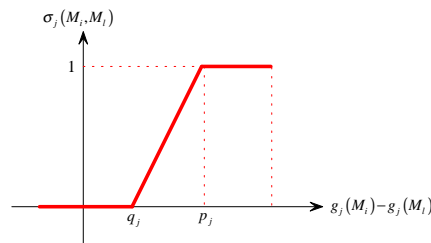


FIG. A.5 – Fonction Linéaire

---

6. **Gaussien** : définie comme suit (figure A.6) :

$$\sigma_j(M_i, M_l) = 1 - \exp - \frac{g_j(M_i) - g_j(M_l)}{-2s^2}$$

s étant l'écart type.

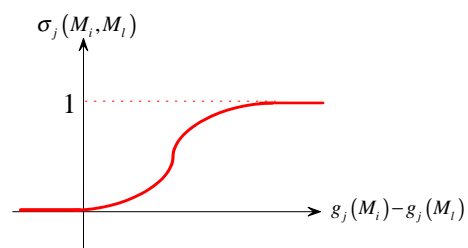


FIG. A.6 – Fonction Gaussien





**Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée :  
Conception et Optimisation d'un Atelier de Maintenance**

**Résumé** : Nos travaux de recherche sont dédiés à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée dans les systèmes manufacturiers. A partir de l'état de l'art sur le service maintenance dans les différentes industries, notre problématique s'est portée sur la mise en place d'un système de maintenance dans une entreprise possédant plusieurs unités de production et dont la réparation des parties défectueuses des machines requiert des ressources bien adaptées aux diverses machines complexes. L'approche d'une maintenance centralisée proposée nous a permis de concevoir un atelier de maintenance. A partir d'une étude fonctionnelle des machines de production, la structure de l'atelier est établie et les ressources sont déterminées qualitativement. Ensuite, nous proposons un dimensionnement de l'atelier de maintenance, passant par l'évaluation des performances et en intégrant les coûts de maintenance. Enfin, pour que l'atelier de maintenance soit efficace aussi bien sur le plan technique qu'économique de l'entreprise, des stratégies de maintenance sont déterminées pour chaque machine.

**Mots clés** : Maintenance centralisée, Atelier de Maintenance, Conception, Dimensionnement, Optimisation, Ordonnancement, Réseaux de Files d'Attente, Réseaux de Petri Stochastiques.

**Contribution for implementing a centralized maintenance :  
Design and optimization of an maintenance workshop**

**Abstract** : The contribution of our research is the implementation of a centralized maintenance in the manufacturing systems. From the state of the art about the maintenance function in various industries, we focused on the maintenance in a production system having several manufacturing units and whose repair of the failing parts of the machines requires resources adapted to the various complex machines. We suggest an approach of a centralized maintenance, which leads to the design of a maintenance workshop. From a functional study of the production machine tools, we establish the workshop structure and the kind of the resources needed. Then, we propose a dimensioning of the maintenance workshop, using performance evaluation. Finally, to make the maintenance workshop efficient, on the technical level as well as on the economic level, an optimal maintenance strategy is determined for each machine.

**Keywords** : Centralized maintenance, Maintenance workshop, Design, Optimization, Scheduling, Queueing networks, Stochastic Petri nets.