

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR - BATNA
Faculté de Technologie
Département de Génie Industriel



MEMOIRE

PRÉSENTÉ AU

Laboratoire d'Automatique et Productique (LAP)

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Spécialité : Génie Industriel

Par

REZZOUG Lilia

Ingénieur d'état en Génie industriel

Thème

**Optimisation de l'ordonnancement des activités de maintenance
basée sur la fiabilité d'un système de production**

Directeur de mémoire : Dr. H. SMADI.

Co-encadreur: Mr. Y. BAHMANI.

JURY

Soutenu le : 31 /05/ 2012, devant le jury composé de :

Dr : M.D. MOUSS
Dr : H. SMADI
Dr : K. TALBI
Dr : K. ZIDANI
Mr. Y. BAHMANI

MC 'A' Université de Batna
MC 'A' Université de Batna
Pr Université Mentouri Constantine
Pr Université de Batna
MA 'A' Université de Batna

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Co-encadreur

Année Universitaire : 2011-2012

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant pour la santé, la volonté, le courage et la patience qu'il m'a donné durant ces années d'étude.

Je tiens à remercier Dr. Smadi Hacene pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations et ses encouragements le long de ce travail et surtout pour sa gentillesse, je remercie aussi Mr. Bahmani Younes mon co-encadreur pour sa sympathie, son aide, ses conseils et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Je suis très reconnaissante au Dr. M. D. Mouss qui a accepté de présider le jury de soutenance, je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude au Pr. Zidani Kamel pour ses encouragements et son aide, au Pr. Talbi Kamel d'avoir accepté de rapporter ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi à tout le personnel de la société GERMAN pour leur accueil, leur contribution à la réussite de mon stage.

Mes profondes gratitude s'adressent aussi à mon enseignant Mr. Benzouai Messaoud pour sa générosité et sa sympathie, à l'ensemble des enseignants du département de Génie Industriel, sans pour autant oublier tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin afin d'achever ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail:

✿ *À mon père, à ma mère, pour leur tendresse, leurs conseils, leurs sacrifices, leur présence à mes côtés et leur soutien, auxquels je dois ce que je suis. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection.*

✿ *À mon frère et mes sœurs.*

✿ *À toute ma famille.*

✿ *À mes amies et mes collègues.*

Sommaire.....	ii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
Introduction Générale.....	01

Chapitre I : Concepts et définitions des activités de la maintenance industrielle

I.1. Introduction	03
I.2. Histoire de la maintenance.....	04
I.3. Les définitions de la maintenance.....	04
I.3.1. Définition AFNOR X60-010 (Décembre 1994).....	04
I.3.2. Définition CEN Projet WI 319-003 (1997).....	05
I.4. Différence entre l'entretien et la maintenance.....	05
I.5. Situation du service de maintenance dans une entreprise.....	06
I.6. Structure des activités de l'atelier de maintenance.....	08
I.7. Opérations de prévention.....	10
I.8. Différentes politiques de maintenance.....	10
I.8.1. Maintenance préventive.....	11
I.8.1.1. Maintenance préventive systématique.....	11
I.8.1.2. Maintenance préventive conditionnelle.....	12
I.8.1.3. Maintenance préventive prévisionnelle.....	12
I.8.2. Maintenance corrective.....	12
I.8.2.1. Maintenance corrective palliative.....	13
I.8.2.2. Maintenance corrective curative.....	13

I.8.3. Maintenance « améliorative ».....	13
I.9. Les niveaux de maintenance.....	13
I.10. Documents nécessaires à prévoir.....	16
I.10.1. Dossier technique.....	16
I.10.2. Dossier machine.....	16
I.11. Fonctions opérationnelles du service maintenance.....	18
I.12. Les opérations de maintenance.....	18
I.12.1. Le dépannage.....	18
I.12.2. La réparation.....	19
I.12.3. Les inspections.....	20
I.12.4. Les visites.....	20
I.12.5. Les contrôles.....	20
I.12.6. Les révisions.....	20
I.12.7. Les échanges standards.....	21
I.13. Les activités connexes de la maintenance.....	23
I.13.1. La maintenance d'amélioration.....	23
I.13.2. Les travaux neufs.....	24
I.13.3. La sécurité.....	25
I.14. Les analyses FMD des systèmes réparables.....	26
I.14.1. Disponibilité des systèmes réparables et ses composantes.....	26
I.14.2. Analyse FMD : indicateurs opérationnels.....	28
I.15. Conclusion.....	33

Chapitre II : Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)

II.1. Introduction.....	34
-------------------------	----

II.2. Origine de l'organisation MBF.....	36
II.3. Définitions de la MBF.....	37
II.4. La MBF dans l'industrie manufacturière ou de process.....	38
II.5. Les objectifs de la MBF.....	38
II.6. Les trois principes de la MBF.....	40
II.6.1. Le principe d'auto – limitation.....	40
II.6.2. Le principe de subordination.....	41
II.6.3. Le principe de participation des acteurs concernés.....	42
II.7. Les outils de la MBF.....	43
II.8. Les cinq étapes de la démarche MBF.....	43
II.9. Effets induits par la démarche MBF.....	48
II.10. Conclusion.....	49

Chapitre III : L'ordonnancement dans les ateliers de production

III.1. Introduction.....	50
III.2. Définition de l'ordonnancement.....	51
III.3. Les éléments d'un problème d'ordonnancement.....	51
III.3.1. Les tâches.....	51
III.3.2. Les ressources.....	52
III.3.3. Les contraintes.....	52
III.3.4. Les objectifs.....	53
III.4. Les objectifs de l'ordonnancement.....	54
III.5. Le problème d'ordonnancement.....	56
III.5.1. Définition.....	56
III.5.2. Représentation de la solution.....	56

III.6. Les différentes approches de résolution.....	57
III.6.1. Approches directes.....	57
III.6.1.1. Méthodes de résolution optimales.....	58
III.6.1.2. Méthodes de résolution non optimales.....	58
III.6.2. Approches itératives.....	61
III.6.2.1. Réparation automatique.....	61
III.6.2.2. Intervention humaine.....	63
III.7. Conclusion.....	67

Chapitre IV : Ordonnancement des activités de la maintenance

IV.1. Introduction.....	68
IV.2. Missions de l'ordonnancement.....	68
IV.3. Difficultés inhérentes à l'ordonnancement en maintenance.....	69
IV.3.1. Quelques spécificités en matière d'ordonnancement.....	69
IV.3.2. Réussir la gageure de la prévision du fortuit.....	69
IV.4. Terminologie de l'ordonnancement.....	70
IV.4.1. Notions de charges et de capacité.....	70
IV.4.1.1. Capacité de charge.....	70
IV.4.1.2. Charges de travail.....	71
IV.4.1.3. Surcharges.....	71
IV.4.1.4. Sous – charges.....	72
IV.4.2. Notions de tâches et de projet.....	73
IV.4.2.1. Notion de tâche.....	73
IV.4.2.2. Notion de projet.....	73
IV.4.3. Notion de planning.....	74

IV.4.3.1. Principe du diagramme de Gantt.....	74
IV.4.3.2. Tâche critique et chemin critique.....	75
IV.4.4. Les trois horizons : le partage des compétences et des responsabilités.....	75
IV.4.4.1. Principe de base.....	75
IV.4.4.2. Horizon à long terme.....	76
IV.4.4.3. Horizon à moyen terme.....	76
IV.4.4.4. Horizon à court terme.....	76
IV.5. Les niveaux de l'ordonnancement et leurs outils.....	77
IV.5.1. Les cinq niveaux de l'ordonnancement.....	77
IV.5.1.1. Niveau1 : le plan de charge annuelle.....	77
IV.5.1.2. Niveau2 : le planning de charge prévisionnelle.....	78
IV.5.1.3. Niveau3 : le planning de lancement.....	80
IV.5.1.4. Niveau4 : le planning d'atelier.....	81
IV.5.1.5. Niveau5 : le suivi de l'avancement.....	81
IV.6. Les sous – fonctions de l'ordonnancement en maintenance : flux et procédures.....	82
IV.6.1. Enregistrement.....	83
IV.6.2. Programmation.....	83
IV.6.3. Approvisionnement et logistique.....	83
IV.6.4. Lancement.....	83
IV.6.5. Avancement des travaux.....	84
IV.7. Déclenchement des différents travaux de maintenance.....	84
IV.7.1. Déclenchement des actions préventives.....	84
IV.7.1.1. Consignes permanentes.....	84
IV.7.1.2. Rondes et fiches de routes.....	85

IV.7.1.3. Maintenance systématique.....	85
IV.7.1.4. Maintenance conditionnelle.....	85
IV.7.1.5. Révisions périodiques.....	85
IV.7.2. Synthèse des procédures.....	85
IV.8. Gamme d'ordonnancement.....	87
IV.8.1. Schéma d'enclenchement des phases.....	87
IV.9. Conclusion.....	89

Chapitre V: Etude de cas : application à l'entreprise de Matériels de Gerbage et de Manutention (GERMAN)

V.1. Introduction.....	90
V.2. Présentation de l'entreprise de Matériels de Gerbage et de Manutention (GERMAN).....	90
V.2.1. Histoire de GERMAN.....	90
V.2.2. Situation géographique de GERMAN.....	91
V.3. L'objectif tracé par l'entreprise.....	93
V.4. Attribution des tâches.....	95
V.4.1. Direction générale.....	95
V.4.2. Direction d'exploitation.....	95
V.4.3. Département organisation d'informatique (D.O.I).....	95
V.4.4. Finances.....	96
V.4.5. Département administration générale (D.A.G).....	96
V.4.6. Direction commerciale (D.C).....	97
V.4.7. Direction technique / production.....	97
V.5. Partenariat.....	99
V.6. Exportation.....	99

Sommaire

V.7. L'effectif de la sous direction production.....	99
V.8. Les différents équipements de production de GERMAN.....	99
V.9. Les différents produits fabriqués par GERMAN.....	100
V.9.1. Production chariots élévateurs tous types année 2010.....	100
V.9.2. Programme de production deuxième trimestre 2011.....	101
V.10. Origines des approvisionnements.....	102
V.11. Département maintenance.....	102
V.12. Les activités du département maintenance.....	103
V.12.1. Les différentes durées de la politique de maintenance.....	103
V.12.2. Disponibilité des pièces de rechange.....	104
V.12.3. Disponibilité des agents de maintenance.....	104
V.13. L'effectif du département maintenance.....	104
V.14. Processus de fabrication d'un chariot élévateur.....	106
V.15. Codification des machines.....	107
V.16. Processus de fabrication de la roue dentée.....	108
V.17. Calcul des paramètres de fiabilité (MTBF, MTTR, D, μ et λ).....	109
V.18. Diagramme de PARETO.....	110
V.19. Les hypothèses de travail.....	112
V.20. Programmation par MATLAB.....	114
V.21. Les résultats.....	115
V.22. Conclusion.....	115
Conclusion Générale.....	116
Références bibliographiques.....	118

Liste des figures

Figure I.1 : Situation du service de maintenance dans une entreprise.....	07
Figure I.2 : Structure des activités de l’atelier de maintenance.....	08
Figure I.3 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance.....	18
Figure I.4 : Les opérations de maintenance.....	22
Figure I.5 : Les durées caractéristiques de FMD.....	28
Figure I.6 : La nécessaire rigueur des relevés, préliminaire à la fiabilité.....	31
Figure II.1 : Illustration du principe de sélectivité.....	41
Figure II.2 : Illustration du principe de subordination.....	42
Figure II.3 : Les cinq étapes de la MBF et les outils à mettre en œuvre.....	44
Figure II.4 : Exemple de feuille d’AMDEC simplifiée de sélection des défaillances.....	45
Figure II.5 : Logigramme de choix d’actions.....	47
Figure III.1 : Structure d’objectifs [GRA, 98]	55
Figure III.2 : Exemples de diagrammes de Gantt (a) par OF et (b) par ressource.....	57
Figure III.3 : Une approche coopérative de l’ordonnancement [GRA et al, 99]	64
Figure III.4 : Une approche interactive de l’ordonnancement.....	65
Figure III.5 : L’évaluation dans l’ordonnancement interactif.....	66
Figure IV.1 : Charges et capacité.....	70
Figure IV.2 : Vocabulaire de la tâche.....	73
Figure IV.3 : Structure d’un graphe de Gantt.....	74
Figure IV.4 : Le partage des responsabilités de programmation en maintenance.....	75

Figure IV.5 : Structure d'un planning de charge prévisionnelle (sur 4 mois, par exemple)....	78
Figure IV.6 : Graphe de charge cumulée.....	79
Figure IV.7 : Exemple de planning de lancement.....	80
Figure IV.8 : Structure d'un graphe d'atelier.....	82
Figure IV.9 : Les flux de communication de l'ordonnancement.....	82
Figure IV.10 : Le lancement, clé de la productivité de la maintenance.....	84
Figure IV.11 : Carnet à trois volets.....	86
Figure IV.12 : Synthèse des procédures.....	88
Figure IV.13 : Enclenchement des phases.....	89
Figure V.1 : Situation géographique de GERMAN.....	92
Figure V.2 : Organigramme de l'entreprise GERMAN.....	94
Figure V.3 : Organigramme de la sous Direction Système d'Information.....	95
Figure V.4 : Organigramme du service des Ressources Humaines.....	96
Figure V.5 : Organigramme de la Direction Réalisation.....	98
Figure V.6 : Production Chariots Elévateurs année 2010.....	101
Figure V.7 : Organigramme du département Maintenance.....	102
Figure V.8 : L'effectif du département Maintenance.....	105
Figure V.9 : Le processus de fabrication d'un Chariot Elévateur.....	106
Figure V.10 : Le processus de fabrication de la Roue Dentée.....	108
Figure V.11 : Diagramme de PARETO.....	111
Figure V.12 : Planification des tâches de maintenance (a) une avance (b) un retard.....	112
Figure V.13 : Exemple de représentation des conflits.....	113
Figure V.14 : GANTT Machines.....	114
Figure V.15 : GANTT Jobs.....	114

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Niveau de caractérisation FMD d'un équipement.....	27
Tableau I.2 : Quelles sont les analyses FMD possibles ?.....	32
Tableau IV.1 : Les cinq niveaux d'ordonnement en maintenance.....	77
Tableau V.1 : Production Chariots Elévateurs année 2010.....	100
Tableau V.2 : Programme de production 2eme trimestre 2011.....	101
Tableau V.3 : Codification des machines.....	107
Tableau V.4 : Calcul des paramètres MTBF, MTTR, D, μ et λ	110
Tableau V.5 : Calcul des paramètres du diagramme de PARETO.....	111
Tableau V.6 : Planification des tâches de maintenance.....	113
Tableau V.7 : Résultat des écarts.....	115

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale et problématique

Face à la concurrence nationale et internationale, les managers industriels doivent être en mesure de maîtriser toute perturbation susceptible d'être néfaste à la productivité. En effet, réduire la fréquence des pannes et assurer la disponibilité des équipements, au moment opportun et à un niveau acceptable sont des conditions nécessaires au bon déroulement de la production, au respect des délais de livraison et à la réduction des prix de revient. D'où, la maintenance est considérée, comme un outil indispensable à la bonne marche d'une entreprise.

Sachant qu'une maintenance bien organisée permet d'éviter les coûts indirects, liés aux rebuts et aux arrêts de machines non prévus. En effet, pour définir les tâches d'une maintenance plus efficace, il s'avère nécessaire d'adopter une démarche de préparation (peuvent être de différentes natures : dépend seulement de la tâche à effectuer ou de la tâche à effectuer et de la tâche qui la précède) et d'analyse préalable des équipements de production et le plan d'intervention, de prévoir les défaillances probables, les dates et les durées d'exécution des interventions. Pour atteindre cet ultime objectif la maintenance doit se doter de moyens permettant d'intervenir dans les meilleures conditions.

La littérature de la maintenance recense plusieurs études relative à l'optimisation de la maintenance des systèmes de production et d'autres concernant le problème d'optimisation de la disponibilité des systèmes industriels, mais sont rare ceux qui étudient le problème d'optimisation de l'ordonnancement des travaux de maintenance, c'est dans contexte que s'inscrit le thème de notre mémoire.

Notre travail s'inscrit dans le cadre des activités du Laboratoire d'Automatique et de Productique (LAP), à l'université de Batna, équipe Maintenance et Pilotage des Systèmes de production. Il consiste à mettre en œuvre une démarche d'optimisation des activités de Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) d'un système de production.

Notre étude a visé la société des matériels de gerbage et de manutention (GERMAN) située à Ain Smara – Constantine, étant constructrice de chariots élévateurs, et des différentes pièces entrant dans leurs fabrications.

Afin d'atteindre notre objectif, nous commençons dans le premier chapitre par les concepts et les définitions des activités de la maintenance industrielle (l'historique de la maintenance, les différentes définitions et politiques de la maintenance,...)

Le deuxième chapitre est consacré à la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF), présentant l'origine, les définitions, les objectifs ainsi que les principes de cette méthode.

Le troisième chapitre porte sur l'ordonnancement dans les ateliers de production, et comprend la définition, les éléments d'un problème d'ordonnancement, les objectifs, ainsi que les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnancement.

Le quatrième chapitre traite les notions de base de la fonction ordonnancement des activités de la maintenance et son effet sur la bonne marche de la production.

Enfin dans le dernier chapitre, et après présentation de la société et de ses différents services servant à notre application, nous posons le problème rencontré lors de l'ordonnancement de la maintenance et la solution proposée pour le résoudre, en utilisant comme logiciel « MATLAB ».

En conclusion, nous présenterons l'apport de notre travail ainsi que les perspectives.

Chapitre I

Concepts et définitions des activités de la maintenance industrielle

I.1. Introduction:

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que le besoin de produire vite et bien, ont obligé les industriels à structurer et à organiser les « ateliers d'entretien», ils ont surtout créé de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles manières d'intervenir sur des structures de production concernant les produits manufacturés. [BEN, 06]

Aujourd'hui, *l'entretien* a laissé la place à la *maintenance*. Ce changement ne réside pas uniquement dans un changement de dénomination, mais aussi dans un bouleversement complet de la manière de faire et de concevoir ce qui s'appelait «entretien» et que l'on appelle aujourd'hui «maintenance». [BEN, 06]

Il y a quelques dizaines d'années, les ateliers de production ne disposaient d'aucune structure de maintenance. L'entretien des machines ou des unités de production se faisait par des personnes, spécialisées ou non, sans logistique établie et surtout définie. [BEN, 06]

La production intensive, la complexité des systèmes et surtout la rentabilité, ont poussé les industriels à créer un domaine et une structure dans l'entreprise appelée : «service maintenance». Ce service structuré comporte différents corps de métiers comme des électriciens, des mécaniciens, des électroniciens, des automaticiens. Ces spécialistes interviennent chacun dans leur domaine respectif, mais en respectant une coordination dans les tâches à effectuer. [BEN, 06]

Différentes tâches sont attribuées à ce service, en particulier:

- l'entretien du matériel de production ;
- la remise en état du matériel en situation de dysfonctionnement ;
- la remise à neuf du matériel (rénovation) ;
- la gestion et l'étude des coûts d'intervention ;
- l'organisation et la planification judicieuse des opérations de maintenance ;
- le suivi informatique de l'évolution dans le temps du matériel (fichier historique). [BEN, 06]

I.2. Histoire de la maintenance :

- **Histoire du nom :**

Le terme «maintenance», forgé sur les racines latines *manus* et *tenere*, est apparu dans la langue française au XII^e siècle. L'étymologiste Wace a trouvé la forme *mainteneor* (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c'est une forme archaïque de «mainteneur».

Anecdotiquement, c'est avec plaisir que j'ai retrouvé l'usage du mot «maintenance» sous la plume de François Rabelais, qui, vers 1533, parlait de la «maintenance de la loy» dans *Pantagruel*. [MON, 00]

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : « maintien dans des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » ! [MON, 00]

I.3. Les définitions de la maintenance :

I.3.1. Définition AFNOR X 60-010 (décembre 1994) :

La maintenance est *«l'ensemble des 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»*. [MON, 00]

Cette définition AFNOR peut être complétée par le document d'introduction à la maintenance X 60-000 qui précise : *«Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal.»* [MON, 00]

Notons que les actions de maintenance ne sont pas seulement techniques : l'action technique est encadrée, pilotée par des actions de gestion (économie et administration) et de management, ce qui implique une large polyvalence.

Le terme «maintenir» contient la notion de surveillance et de prévention sur un bien en fonctionnement normal. Le terme «rétablir» contient la notion de correction (remise à niveau) après perte de fonction. [MON, 00]

I.3.2. Définition CEN projet WI 319-003 (1997) :

La maintenance est «l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinée à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise». [MON, 00]

La fonction requise est ainsi définie : «fonction, ou ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaire pour fournir un service donné». [MON, 00]

- L'opération de maintenance peut se définir comme étant une suite d'actions organisées, intervenant sur un système et ayant un double objectif.

Premier objectif: rétablir un bien, en état de dysfonctionnement et le replacer en état de fonctionnement, donc de produire.

Deuxième objectif: maintenir ce bien, par une suite d'actions préventives et planifiées, en état parfait de fonctionnement, donc de produire. En règle générale, le service maintenance doit garder l'outil de production en état opérationnel, afin d'assurer une production efficace et maximale.

(Biens: machines, systèmes automatisés de production, mécanismes, appareils divers)
[BEN, 06]

I.4. Différence entre l'entretien et la maintenance:

Entretien: ce terme désigne les opérations ou les interventions à effectuer sur un matériel de production afin de le conserver en parfait état de produire. Les opérations correspondantes, souvent ordonnées par le constructeur, peuvent prendre la forme:

- De vidange (huile de lubrification) ;
- De graissage (paliers de guidage) ;
- De changement de courroies, etc. [BEN, 06]

Maintenance: la maintenance permet d'organiser, prévoir, planifier et gérer les opérations d'entretien. La maintenance permet donc de conserver un bien dans son état maximal de production. Aux activités techniques effectuées par des spécialistes viennent se greffer d'autres responsabilités comme:

- l'organisation d'une structure de maintenance préventive ;
- le suivi des coûts ;
- l'analyse des pannes ainsi que le compte rendu des interventions de maintenance ;
- le suivi informatique du vieillissement du matériel ;
- l'établissement d'un fichier historique du suivi de maintenance par secteur et par machine ;
- la gestion des stocks de pièces détachées ;
- les activités de conseil (AMDEC...). [BEN, 06]

I.5. Situation du service de maintenance dans une entreprise:

La finalité d'une entreprise est double :

- *De point de vue économique:* elle investit des capitaux, d'état ou privés, afin de rechercher un profit maximal dans la production des biens ou la prestation de services,
- *De point de vue social:* elle facilite l'accession de couches sociales de plus en plus larges à plus de sécurité, de bien-être, d'épanouissement individuel et collectif,

Pour satisfaire ce double objectif une entreprise est un système, c'est-à-dire un tout organisé d'un ensemble de sous-systèmes en inter-relation (figure ci-dessous). [BEN, 06]

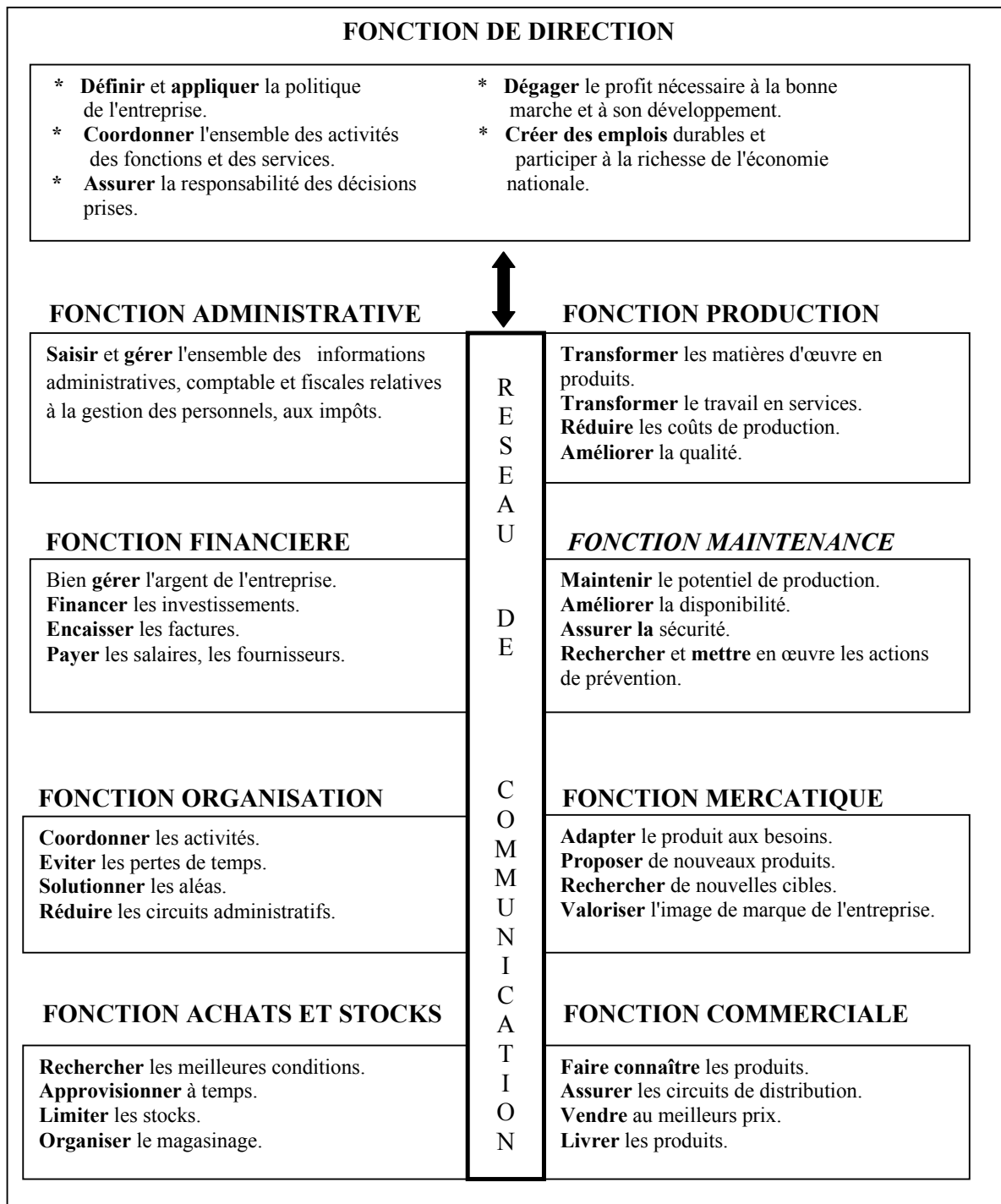


Figure I-1 Situation du service de maintenance dans une entreprise.

I.6. Structure des activités de l'atelier de maintenance:

Le schéma ci-dessous donne un aspect général de cette structure : [BEN, 06]

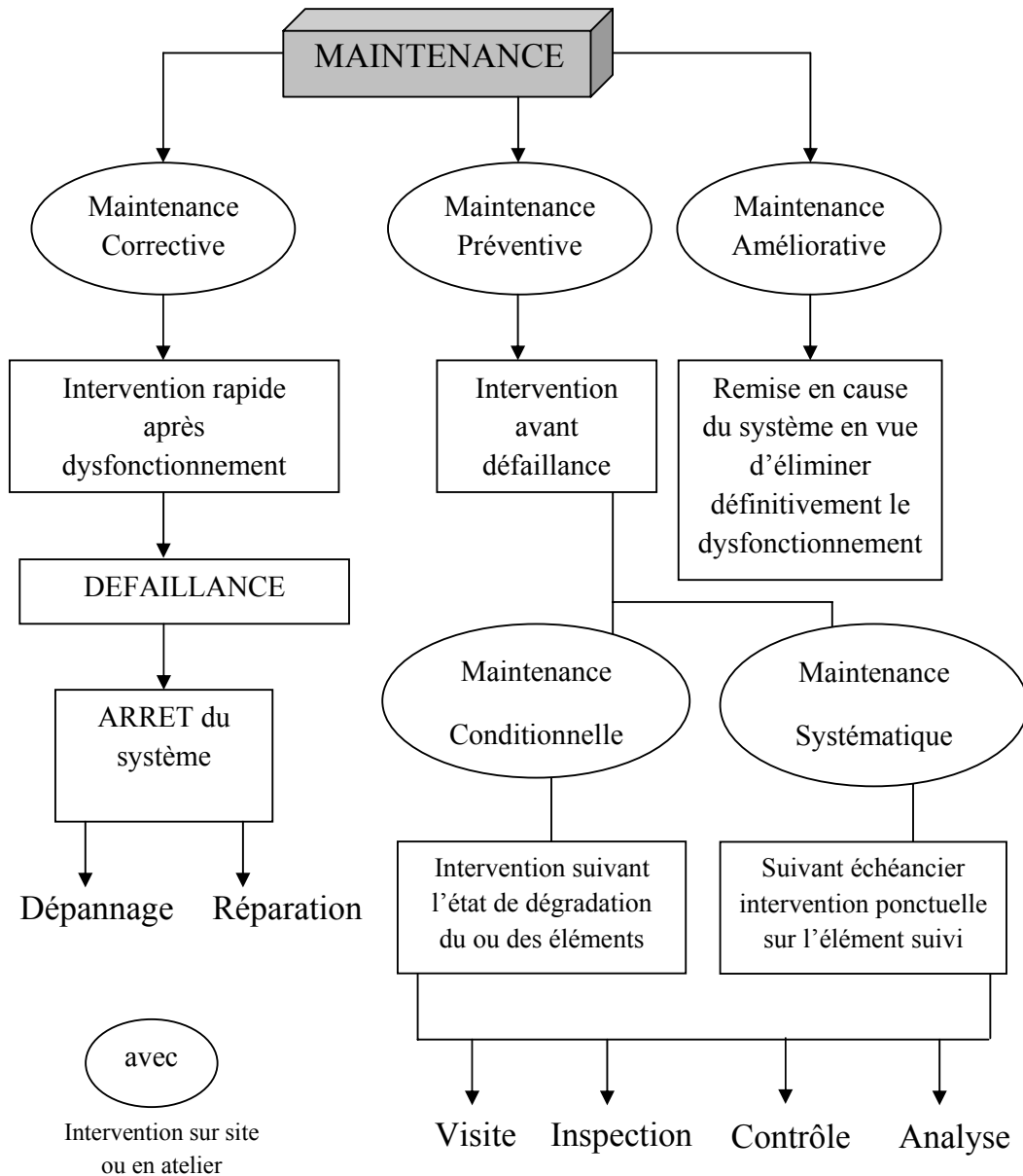


Figure I-2 Structure des activités de l'atelier de maintenance

Suivant les interventions de maintenance à effectuer, la logique et la méthode de travail qui permettent de garder le système en état de fonctionnement optimum sont différentes. [BEN, 06]

Deux types d'événements sont possibles:

- ***L'intervention est prévue et planifiée:***

Dans ce cas, l'intervention est une opération de ***maintenance préventive***. L'arrêt machine intervient quand celui-ci ne porte pas à conséquence sur la production. Les interventions peuvent prendre deux aspects différents:

- Le changement systématique des éléments ou pièces mécaniques prévus. La maintenance est dite «*systématique*» ;
- Le changement en fonction de l'état d'usure des éléments mécaniques. La maintenance est dite «*conditionnelle*». [BEN, 06]

- ***L'intervention est imprévue et provient d'un incident (technique) :***

L'intervention est alors une opération de ***maintenance corrective***. L'arrêt machine n'a pas été prévu et a presque toujours des conséquences sur la production. Les interventions doivent être rapides et ne sont pas toujours définitives.

Il peut se produire dans un premier temps, pour remettre rapidement le système en fonctionnement, une opération dite «*de dépannage*» qui ne sera pas définitive. Elle sera suivie, le plus rapidement possible d'une réparation qui elle sera définitive. [BEN, 06]

Remarques:

Dans le cas d'une intervention de maintenance corrective, si les éléments défectueux sont disponibles, il est alors possible d'effectuer une opération dite «de réparation». Dans le cas contraire, il faut procéder le plus vite possible à un approvisionnement des pièces manquantes. Suivant le degré d'urgence, le technicien procède à une intervention provisoire afin de remettre le système en service en respectant, toutefois, les consignes de sécurité.

Dans tous les cas, chaque intervention fait l'objet d'un compte rendu d'intervention, suivi d'une mise à jour des fichiers historiques. [BEN, 06]

I.7. Opérations de prévention:

Les opérations relatives à la prévention peuvent être regroupées en trois grandes familles:

- **La visite :** c'est une opération de surveillance, se situant dans le cadre d'actions de maintenance préventive. Elle peut consister en un examen détaillé et approfondi d'une partie ou de l'ensemble du système suivi ; [BEN, 06]
- **Le contrôle:** cette opération a pour objectif de vérifier des critères ou des données définis. Elle a pour base des références de vérification parfaitement établies ; [BEN, 06]
- **L'inspection:** c'est l'examen attentif exécuté dans un but de surveillance. Au cours d'une inspection, il est possible de suivre l'évolution, sans intervenir, d'un défaut connu et évoluant dans le temps. [BEN, 06]

Les trois opérations de surveillance (visite, contrôle et inspection) se situent dans le cadre d'une structure de maintenance préventive. Elles peuvent par la suite, et suivant l'évolution du ou des défauts constatés, suivis et enregistrés, donner lieu à des opérations de maintenance corrective.

Cette méthode de suivi évite souvent des arrêts accidentels des chaînes de production. Cette façon de concevoir l'entretien des biens de production, permet de planifier à des moments choisis, les interventions correctives de maintenance. [BEN, 06]

I.8. Différentes politiques de maintenance:

Le choix d'une méthode de maintenance traduit la politique de maintenance de l'entreprise qui a pris en compte certains objectifs tels que:

- Réduction des périodes d'indisponibilité des matériels;
- Réduction des coûts de maintenance ;
- Amélioration de la qualité des produits ; [BEN, 06]

I.8.1. Maintenance préventive:

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Autrement dit, la maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilités de dysfonctionnement des systèmes de production.

La maintenance préventive peut être:

- systématique ;
- conditionnelle ;
- prévisionnelle. [BEN, 06]

I.8.1.1. Maintenance préventive systématique:

La maintenance préventive systématique permet d'effectuer des opérations de maintenance, afin d'éliminer ou de diminuer les risques de dysfonctionnement des systèmes de production. Elle s'effectue suivant un échéancier prévu et établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage du bien. Cette unité d'usage caractérise l'exploitation du bien. [BEN, 06]

Exemples:

- *Le km parcouru pour une locomotive ;*
- *La tonne produite pour un haut-fourneau ;*
- *La palette conditionnée pour une empaqueteuse.*

Cette méthode de maintenance s'applique à des équipements:

- Soumis à une réglementation sécuritaire: ponts roulants, matériels d'incendie, installations sous pression,...
- Présentant des coûts de défaillance très élevés:système avec processus de production continu, lignes de fabrications automatisées,...
- Pour lesquels une défaillance peut entraîner des accidents graves:matériels de transport en commun des personnes, appareils et constituants utilisés dans l'énergie nucléaire,... [BEN, 06]

I.8.1.2. Maintenance préventive conditionnelle:

La maintenance préventive conditionnelle est subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen.

Exemple:

Sur une presse hydraulique le déclenchement d'un indicateur de colmatage entraîne le remplacement ou le nettoyage du filtre encrassé. [BEN, 06]

I.8.1.3. Maintenance préventive prévisionnelle:

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de dégradation du bien, permettant, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc de planifier une intervention avant défaillance totale ou partielle. Elle est encore appelée maintenance prédictive, mais ce terme n'est pas normalisé. [BEN, 06]

Exemple:

- *La mesure périodique du niveau vibratoire d'une machine permet de programmer des activités de maintenance lorsque ce niveau augmente puis dépasse une valeur prédéterminée.*
- *L'intensité à vide, absorbée par un transformateur de puissance, traduit l'état de l'isolement diélectrique des enroulements et à partir d'une valeur donnée déclenche la révision générale du transformateur.*

La maintenance préventive prévisionnelle peut s'appliquer à tous les matériels. Son efficacité est grandement accrue par l'utilisation de l'outil informatique. [BEN, 06]

I.8.2. Maintenance corrective:

La maintenance corrective regroupe l'ensemble des activités réalisées après la défaillance (totale ou partielle) d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

La maintenance corrective peut être:

- palliative ;
- curative. [BEN, 06]

I.8.2.1. Maintenance corrective palliative:

La maintenance corrective palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Ces activités du type dépannage qui présentent un caractère provisoire devront être suivies d'activités curatives. [BEN, 06]

I.8.2.2. Maintenance corrective curative:

La maintenance corrective curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.

Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent. [BEN, 06]

I.8.3. Maintenance « améliorative »:

Après plusieurs défaillances de même nature, ce type de maintenance permet, après réflexion et étude, d'éliminer le problème. Elle nécessite obligatoirement une concertation entre services Production-Bureau d'étude et Maintenance. [BEN, 06]

I.9. Les niveaux de maintenance:

Un niveau de maintenance se définit par rapport:

- À la nature de l'intervention ;
- À la qualification de l'intervenant ;
- Aux moyens mis en œuvre.

La norme *NF X 60-010* donne, à titre indicatif, cinq niveaux de maintenance, en précisant le service qui en a la responsabilité, la production ou la maintenance. [BEN, 06]

- **Premier niveau:**

Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement.

Exemples:

- *Echanges en toute sécurité d'éléments consommables tels que: fusibles, voyants, ...*
- *Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.*

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation. [BEN, 06]

- **Deuxième niveau:**

Il s'agit de dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opérations mineures de maintenance préventive.

Exemples:

- *Graissage d'une machine ;*
- *Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements thermiques ;*
- *Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.*

Ces interventions de deuxième niveau peuvent être réalisées par un technicien ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçu une formation pour les exécuter en toute sécurité. [BEN, 06]

- **Troisième niveau:**

Il s'agit d'identification et de diagnostic de pannes suivis éventuellement:

- *D'échanges de constituants ;*
- *De réparations mécaniques mineures ;*
- *De réglage et ré étalonnage général des mesureurs.*

Exemples :

- *Remplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension ;*
- *Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine ;*
- *Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette.*

Les interventions de troisième niveau peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans un atelier de maintenance. [BEN, 06]

- ***Quatrième niveau :***

Il s'agit de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.

Exemples :

- *Révision générale d'un compresseur ;*
- *Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage ;*
- *Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil.*

Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention. [BEN, 06]

- ***Cinquième niveau :***

Il s'agit de tous les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante, confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services.

Exemples :

- *Révision générale de la chaufferie d'une usine ;*
- *Rénovation d'une ligne de conditionnement de flacons pour améliorer son degré d'automatisation ;*
- *Réparation d'un engin de levage portuaire partiellement endommagé à la suite d'une tempête.*

Dans ce type de travaux les moyens et les méthodes sont comparables à ceux mis en œuvre lors de la fabrication des matériels. C'est au constructeur d'en fournir, les spécifications techniques et constructives. [BEN, 06]

I.10. Documents nécessaires à prévoir:

Une intervention de maintenance sur un système ne peut se faire sans référence à des documents précis et à jour. Chaque machine ou système possède différents dossiers qui permettent de connaître les différentes structures de l'ensemble. Les interventions de maintenance sont obligatoires pour la conservation du système dans un état optimal de production. De plus, ces interventions doivent se faire au moindre coût, sans gêner la production. Pour tenir cet objectif, il est indispensable de pouvoir consulter à tout moment le passé, au niveau technique, du bien de production.

L'informatique, grâce à des logiciels parfaitement adaptés à cette gestion de maintenance, permet d'établir des dossiers, de les tenir à jour, de les consulter à tous moments, facilitant ainsi les interventions de maintenance. [BEN, 06]

I.10.1. Dossier technique:

Ce dossier d'ordre général regroupe les aspects techniques propres à un type de machine, à savoir:

- Les schémas électriques;
- Les plans et schémas mécaniques;
- Les données et paramètres de fonctionnement;
- Les caractéristiques fonctionnelles. [BEN, 06]

I.10.2 Dossier machine:

Ce dossier, particulier à la machine, ne concerne que celle-ci. Il peut comporter des documents ou renseignements comme:

- Sa mise en service;
- Les consignes particulières d'installation et de mise en place. [BEN, 06]

- ***Dossier relatif à son cycle de fonctionnement:***

- Les différents GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition);
- Le GEMMA (Guide d'Etude des Modes de Marches et d'Arrêts). [BEN, 06]

- ***Dossier relatif à la partie mécanique:***

- Les spécifications de réglage;
- Les interventions de maintenance particulières;
- Les modifications intervenues après mise en service;
- Les spécifications particulières, au niveau sécurité, concernant certaines interventions présentant des risques. [BEN, 06]

- ***Sous-dossier dit «fichier historique»:***

Il va regrouper les traces écrites ou informatisées du passé propres au système. C'est à ce niveau que l'on peut parler d'évolution de maintenance par rapport à un entretien.

On trouve par exemple:

- Tout le *passé de l'entretien classique*, préconisé par le constructeur comme:
- Les révisions des éléments mécaniques;
- Les vidanges et graissages des éléments de transmission de mouvement.

Les *dysfonctionnements*:

- Les pannes ou arrêt anormaux;
- Les dépannages puis les réparations.

La *logique maintenance* doit faire apparaître également le coût financier de cette "logistique". Seront pris en compte:

- Les coûts d'intervention;
- Le temps passé par intervention;
- Le coût des éléments changés;

- La gestion du magasin de pièces détachées, en tenant compte de préserver un stock minimum.

L'outil informatique peut se montrer très performant et permettre une gestion facile et logique de la structure «maintenance» d'une unité de production. [BEN, 06]

I.11. Fonctions opérationnelles du service maintenance :

- **Classification des fonctions opérationnelles :**

Nous proposons la classification schématique (Figure I-4). [MON, 00]

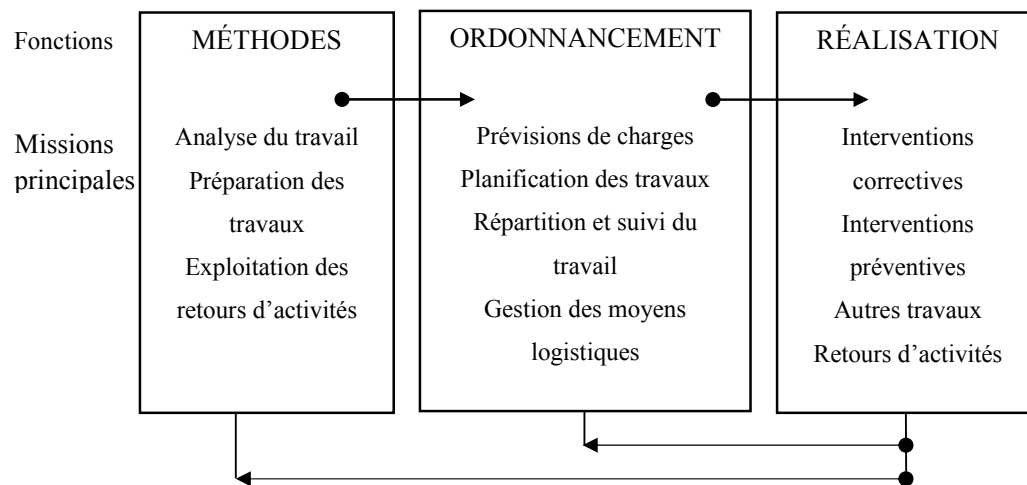


Figure I-3 Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance

I.12. Les opérations de maintenance:

I.12.1. Le dépannage :

- **Définition :**

Action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement ; compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation. [BOI et HAZ, 87]

- **Conditions d'applications :**

Le dépannage, opération de maintenance corrective, n'a pas de conditions d'applications particulières.

La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps.

Souvent les interventions de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses.

De ce fait les services de maintenance, soucieux d'abaisser leurs dépenses, tentent d'organiser les actions de dépannage. [BOI et HAZ, 87]

- **Cas d'applications :**

Ainsi le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt. [BOI et HAZ, 87]

I.12.2. La réparation :

- **Définition :**

Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance. [BOI et HAZ, 87]

- **Conditions d'applications :**

L'application de la réparation, opération de maintenance corrective, peut être décidée, après décision, soit immédiatement à la suite d'un incident, ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

Remarque : la réparation correspond à une action définitive, l'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. [BOI et HAZ, 87]

- **Cas d'application :**

Tous les équipements sont concernés. [BOI et HAZ, 87]

I.12.3. Les inspections :

Ce sont des activités de surveillance consistant à relever périodiquement des anomalies et exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements. [BOI et HAZ, 87]

I.12.4. Les visites :

Ce sont des opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée.

Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies au préalable qui peuvent entraîner des démontages d'organes et une immobilisation du matériel. [BOI et HAZ, 87]

I.12.5. Les contrôles :

Ils correspondent à des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies suivies d'un jugement.

Le contrôle peut : comporter une activité d'information ; inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement ; déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

Les opérations de surveillance (inspection, visite, contrôle) sont nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage. [BOI et HAZ, 87]

I.12.6. Les révisions :

Ensemble des actions d'exams, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné (X 60-011).

Commentaires : il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales.

Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles.

Ainsi, le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections, etc.

Les deux types d'opération définis (révision partielle ou générale) relèvent du 4^e niveau de maintenance tel que défini par la norme X 60-011. [BOI et HAZ, 87]

I.12.7. Les échanges standards :

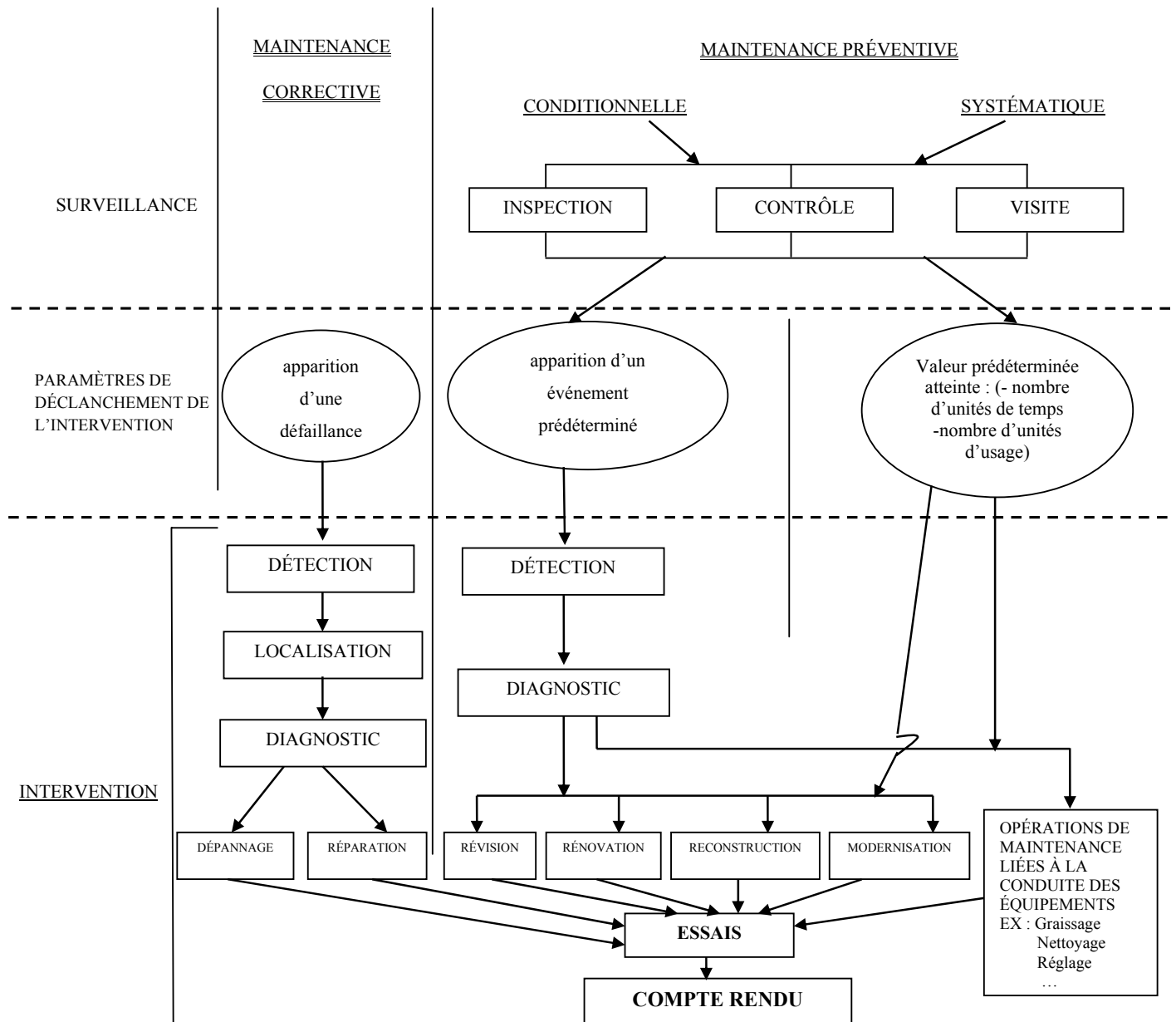
Reprise d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état.

Note : la **soulte** est une somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des lots ou des biens échangés.

Commentaire : afin d'accélérer les procédures et de diminuer les coûts, le recouvrement de la soulte peut être forfaité.

Les termes précédemment définis – révision, rénovation, reconstruction, modernisation – semblent couvrir l'ensemble des interventions pour la remise à un état satisfaisant d'aptitude à l'emploi d'un bien grand public ou à usage industriel et professionnel.

Dans certains secteurs particuliers de l'activité économique, d'autres termes sont également utilisés, et il serait préférable afin de ne pas créer d'ambiguïté, de les prohiber à propos d'opérations concernant des biens à usage industriel et professionnel. Ces termes sont : réfection, relevage, ravalement, reconditionnement, restauration, réhabilitation... [BOI et HAZ, 87]



I.13. Les activités connexes de la maintenance:

Ces activités complètent les actions de maintenance citées ci-dessus et participent pour une part non négligeable à l'optimisation des coûts d'exploitation. [BOI et HAZ, 87]

I.13.1. La maintenance d'amélioration :

L'amélioration des biens d'équipements consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspondant à la maintenance d'amélioration. [BOI et HAZ, 87]

- *Conditions d'applications :*

Dans ce domaine beaucoup de choses restent à faire. Il suffit de se référer à l'adage suivant : «On peut toujours améliorer.» C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cette créativité impose la critique.

Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet.

Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences d'interventions ; l'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance) ; la standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance, l'augmentation de la sécurité du personnel. [BOI et HAZ, 87]

- *Cas d'application :*

Tous les matériels sont concernés à condition que la rentabilité soit vérifiée.

Cependant une petite restriction pour les matériels à renouveler dont l'état est proche de la réforme, pour usure généralisée ou par obsolescence technique. [BOI et HAZ, 87]

➤ **La rénovation** (extrait de la norme X 50-501, février 1982) :

Inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défectueux, conservation des pièces bonnes.

Commentaire : la rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition. **[BOI et HAZ, 87]**

➤ **La reconstruction** :

Remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes.

La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications.

Note : les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc. **[BOI et HAZ, 87]**

➤ **La modernisation** :

Remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

Note : cette opération peut aussi bien être exécutée dans le cas d'une rénovation, que dans celui d'une reconstruction.

La rénovation ou la reconstruction d'un bien durable peut donner lieu pour certains de ses sous-ensembles ou organes à la pratique d'un échange standard. **[BOI et HAZ, 87]**

I.13.2. Les travaux neufs :

L'adjonction à la fonction maintenance de la responsabilité des travaux neufs est très répandue, en particulier dans les entreprises de taille moyenne. Elle part du principe que, lors de tout investissement additionnel de remplacement ou d'extension, il est logique de consulter les spécialistes de la maintenance qui, d'une part, connaissent bien le matériel anciennement en place, et d'autre part auront à maintenir en état de

marche le matériel nouveau. A partir de là, on prend souvent la décision de leur confier l'ensemble des responsabilités de mise en place des nouvelles installations. On crée alors un service appelé «maintenance-travaux neufs». [BOI et HAZ, 87]

L'étendue des responsabilités en matière de travaux neufs est très variable d'une entreprise à l'autre. Il peut s'agir de la construction d'un quai ou d'un bâtiment, de la mise en place d'une machine achetée à l'extérieur (raccordement à la source d'énergie, etc.), ou même de la réalisation intégrale de la machine elle-même. Dans certains cas les «travaux neufs» auront recours à la fabrication de l'entreprise qui réalisera les commandes passées par eux-mêmes.

Notons que même si la fonction maintenance ne se voit pas adjoindre la fonction «travaux neufs», le service s'occupera des installations succinctes du type modifications (réfection d'un bureau, etc.). [BOI et HAZ, 87]

I.13.3. La sécurité :

La sécurité est l'ensemble des méthodes ayant pour objet, sinon de supprimer, du moins de minimiser les conséquences des défaillances ou des incidents dont un dispositif ou une installation peuvent être l'objet, conséquences qui ont un effet destructif sur le personnel, le matériel ou l'environnement de l'un et de l'autre.

Sachant qu'un incident mécanique, une panne, peuvent provoquer un accident..., sachant aussi que la maintenance doit maintenir en état le matériel de protection ou même que certaines opérations de maintenance sont elles-mêmes dangereuses, il apparaît que la relation entre la maintenance et la sécurité est particulièrement étroite. [BOI et HAZ, 87]

Pour toutes ces raisons ainsi que pour sa connaissance du matériel, le responsable de la maintenance devra participer aux réunions du Comité d'Hygiène et de Sécurité (CHS) en qualité de membre ou à titre d'invité, et développer sa collaboration avec l'ingénieur sécurité lorsque l'entreprise en possède un.

Dans une entreprise moyenne où la sécurité n'a pas de service propre, on trouve normal de faire appel au service maintenance pour les interventions concernant la sécurité. Celles-ci sont de deux ordres :

- D'une part celles que l'on peut classer dans la sécurité «officielle». C'est la tenue des registres concernant les chaudières, les visites d'appareils à pression, le contrôle des installations électriques, etc., la tenue des dossiers des rapports de visite de l'inspecteur du Travail, du contrôleur de Sécurité sociale, etc. ;
- D'autre part celles qui, tout en s'inspirant des premières, les appliquent dans un contexte précis. [BOI et HAZ, 87]

I.14. Les analyses FMD des systèmes réparables :

I.14.1. Disponibilité des systèmes réparables et ses composantes :

- **Définitions (Projet CEN WI 319-003) :**

- **Disponibilité :**

«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.» [MON, 00]

Remarques :

1. Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.
2. Les moyens extérieurs autres que la logistique de maintenance n'affectent pas la disponibilité du bien. [MON, 00]

- **Fiabilité :**

«Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné.» [MON, 00]

Remarque :

Le terme «fiabilité» est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité. [MON, 00]

- **Maintenabilité :**

«Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance

est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.» [MON, 00]

- **Arborescence et caractéristiques FMD d'un système réparable :**

- **Les trois niveaux de l'arborescence concernés par FMD :**

Les équipements industriels inventoriés sont tous des systèmes réputés «réparables» et, à ce titre, pris en responsabilité par la maintenance. Les trois niveaux de caractérisation FMD d'un équipement sont regroupés au Tableau I-1. [MON, 00]

	Propriétés	Caractéristique FMD
Ensemble	Toujours réparable	Disponibilité
Module	Réparable ou consommable	Maintenabilité et fiabilité
Composant	Consommable, parfois réparable	fiabilité

Tableau I-1 Niveau de caractérisation FMD d'un équipement

Y a-t-il des systèmes «non réparables»? Ce sont les systèmes dits «monocoup» comme le sont certains systèmes de sécurité ou d'armes (missiles, torpilles, fusées, etc.) et les lanceurs spatiaux (Ariane). [MON, 00]

- **Le cas du «module» réparable :**

Le module est un sous-ensemble identifié (carte électronique, moteur, vérin, etc.) possédant la propriété d'être réparable, mais à un niveau où le technicien de maintenance doit se poser les questions successives :

- Je répare le module défaillant (avec le risque d'indisponibilité forte) ou je le «consomme» par échange standard rapide ?
- Si je le consomme, je le répare (en temps différé) ou je le rebute ?

Les caractéristiques de fiabilité et de maintenabilité du module sont les critères objectifs qui permettent de résoudre ces choix successifs. Les réponses sont de nature économique, obtenues à partir de la simulation du coût de chaque scénario en prenant en compte les coûts directs d'intervention, les coûts induits liés à l'indisponibilité du système et le coût du magasinage des modules de rechange. [MON, 00]

I.14.2. Analyses FMD : indicateurs opérationnels :

- Temps de fiabilité, maintenabilité et disponibilité :

➤ Définitions :

La figure I-5 schématise les états successifs que peut prendre un système réparable.

[MON, 00]

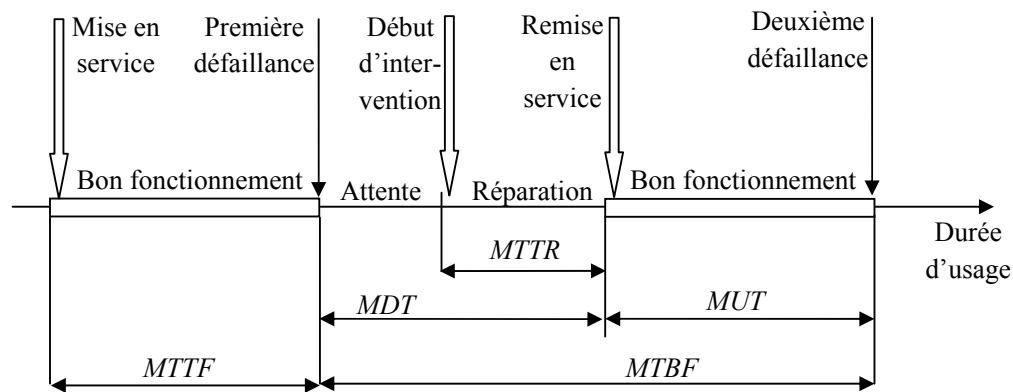


Figure I-5 Les durées caractéristiques de FMD

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique $m(t)$ ou probabiliste $E(t)$ des n durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- MTTF (*mean time to [first] failure*) : temps moyen avant première défaillance.
- MTBF (*mean time between failure*) : temps moyen entre deux défaillances successives.
- MDT ou MTI (*mean down time*) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre.
- MUT (*mean up time*) : temps moyen de disponibilité.
- MTTR (*mean time to repair*) : temps moyen de réparation. [MON, 00]

➤ **Utilisation :**

Dans cette analyse, le système ne peut prendre que deux états : 0 = il n'est pas opérationnel, ou indisponible ; 1 = il est opérationnel, ou disponible.

Des analyses plus fines et plus complexes permettent d'intégrer un état intermédiaire nommé «mode dégradé», très utilisé en sûreté de fonctionnement. En maintenance, le choix d'un seuil d'admissibilité «s» permet de basculer de 1 à 0 face à une dégradation. [MON, 00]

MTTF est utilisée dans les systèmes «monocoup» ou non réparables. Dans ce cas : $MTTF = MTBF$. Dans les systèmes réparables, *MTTF* est un indicateur de qualité. Le premier *TTF* est à intégrer à la collecte des *TBF*.

Nous proposons d'utiliser *MTA* (moyenne des temps d'arrêt) pour les temps d'arrêt relevés sous ce nom par la production. Et d'utiliser *MTI* (moyenne des temps d'indisponibilité propre) plutôt que *MDT* pour les temps d'arrêt de production imputable à la maintenance, l'équipement étant requis. *MTI* est important en gestion de la maintenance, puisque c'est le temps qu'il faut relever pour estimer les coûts indirects d'indisponibilité.

Un cas fréquent se produit lorsque la $MTI = MDT \ll MUT$, il y a quasi-identité entre *MUT* et *MTBF*. Par exemple : 15 minutes d'indisponibilité moyenne tous les trois mois. Notons que la francisation «moyenne des temps de bon fonctionnement» s'applique mieux, en toute rigueur, à la *MUT* qu'à la *MTBF*.

La nature des *MTBF* et des *MTTR* est très différente : les *TBF* sont des temps d'activité machine, les *TTR* sont des temps d'activité humaine. [MON, 00]

• **Indicateurs de FMD :**

Chacun des concepts FMD est défini rigoureusement par une probabilité $F(t)$, $M(t)$ et $D(t)$ quantifiable.

Des indicateurs (ou estimateurs, en statistique) permettent une évaluation opérationnelle de ces grandeurs à partir de paramètres simples relevés sur site. Ils seront plus ou moins rigoureux, donc plus ou moins significatifs. [MON, 00]

- **Indicateurs de fiabilité :**

Ils sont classés ici du plus approximatif vers le plus rigoureux.

N : nombre de pannes : «ma voiture est souvent en panne, donc elle n'est pas fiable».

λ : taux de défaillance moyen, exprimé en pannes/unité d'usage. Il est souvent supposé constant (hypothèse exponentielle dont la validité est à toujours à vérifier). Dans ce cas, cet indicateur donne lieu à des analyses de fiabilité simples. [MON, 00]

$MTTF$: moyenne des temps de bon fonctionnement jusqu'à la première défaillance, dont la date d'arrivée est peu significative de la suite.

$MTBF$: calculée à partir d'une moyenne statistique d'un échantillon de n durées TBF .

$R(t)$: fonction fiabilité (R vient de l'anglais *reliability*). C'est la fiabilité «stricte» définie comme la probabilité de bon fonctionnement d'un système à l'instant t , déterminée comme précédemment à partir d'un modèle probabiliste ajusté à un échantillon.

$MTBF$ calculée à partir de l'espérance mathématique de la variable aléatoire TBF en utilisant une loi de probabilité $R(t)$ ajustée à un échantillon de n valeurs de TBF relevées.

$\lambda(t)$: fonction taux de défaillance. Déduite de la fonction $R(t)$, c'est un bon indicateur du comportement d'un système.

Dans tous les cas, le niveau de signification de l'indicateur dépendra de deux facteurs initiaux :

- La taille N de l'échantillon collecté (d'où l'intérêt de regrouper des retours d'expérience comparables) ;
- La rigueur et la qualité du relevé des valeurs, qui passe par une compréhension et un consensus des opérateurs et dépanneurs chargés de ces relevés, ainsi que l'illustre par défaut la figure I-6. [MON, 00]

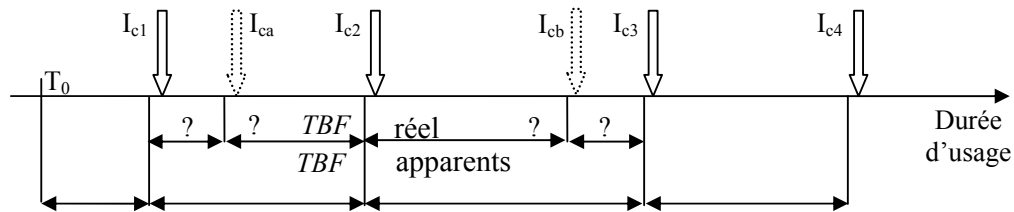


Figure I-6 La nécessaire rigueur des relevés, préliminaire à la fiabilité

I_{c1} , I_{c2} et I_{c3} sont normalement relevés. I_{ca} a été omise par l'équipe de nuit, I_{cb} n'est pas exploitable, car mal écrite ou notée sur un BT égaré. Il est évident que la *MTBF* déduite de ces valeurs apparentes sera très largement optimiste, quelle que soit la méthode de traitement utilisée. Cela n'est pas de la «fiabilité fiction» mais une réalité pour bien des services de maintenance ! Cette réalité mérite d'être corrigée avant d'envisager de passer à la MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité). [MON, 00]

- **Indicateurs de maintenabilité :**

MTTR est l'indicateur de maintenabilité. Elle peut être obtenue par la moyenne statistique d'un échantillon de n valeurs *TTR* ou par l'espérance mathématique de la variable *TTR* obtenue à partir d'un modèle probabiliste.

Notons que la durée d'intervention *TTR* n'est pas une donnée facile à acquérir.

$M(t)$ est la maintenabilité stricte. C'est la probabilité associée à un instant T , d'une remise en état de fonctionnement. Elle est déterminée à partir d'un modèle probabiliste. [MON, 00]

- **Indicateurs de disponibilité :**

L'indicateur de base de la disponibilité opérationnelle est :

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} < 1$$

Mais bien d'autres indicateurs peuvent être imaginés, plus ou moins rigoureux et choisis en fonction des données existantes. Quelques exemples :

$(T_O - T_A) / T_O$ avec T_O = temps d'ouverture et T_A le cumul des temps d'arrêt, ou des temps d'arrêt imputés à la seule maintenance ;

$MTBF - MTTR$ est un indicateur de disponibilité propre, MUT est un indicateur de disponibilité effective ;

MTI est un indicateur d'indisponibilité propre. [MON, 00]

• Tableau de synthèse des analyses FMD :

Arborescence d'un système	caractéristique	Analyses correspondantes		
		$R(t)$	$M(t)$	$D(t)$
Ensemble	Réparable	$MTBF$	$MTTR$	D_{op}
	Non réparable (monocoup)	$MTTF$	×	×
Module interchangeable	Réparable	$MTBF$	$MTTR$	×
	Consommable	$MTTF$	×	×
Composant	Consommable	$MTTF$	×	×

Tableau I-2 Quelles sont les analyses FMD possibles ?

- Les analyses de $MTTF$ et $MTBF$ sont identiques : nous utiliserons la notation $MTBF$ indistinctement.
- Les analyses de disponibilité ne sont significatives que pour des ensembles : il est cependant indispensable, dans le cas d'une ligne de production, de la décomposer en «trçons» dont chaque disponibilité sera évaluée, puis recomposée pour évaluer la disponibilité opérationnelle de la ligne. [MON, 00]

I.15. Conclusion :

Dans l'entreprise, la fonction « maintenance » consiste de moins en moins souvent à remettre en état l'outil de travail mais de plus en plus fréquemment à anticiper ses dysfonctionnements. L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suit, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. Elles ne peuvent plus attendre que la panne se produise pour y remédier mais doivent désormais s'organiser pour procéder aux diverses opérations qui permettent de l'éviter. **[CAR et al, 01]**

Chapitre II

Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF)

II.1. Introduction :

La maintenance a été considérée longtemps comme un mal nécessaire. Dans beaucoup de domaines industriels, cette vision est toujours présente.

L'intérêt de la maintenance est traditionnellement basé sur le fait qu'une défaillance est mauvaise et qu'elle doit donc être prévenue à tout prix. Cette approche est utopique ; il est parfois techniquement impossible de pratiquer une technique préventive et souvent économiquement peu rentable en comparaison des bénéfices potentiels. Le problème est plutôt de trouver un minimum de maintenance sans porter préjudice à la performance de l'outil de production, à la qualité des produits fabriqués, à la sécurité des hommes et des équipements et à la protection de l'environnement (HOR93). [RIC et al, 96]

Par ailleurs, force est de constater que la maintenance est rarement abordée à la conception. Les performances en terme de Sûreté de fonctionnement (notamment la disponibilité avec comme facteurs-clés la fiabilité, la maintenabilité et la logistique de maintenance - norme ISO 9000-4) et de sécurité sont très rarement étudiées. Les fournisseurs de maintenance en réalisent quotidiennement leurs profits. [RIC et al, 96]

La complexité des marchés, des produits, des process, associée à la récession économique que vit le monde depuis plus de deux décennies a poussé les industriels à optimiser leurs moyens de fabrication, à augmenter les performances des produits (y compris leur qualité) tout en optimisant les coûts de revient. [RIC et al, 96]

La maintenance est une source de productivité. Cette affirmation nécessite, pour être vérifiée, d'une part que l'on doit prévoir et ajuster la maintenance en fonction des performances envisagées et des critères d'évaluation que se fixe l'entreprise ; d'autre part que ce travail doit être en permanence réajusté. En effet, un système technique se situe toujours dans un environnement en perpétuel changement. Il est par nature lui-même soumis à des évolutions de comportement (vieillesse). Pour atteindre cet objectif, il est donc indispensable de mettre en place des moyens organisationnels et techniques ainsi que des systèmes d'information ad hoc. C'est dans cette direction qu'évoluent les recommandations des référentiels d'assurance qualité actuels (ISO, EAQF, QS,...). [RIC et al, 96]

L'ambition de la **MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité)** est de guider la démarche industrielle dans cette voie. Arrêtons-nous quelques instants sur la sémantique de cet outil.

La maintenance est construite par rapport à des critères fixés par l'entreprise. [RIC et al, 96]

La **MBF** est un outil permettant d'optimiser les actions de maintenance programmées. Les critères pris en compte sont généralement la sécurité, la disponibilité (tenant compte d'un consensus fiabilité-maintenabilité) et le coût de maintenance. Lorsqu'il s'agit de produits fabriqués, la notion de qualité est, elle aussi, prise en compte. [RIC et al, 96]

La **MBF** a pour objectifs :

- De définir et de justifier en conception les actions de maintenance programmée à mettre en place.
- De redéfinir en exploitation les actions de maintenance programmée.
- D'assurer et d'augmenter les performances de l'outil de production en matière de sûreté de fonctionnement.
- De déterminer les recommandations relatives aux enjeux technico-économiques (investissements, rénovation, procédure, justification). [RIC et al, 96]

L'application de cet outil provoque des effets positifs indirects :

- Il permet une meilleure connaissance de son système sur le plan statique et dynamique (comportement dans le temps).
- Il permet de mieux appréhender l'environnement dans lequel le système évolue.
- Il responsabilise le personnel.
- Il assure une cohésion entre différentes entités de l'entreprise (production, maintenance, qualité, services économiques et direction) et amorce une nouvelle organisation dans un axe TPM.
- Il agit sur la sécurité des biens et des personnes.
- Il valide les modifications réalisées au fur et à mesure de la vie du produit ou du process. [RIC et al, 96]

La MBF s'inscrit dans le cadre d'un projet d'entreprise. Par conséquent, l'implication de la direction est primordiale. Les objectifs doivent être clairement identifiés et les enjeux correspondants évalués. [RIC et al, 96]

La MBF est un outil fédérateur. Tous les acteurs sont concernés :

- Le personnel de maintenance,
- La production,

- Le service après-vente pour les retours clients,
- La qualité,
- Les services économiques,
- La direction. [RIC et al, 96]

La MBF est «progressive ». En effet, cet outil possède plusieurs étapes et s'applique sous-ensemble par sous-ensemble suivant un découpage minutieusement élaboré. [RIC et al, 96]

La MBF est structuré. Elle ne contient aucune nouvelle méthode ; c'est plutôt un chemin structuré utilisant des méthodologies existantes (SAN91). [RIC et al, 96]

La MBF n'est pas un mythe pour les PME. Cet outil a pu paraître lourd à mettre en place sous l'angle organisationnel et financier. Cette image est principalement issue des diverses applications dans les secteurs aéronautiques, militaires et de l'énergie. Des applications dans les secteurs «moins riches » ont été réalisées (fonderie, transport, distribution d'eaux, hôpitaux) et ont démontré l'intérêt et le caractère générique de cet outil. [RIC et al, 96]

La MBF est pertinente. Toutes les défaillances relatives à un process ou un produit ne sont pas pénalisantes. En conséquence, une politique de prévention doit être minutieusement élaborée et justifiée. La profusion des tâches non justifiées amène l'entreprise à appliquer partiellement ses plans en créant une « vague » de tâches de maintenance non réalisées sans pour autant mesurer l'impact ou le risque associé. Dans certains cas, celle-ci atteint 50% des tâches (HAL92). [RIC et al, 96]

La MBF est dynamique, elle permet l'utilisation de l'expérience acquise durant toute la vie opérationnelle du produit ou du process et impose une évolution des prévisions (SAN91). [RIC et al, 96]

II.2. Origines de l'organisation MBF :

La RCM (*Reliability Centered Maintenance*) pour l'aéronautique :

La RCM a été introduite en aéronautique vers 1960 aux États-Unis pour déterminer les programmes de maintenance. La publication du document MSG (*Maintenance Steering Group*) a fixé les bases de la méthode de développement d'un programme de maintenance recevable à la fois pour les constructeurs d'avions, pour les autorités de l'aviation civile et pour les compagnies. Il faut souligner que la certification de navigabilité des appareils

commerciaux est conditionnée à la mise en œuvre de la maintenance MSG (programme MSG 3 pour l'Airbus A320 et le Boeing 757 et 767).

L'évolution des versions successives des MSG a traduit la régression de la maintenance planifiée, le développement des actions conditionnelles, puis l'optimisation économique dans le respect de l'objectif prioritaire qu'est la sécurité. [MON, 03]

L'OMF (optimisation de la maintenance par la fiabilité) pour le nucléaire français :

C'est en 1984 que la méthode de maintenance RCM a été transposée au nucléaire Américain, puis importée par EDF au nucléaire français sous le nom « projet OMF ».

L'OMF peut se définir comme une politique de maintenance ayant pour objet « de définir un programme de maintenance préventive afin de contribuer à maintenir, voire à améliorer la fiabilité des fonctions des systèmes qui sont importantes pour la sûreté et la disponibilité des tranches nucléaires » (d'après G. Zwingelstein, EDF). En 1991, EDF a pris la décision de généraliser l'application de l'OMF à toutes les tranches 900 MW, puis aux 1300 MW à partir de 1995. [MON, 03]

Les objectifs de L'OMF sont les suivants :

- Le maintien, voire l'amélioration de la sûreté nucléaire ;
- La maîtrise des coûts et l'optimisation économique de la maintenance, suivant le principe « exercer l'effort au bon endroit» ;
- La mise en œuvre d'une méthode structurée et rationnelle, par analyse de chaque mode de défaillance fonctionnelle ;
- L'utilisation du retour d'expérience pour réajuster les programmes de maintenance et leur pertinence. [MON, 03]

II.3. Définitions de la MBF :

Quelques définitions de la MBF, tirées de la littérature récente, donneront l'idée générale de la méthode :

- « La RCM est une stratégie de maintenance globale d'un système technologique utilisant une méthode d'analyse structurée permettant d'assurer la fiabilité inhérente à ce système » (J. Harris et B. Moss).

- « La MBF est une méthode destinée à établir un programme de maintenance préventive permettant d'améliorer progressivement le niveau de disponibilité des équipements critiques » (collectif).
- « La MBF est une méthode reposant essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes » (Ligeron). [MON, 03]

II.4. La MBF dans l'industrie manufacturière ou de process :

Dans le domaine industriel, ces méthodes ont donné naissance à la RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou MBF (Maintenance Basée sur la Fiabilité) dont la définition générale pourrait être « Stratégie de maintenance globale d'un système technologique utilisant une méthode d'analyse structurée permettant d'assurer la fiabilité inhérente à ce système » (HAR 94). [RIC et al, 96]

Dans le domaine des PME, cette définition doit être modifiée : la disponibilité des équipements est plus importante que leur fiabilité intrinsèque. On doit plutôt assurer la sûreté de fonctionnement à un coût raisonnable. On a affaire à des systèmes quasi uniques qui vont répondre à un éventail très large de besoins de production. La démarche doit être participative, agents de maintenance et opérateurs doivent collaborer pour apporter leur expertise complémentaire. On s'oriente alors vers une analyse non exhaustive mais essentielle ayant pour objectif un plan de maintenance optimisé. Le budget du service maintenance ne permettrait pas de réaliser toutes les actions techniquement souhaitables si une analyse exhaustive était faite. Il est beaucoup plus important pour le responsable du service d'avoir un outil d'aide à la décision qui lui permette de hiérarchiser et de décider quelles sont les actions qu'il vaut mieux réaliser dans le cadre du budget dont il dispose. [RIC et al, 96]

II.5. Les objectifs de la MBF :

La Maintenance Basée sur la Fiabilité apparaît au premier abord comme principalement destinée à élaborer un programme de maintenance préventive optimisé, ayant pour but la sûreté de fonctionnement et la sécurité des moyens de production, en tenant compte des aspects économiques. Cependant, elle a un but beaucoup plus ambitieux. En effet, le second aspect de l'application de la MBF dans les entreprises, principalement dans les PME, réside dans son utilisation comme vecteur principal d'amélioration de l'organisation de la maintenance, ceci malgré le manque de ressources générales observées. C'est la marche initiale nécessaire pour aller vers la certification de l'entreprise. Un troisième aspect lié à la

conservation des données de maintenance et de production (base de données pour le retour d'expérience) est également un objectif non négligeable de cette méthode. **[RIC et al, 96]**

Il est très important que le programme de maintenance préventive s'approche d'un niveau optimal afin de minimiser les risques de défaillance, tout en conservant une capacité de service maximale des moyens de production et en dégagant des facteurs de gains dans les entreprises. Cette optimisation doit donc s'appuyer sur une optimisation technique (obtention du Plan de Maintenance Technique (PMT)) suivi d'une évaluation économique tenant compte des contraintes organisationnelles et conduisant au Plan de Maintenance Optimisé (PMO) ; la mise en œuvre de cette étape pourra conduire très souvent à une diminution des coûts de maintenance à performance égale. **[RIC et al, 96]**

Un certain nombre d'apports de la démarche MBF peuvent être évoqués dès à présent, ils sont souvent difficiles à quantifier et sont évidemment fonction du type d'industrie et des moyens mis en œuvre pour mettre en place la MBF. La maintenance peut être vue sous les trois aspects organisationnels, techniques et humains, les bénéfices attendus se décomposent selon ces trois aspects. **[RIC et al, 96]**

Sur le plan technique, la MBF conduit à :

- La détermination des sites et équipements importants.
- L'identification des équipements à maintenir en priorité.
- La définition des fonctions et des défaillances associées aux équipements.
- L'identification des défaillances principales avec leurs modes et causes de défaillances.
- L'identification des causes de défaillances principales avec leurs effets et fréquence.
- La définition des modifications à réaliser au niveau du process.
- L'identification des tâches de maintenance préventives.
- La définition de la politique de maintenance.
- La définition du planning des actions préventives.
- Une meilleure utilisation des appareils de contrôle.
- La création d'une documentation plus homogène et plus compréhensible par tous.
- Une augmentation de la durée de vie des équipements. **[RIC et al, 96]**

La création d'un historique de maintenance pour chaque équipement critique et la mise en place d'un retour d'expérience pragmatique et efficace va permettre la validation du

programme de maintenance planifiée et donc une mise à jour périodique (méthode dynamique). On obtient également une bonne traçabilité des prises de décision. **[RIC et al, 96]**

Une meilleure connaissance et une optimisation des coûts globaux (directs et indirects) de maintenance peut servir de « déclencheur » pour une analyse économique quantitative de la maintenance (coûts/bénéfice) et la possibilité d'établir un véritable budget de maintenance à long terme. **[RIC et al, 96]**

L'application de la MBF sous-tend une organisation mettant en œuvre divers profils internes ; par conséquent, les résultats obtenus font l'objet d'un consensus et décrivent la cadre à respecter par l'ensemble des acteurs de l'entreprise. C'est une démarche de certification de l'activité maintenance. **[RIC et al, 96]**

II.6. Les trois principes de la MBF :

II.6.1. Le principe d'auto-limitation :

Le principe d'auto-limitation ou de sélection systématique des criticités s'applique à des niveaux successifs : les équipements, les sous – ensembles « fragiles », les défaillances, leurs causes puis les tâches de maintenance. D'où l'utilisation des matrices et de critères de sélectivité adaptés à l'entreprise et à l'équipement ou l'application de la méthode MERIDE. **[MON, 03]**

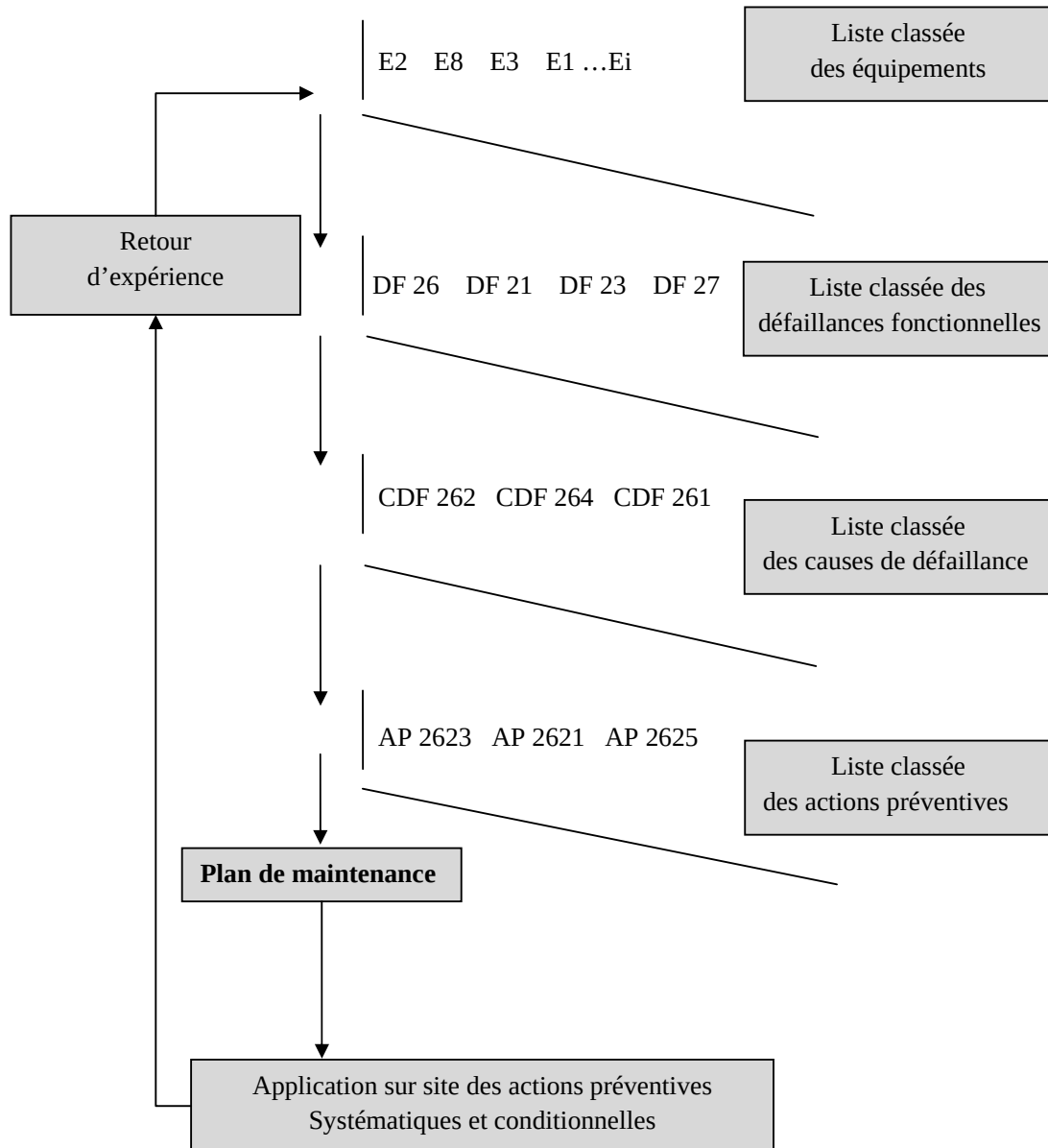


Figure II-1 Illustration du principe de sélectivité.

II.6.2. Le principe de subordination :

Principe de subordination des tâches de maintenance préventives à la connaissance « fiabiliste » des défaillances et de leurs causes. On ne peut bien anticiper que ce que l'on a appris à bien connaître, ce que Ligeron a exprimé sous la forme : « la MBF est une méthode reposant essentiellement sur la connaissance précise du comportement fonctionnel et dysfonctionnel des systèmes ». D'où l'utilisation des expertises de défaillances et de retours

d'expérience en nombre suffisant pour être significatif. Ce principe de subordination justifie le nom choisi : la maintenance basée sur la fiabilité. [MON, 03]

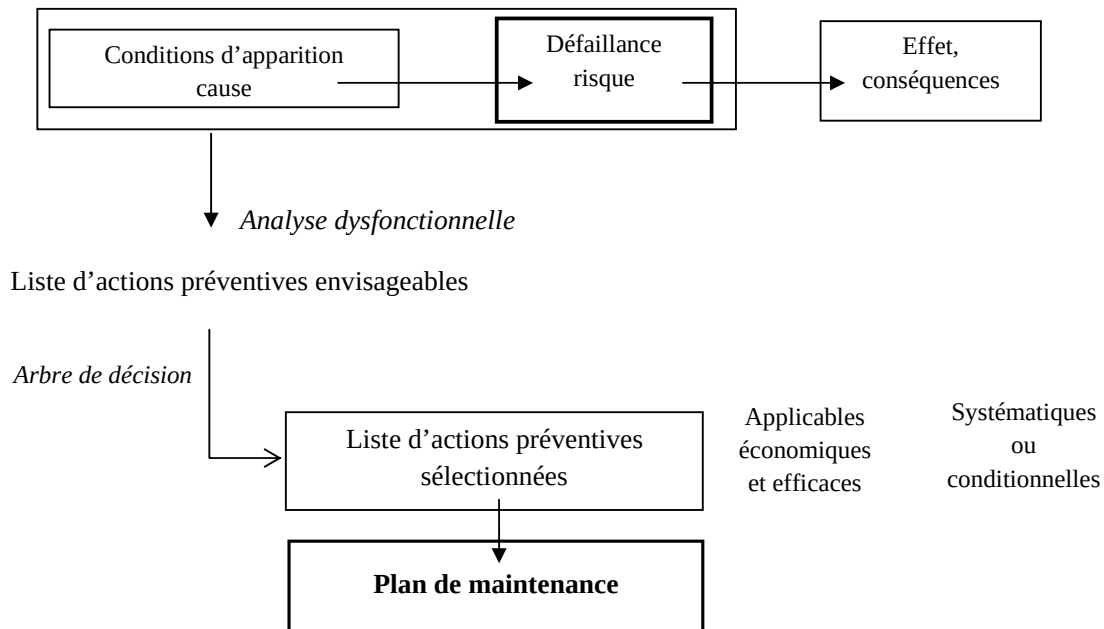


Figure II-2 Illustration du principe de subordination.

II.6.3. Le principe de participation des acteurs concernés :

La méthode repose sur la constitution de groupes MBF mixtes impliquant aussi bien les agents de maintenance que ceux de production et de la qualité. L'adhésion de tous est nécessaire à la démarche qui est donc de type participative. En particulier, les estimations des « criticités relatives » sur lesquelles repose la hiérarchisation des problèmes impliquent les regards et les expériences croisées des acteurs. De même la sélection des seules actions « efficaces et applicables » implique le regard des exploitants qui mettront en œuvre ces actions. [MON, 03]

La mise en place de ces groupes est volontairement limitée dans le temps, une fois les actions préventives définies et validées. Par contre, le « retour d'expérience » nécessaire à l'optimisation progressive du plan de maintenance sera utilisé par une structure permanente, le bureau des méthodes de maintenance. [MON, 03]

Un problème apparaît pour certaines PME voulant aborder une démarche MBF : le manque de ressources internes disponibles pour assurer la modernisation de la fonction maintenance. Une

aide extérieure temporaire est alors indispensable au démarrage de l'organisation MBF (formation d'un groupe MBF « pilote »). [MON, 03]

II.7. Les outils de la MBF :

Cette approche MBF utilise différents outils issus des méthodes déjà bien connues tels que la matrice de criticité, les grilles d'Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) et le logigramme de décision :

- La matrice de criticité permet d'apprécier l'impact des défaillances des équipements sur des critères tels que la sécurité, la disponibilité et la qualité,
- La grille AMDEC définit l'importance relative des défaillances, de leurs causes et de leurs effets,
- Le logigramme de décision sert, en fonction du type de défaillance, à identifier le type de conséquence sur les équipements et à définir le niveau des actions de maintenance à mettre en œuvre. [RIC et al, 96]

L'application de la MBF nécessite une bonne connaissance des équipements ainsi que de leurs défaillances, de même que l'impact de ces défaillances. C'est pourquoi l'implication de l'ensemble des opérateurs, techniciens et experts de l'entreprise est indispensable pour obtenir les résultats souhaités et souhaitables tant au niveau de la sûreté de fonctionnement, de la sécurité que des coûts globaux. [RIC et al, 96]

II.8. Les cinq étapes de la démarche MBF :

- **Diagramme des cinq étapes :**

Les étapes 0, 1, 2 et 3 forment la démarche initiale de la MBF, alors que les étapes 1, 2, 3 et 4 représentent une itération permanente s'inscrivant dans une recherche d'optimisation et d'amélioration permanente (**Figure II-3**). [MON, 03]

- **Étape 0 : formation d'un groupe « pilote » :**

Elle concerne :

- L'engagement de la Direction, la déclaration de ses objectifs prioritaires et la sensibilisation de toute l'entreprise au projet ;
- La formation d'un groupe « pilote » MBF avec un chef de projet et des responsables production, maintenance et qualité. C'est la « cheville ouvrière » du projet ;
- La formation des groupes « équipement » non permanents, avec le choix des acteurs

impliqués parmi ceux qui connaissent le mieux l'équipement. Ce groupe recueille les informations de terrain et analyse les défaillances à prévenir en une semaine environ.

[MON, 03]

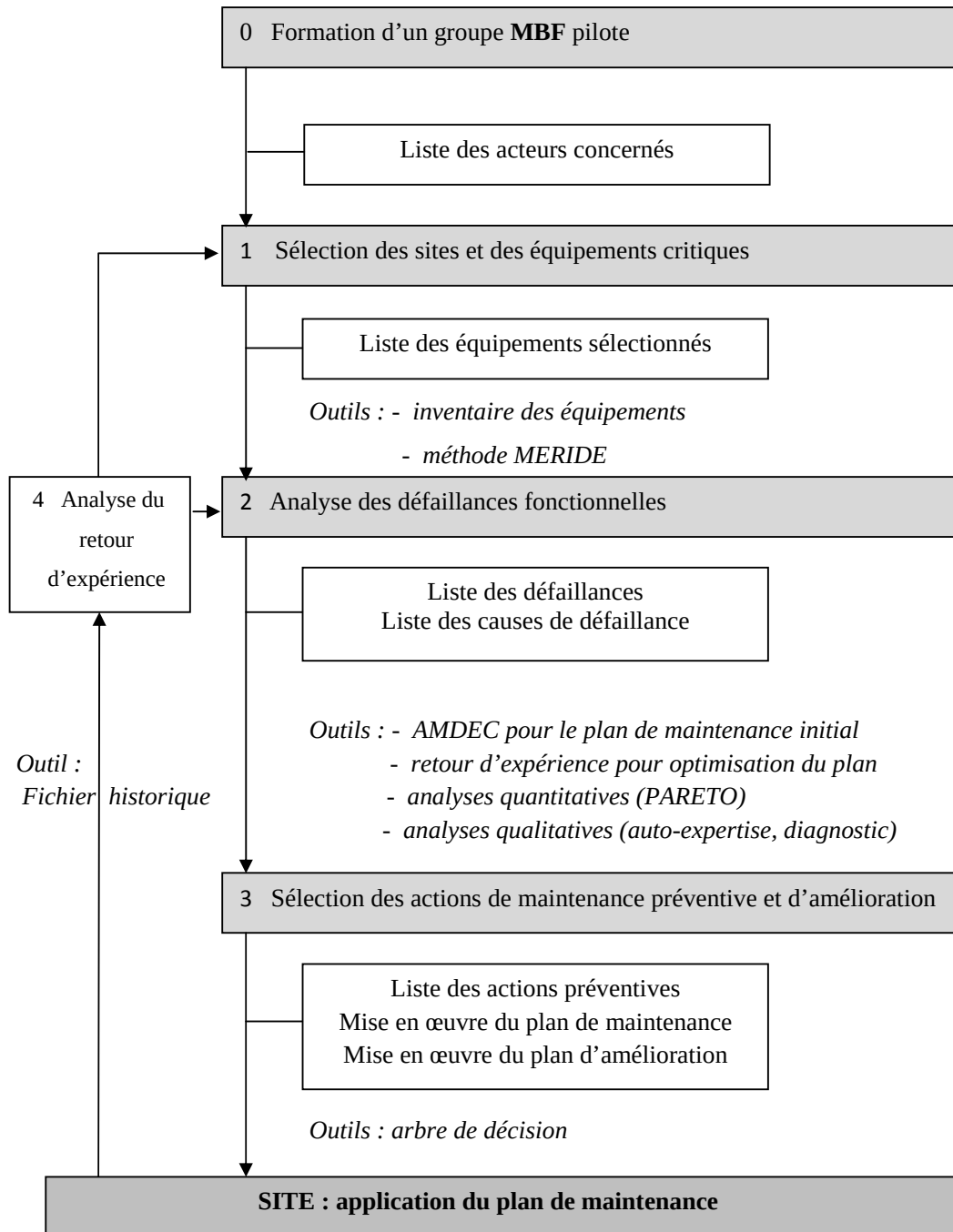


Figure II-3 Les cinq étapes de la MBF et les outils à mettre en œuvre.

- **Étape 1 : sélection des équipements critiques :**

Si ce n'est pas déjà fait, le groupe pilote MBF devra d'abord effectuer un découpage géographique de l'entreprise en sites, ateliers ou lignes de production, puis un découpage fonctionnel en équipements, groupe fonctionnels et sous-ensembles (les modules). Cela dans le but d'identifier les impacts d'une défaillance –équipement sur la sécurité, sur le flux de production et sur la qualité. [MON, 03]

- **Étape 2 : analyse des défaillances fonctionnelles :**

Le groupe équipement commence par effectuer deux analyses fonctionnelles :

- Une *analyse fonctionnelle externe*, chaque équipement étant une « boîte noire » qui permet d'identifier les fonctions externes ainsi que les interfaces avec son environnement. La méthode des « interacteurs » (norme x50-153) paraît bien adaptée à cet inventaire de fonctions externes.
- Une *analyse fonctionnelle interne* associant à chaque fonction identifiée les modes de défaillance qui sont susceptibles de causer la perte ou la dégradation de la fonction. Le mode de défaillance s'exprime par la manière dont un module ne peut plus remplir sa fonction.

L'outil de base pour la réalisation par le groupe « MBF équipement » de ces analyses est l'AMDEC classique. La **Figure II-4** propose un exemple de feuille d'analyse simplifiée.

[MON, 03]

Projet MBF Feuille d'AMDEC	Site :	Équipement :	Fonction :
	Date :	Sous-ensemble	Feuille n° :

Éléments	Modes de défaillance	Causes de défaillance	Effet sur le « client »	Criticité			Ic
				Gravité	Fréquence	Non détecté	
xxx			● → G				G . F . nD
	●	●			→ F		
	●					→ nD	

Figure II-4 Exemple de feuille d'AMDEC simplifiée de sélection des défaillances.

La sélection des défaillances à prévenir se fait à partir de l'indice de criticité I_c fonction des critères retenus, l'indice de gravité G étant souvent choisi prédominant.

En effet l'indice G se détermine à partir de l'« effet sur le client » par l'impact prévisible de la défaillance envisagée :

- sur la sécurité S (estimation du risque corporel) ;
- sur la fiabilité ou la disponibilité D (estimation des durées d'arrêt de fonctionnement) ;
- sur la maintenabilité M (estimation de la MTTR) ;
- sur la qualité Q (estimation du taux de défaut). [MON, 03]

- **Étape3 : sélection des actions préventives :**

- ❖ **Utilisation de logigramme de décision :**

Il reste à associer à chaque défaillance sélectionnée une ou plusieurs actions préventives, voire d'amélioration lorsque l'action sur la cause élimine la probabilité de défaillance (**Figure II-2**).

Pour aider à cette recherche, l'utilisation d'un « logigramme de décision » permet de systématiser la recherche de la simplicité (économique et facile) alliée à l'efficacité. [MON, 03]

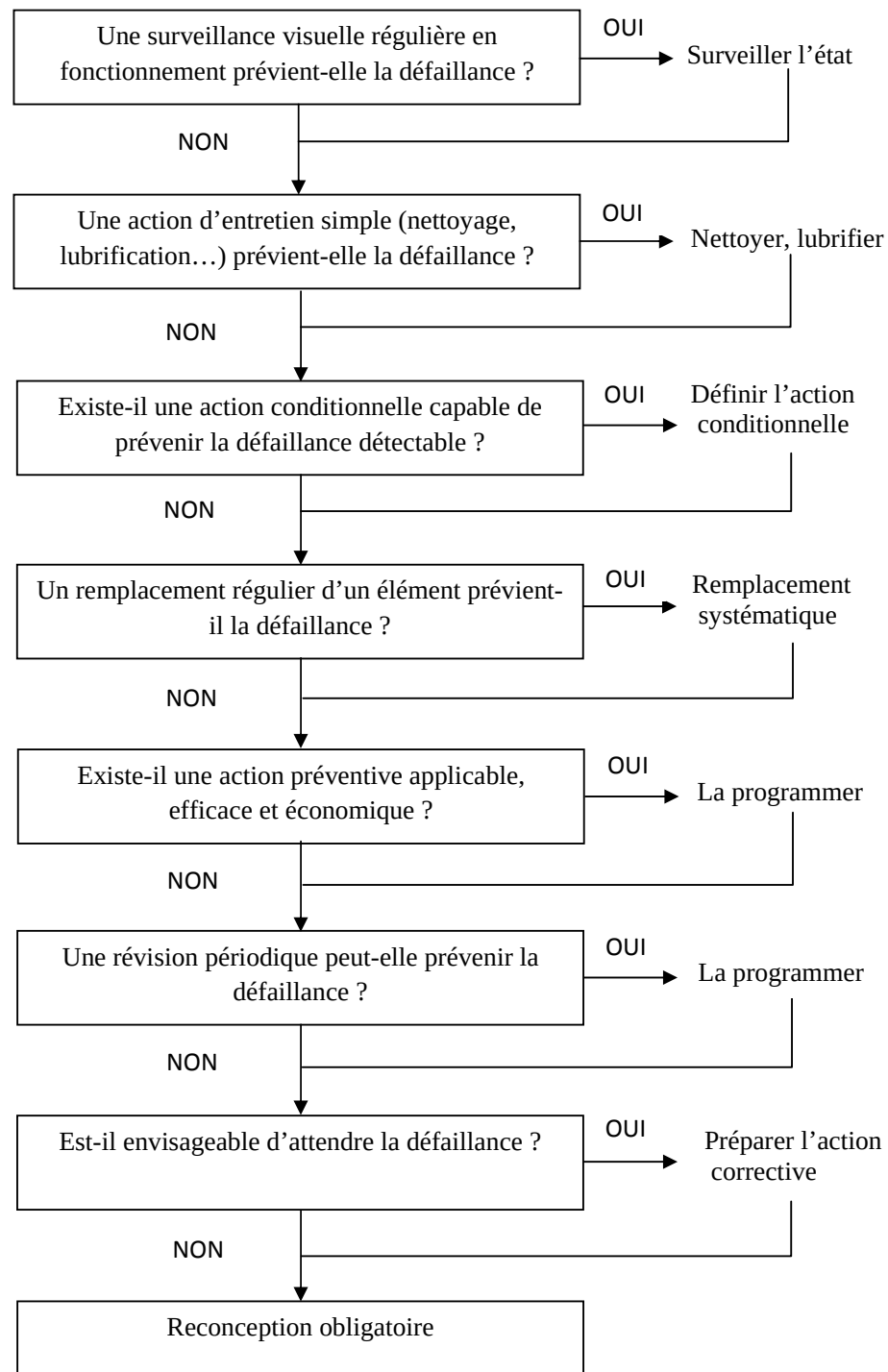


Figure II-5 Logigramme de choix d'actions.

- **Étape4 : analyse du retour d'expérience :**

Le retour d'expérience se fera par les méthodes d'analyses de défaillances quantitatives, qualitatives et fiabilistes habituelles, sous réserve que leur nombre N soit significatif. [MON, 03]

II.9. Effets induits par la démarche MBF :

Les expériences industrielles de MBF (projet européen CRAFT, portant sur 15 PME en fonderie) mettent en évidence les aspects suivants.

- La méthode MBF étant par nature « auto-limitative », le volume initial de préventif est réduit à l'essentiel, ce qui donne des effets rapides quant aux performances et rassure les acteurs.
- Les actions préventives à poste menées par les opérateurs permettent un gain important et rapide de disponibilité opérationnelle.
- Les actions de nettoyage de poste ont en particulier un effet positif.
- La diminution de la « charge corrective », corollaire naturel d'un préventif efficace, permet de dégager des ressources de maintenance vers des actions continues d'amélioration, vers des actions « en amont » et vers plus d'efficacité au niveau des « méthodes de maintenance ».
- La démarche MBF étant participative, l'implication des acteurs dans un travail d'équipe a un effet mobilisateur qui va bien au-delà des résultats économiques chiffrables.
- Le découplage « qualité/production/maintenance » est assuré par la formation des groupes MBF mixtes. Cette habitude de travailler ensemble en convergence vers un objectif partagé (la satisfaction du client par-delà l'amélioration de la disponibilité et de la qualité) est un des enjeux majeurs des entreprises. [MON, 03]

L'amélioration du niveau de fiabilité doit se faire par une économie progressive de moyens, tel est l'objectif initial de la MBF : *améliorer les performances, mais en n'agissant que là où c'est efficace.....* [MON, 03]

II.10. Conclusion :

Dans l'industrie, les programmes standards qui sont fournis par les constructeurs des différents matériels sont souvent trop techniques ou théoriques et donc très éloignés de l'optimum. Il faut favoriser le développement de programmes qui tiennent plus compte de l'expérience du terrain et des considérations économiques propres à chaque entreprise. **[RIC et al, 96]**

La modification des équipements dans le temps, le vieillissement des installations et matériels, induisent un besoin complémentaire de définition des plans de maintenance rendant caduques les préconisations des constructeurs. **[RIC et al, 96]**

Le but de chacun est l'obtention d'un outil de production sûr de fonctionnement à un coût raisonnable. La MBF entre tout naturellement dans la partie « logistique de maintenance » de la notion de sûreté de fonctionnement (CEI95). C'est pourquoi la MBF s'appuie sur une méthodologie d'élaboration d'un programme de maintenance préventive pour les équipements (en exploitation) au moyen d'une approche logique, structurée, pragmatique, économique et sûre. **[RIC et al, 96]**

La mise en place d'un plan de maintenance optimisé dans l'entreprise qui s'appuie sur la démarche MBF provoque souvent une diminution du nombre de tâches de maintenance préventive qui sont supprimées ou remplacées par de la maintenance corrective ; la maintenance conditionnelle augmente ; le besoin en pièces détachées diminue et le remplacement est mieux justifié. Une remise en cause de certaines solutions de conception peut aussi être recommandée (SAN91). La MBF est un outil de justification en conception et en exploitation. **[RIC et al, 96]**

Chapitre III

L'ordonnancement dans les ateliers de production

III.1. Introduction:

L'ordonnancement occupe une place particulière dans la gestion informatisée des flux de production au sein de l'entreprise. C'est généralement le point de rencontre entre un système hiérarchisé et informatisé de production et le système de production lui-même. C'est le lieu de l'interface entre l'élaboration globale de la commande et la partie opérationnelle. La gestion de production crée les ordres de fabrication qui déterminent globalement ce qui doit être fait dans une période donnée (généralement la semaine). L'ordonnancement consiste à prévoir l'enchaînement de toutes les opérations élémentaires nécessaires à la réalisation de ces ordres de fabrication sur les ressources de production, tout en tenant compte des ressources secondaires (telles que les opérateurs, les outillages, etc.), des contraintes extérieures (maintenance préventive, calendrier de travail, etc.) et de l'existant (reste de la semaine précédente, tâches en cours de réalisation, etc.). [HAR, 03]

Nous pouvons distinguer deux catégories de problèmes d'ordonnancement. En fonction du degré de connaissance que l'on a du problème à résoudre, on parlera de :

- **Problème statique** : lorsque les tâches à ordonner sur une période ainsi que l'état initial de l'atelier sont connus au début de la période ;
- **Problème dynamique** : lorsque les décisions sont à prendre sur la période mais toutes les tâches à réaliser sur cette période ne sont pas connues au début de la période. [HAR, 03]

Le résultat de l'ordonnancement est un calendrier précis des tâches à réaliser. Il se décompose en trois grandeurs fondamentales :

- **L'affectation** : consistant à choisir, s'il y a lieu, les ressources nécessaires à une tâche ;
- **Le séquençement** : qui donne l'ordre de passage des tâches sur chaque ressource ;
- **Le datage** : qui donne pour chaque tâche une date de début et une date de fin. [HAR, 03]

De plus, un ordonnancement se décompose en deux parties toujours présentes dans l'atelier, mais pouvant revêtir une importance variable :

- **L'ordonnancement prédictif** : consiste à prévoir " à priori " un certain nombre de décisions en fonction de données prévisionnelles et d'un modèle de l'atelier ;

- **L'ordonnancement réactif** : consiste à adapter les décisions prévues en fonction de l'état courant du système et des déviations entre la réalité et le modèle (ce qui est prévu en théorie). [HAR, 03]

III.2. Définition de l'ordonnancement :

L'ordonnancement consiste à organiser dans le temps la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches. Un ordonnancement décrit l'ordre d'exécution des tâches et l'allocation des ressources au cours du temps, afin de satisfaire un ou plusieurs critères d'optimisation. [HAR, 03]

III.3. Les éléments d'un problème d'ordonnancement :

D'après la définition de l'ordonnancement cités ci-dessus, nous en déduisons qu'un ordonnancement est constitué principalement de quatre éléments suivants : les *tâches*, les *ressources*, les *contraintes* et les *objectifs* ou les *critères* d'optimisation. [HAR, 03]

III.3.1. Les tâches :

Ce sont toutes les opérations élémentaires de travail à effectuer pour la fabrication d'un produit (tel que le perçage d'un trou). Une tâche i est généralement caractérisée par une *date de début* s_i et /ou par une *date de fin* c_i (completion time) et une durée d'exécution p_i . Une tâche peut également être définie par une date limite $\bar{d}$ appelée aussi date absolue au delà de laquelle il n'est plus possible de l'exécuter. Certaines contraintes techniques ou économiques peuvent associer aux tâches des dates de début au plus tôt r_i (ready time) ou des dates de fin au plus tard d_i (due date). Une tâche peut se réaliser par morceaux, il s'agit alors de tâche préemptive, ou sans interruption, on parle alors de tâche non-préemptive. Certaines tâches présentent une *priorité* d'exécution pour les clients, avant de commencer à chercher un ordonnancement, on leur attribue des poids w_i proportionnels à leurs degrés de priorité. [HAR, 03]

III.3.2. Les ressources :

L'exécution des différentes tâches nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens techniques et d'opérateurs humains. Cet ensemble représente donc les ressources indispensables à la réalisation des tâches durant des intervalles de disponibilité. La capacité d'une ressource est en réalité limitée.

Il existe plusieurs types de ressources, si après son utilisation la ressource est à nouveau disponible avec la même capacité, on parle de ressource *renouvelable* (tels que les hommes et les machines). Par contre, si après son utilisation la ressource est disponible avec une capacité inférieure ou nulle, on parle de ressource *consommable* (l'argent est un bon exemple de ressource consommable). Certaines ressources sont capables de réaliser plusieurs tâches en parallèle, elles sont dites *cumulatives* (une station de travail composée de plusieurs machines est un ressource cumulative). Cette dernière caractéristique est considérée généralement comme étant une hypothèse forte. Les ressources sont souvent supposées *disjonctives* et ne permettent de réaliser qu'une seule opération à la fois (un ouvrier s'occupant de plusieurs machines est une ressource disjonctive). [HAR, 03]

III.3.3. Les contraintes :

Les contraintes expriment des restrictions sur les valeurs que peuvent avoir les variables de décision. Leur prise en compte permet d'avoir un ordonnancement réalisable. Il existe deux classifications possibles des contraintes. La première est classique, elle comporte les contraintes temporelles et celles liées aux ressources. La deuxième présentée par Kacem [KAC, 03] distingue les contraintes endogènes qui sont liées directement au système de production et à ses performances, des contraintes exogènes indépendantes du système. [HAR, 03]

- **Les contraintes temporelles :** souvent, certaines opérations ne peuvent s'exécuter qu'après une date de début au plus tôt, c'est-à-dire en satisfaisant l'expression suivante : $c_i - p_i \geq r_i$ et ne finissent qu'avant une date de fin au plus tard ce qui revient à vérifier la formule suivante : $r_i + p_i \leq r_i$. Ceci reflète la non disponibilité continue des ressources (pour les dates au plus tôt), et la nécessité de délivrer les produits en respectant les délais (pour les dates au plus tard). Ce type de contraintes peut aussi définir des relations de précedence entre les opérations. Ce sont surtout des contraintes technologiques qui

imposent un ordre d'exécution aux opérations (ex: perçage d'un trou, puis insertion d'une vis). La relation de précédence entre deux tâches i et j (c.à.d. i précède j), peut s'écrire sous la forme suivante : $s_i + p_i \leq s_j$; [HAR, 03]

- **Les contraintes liées aux ressources :** les caractéristiques des ressources peuvent induire des contraintes indiquant les conditions de passage des tâches. Dans le cas d'une ressource consommable, seules les tâches ayant une consommation inférieure ou égale à la capacité de la ressource à l'instant t peuvent être exécutées. Par contre, pour une ressource renouvelable, ce type de contraintes permet de limiter sa capacité. Cette limitation apparaît surtout dans le cas des ressources cumulatives où l'on ne peut exécuter qu'un certain nombre de tâches en parallèle (exécuter simultanément plusieurs opérations sur la même ressource rend l'ordonnancement inadmissible. Il est par exemple impossible d'effectuer simultanément trois opérations de perçage si l'on ne dispose que de deux foreuses). Certaines ressources permettent d'interrompre l'exécution d'une tâche pour s'occuper d'une autre, on parle alors de contraintes de préemption (les machines multi-processeurs réalisent ce type de contraintes). Les contraintes d'indisponibilité pendant des périodes bien définies sont rarement prises en compte. En réalité, ce type de contraintes est fréquemment rencontré surtout pour planifier des périodes de maintenance systématiques. [HAR, 03]

III.3.4. Les objectifs :

Lorsque l'on aborde un problème d'ordonnancement, il est crucial de définir un certain nombre d'objectifs à atteindre. Il s'agit ici d'optimiser (maximiser ou minimiser) une fonction d'évaluation en respectant un certain nombre de contraintes. Le credo des ateliers reste le triptyque coût/qualité/délais. Toute évaluation d'un ordonnancement n'aura donc de sens aux yeux de la production que dans la mesure où elle porte sur ces trois facettes.

Le délai est l'élément du triptyque qui se décline le mieux sur l'axe des critères classiques de l'ordonnancement. Il évalue en termes de temps les performances d'un système, par exemple : le temps de cycle F_i , le retard algébrique d'une opération L_i qui seront définis ultérieurement. L'objectif du respect des délais, consiste souvent à définir un ordre de fabrication durant une période donnée. Notons que l'objectif "délais" se traduit plus volontiers par des contraintes que

par un critère à minimiser. En effet, le but d'un responsable d'atelier est de respecter la période de temps qui lui est affectée pour effectuer un ensemble de produits. Dans la majeure partie des cas, l'ajustement de la capacité à la charge se fait par les opérateurs (ressource humaine plus flexible) alors que les moyens de production sont eux-mêmes sur-capacitifs.

Il est rare d'associer la qualité des produits à l'évaluation d'un ordonnancement. Notons toutefois que les responsables de production associent souvent la qualité au volume d'encours : la fluidité du flux est souvent assimilée à un facteur de qualité. Dans cette hypothèse, il est clair que l'axe qualité peut se traduire par la minimisation de l'encours. Malheureusement, l'encours n'est pas un critère utilisé en ordonnancement théorique. Or ce type de critère est régulier. Cela signifie qu'il peut s'améliorer si on accepte de retarder le début d'une opération.

Le coût est aussi assez rarement pris en compte. Si l'on excepte le coût de réglage, le coût "machine" est souvent invariant. La différence de coût entre deux ordonnancements relève plus souvent de l'utilisation de la main d'œuvre. En effet, de multiples petits arrêts des machines immobilisent du personnel improductif. [HAR, 03]

III.4. Les objectifs de l'ordonnancement :

Le traitement de l'ordonnancement dans la littérature s'est tout d'abord orienté vers une optimisation monocritère. L'environnement manufacturier évoluant rapidement et la concurrence devenant de plus en plus acharnée, les objectifs des entreprises se sont diversifiés et le processus d'ordonnancement est devenu de plus en plus multicritère. Les critères que doit satisfaire un ordonnancement sont variés. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement [ESQ et LOP, 99] :

- Les objectifs liés au temps : on trouve par exemple la minimisation du temps total d'exécution, du temps moyen d'achèvement, des durées totales de réglage ou des retards par rapport aux dates de livraison,
- Les objectifs liés aux ressources : maximiser la charge d'une ressource ou minimiser le nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâches sont des objectifs de ce type,

- Les objectifs liés au coût : ces objectifs sont généralement de minimiser les coûts de lancement, de production, de stockage, de transport, etc,
- Les objectifs liés à une énergie ou un débit.

Les objectifs à satisfaire au niveau de l'ordonnancement sont issus des objectifs globaux de l'entreprises, par décomposition. Cette décomposition conduit à une structure d'objectifs qui permet de gérer les contradictions et les compromis [FAR, 90] [GRA, 98]. Un exemple de structure d'objectifs est présenté Figure III.1.

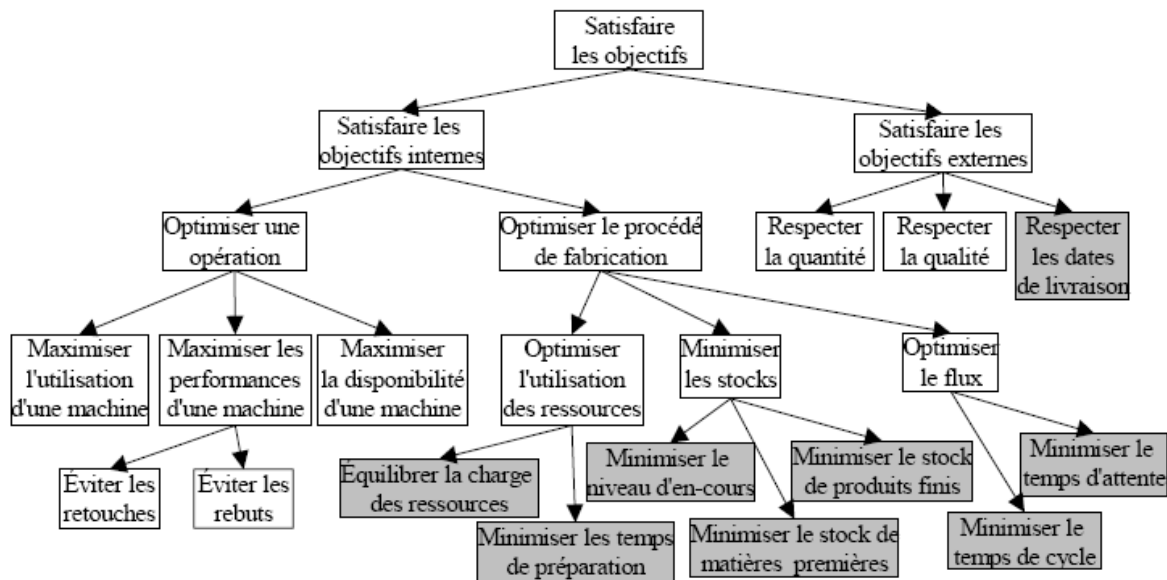


Figure III-1 Structure d'objectifs [GRA, 98]

Dans cet exemple de décomposition, les objectifs de haut niveau (stratégiques) sont séparés en objectifs externes, qui quantifient la relation entre l'entreprise et son environnement, et internes, qui évaluent les performances des ressources du système. On ne conserve ici que les objectifs concernant la fonction ordonnancement (grisés sur la Figure III.1). [LET, 01]

Chaque entreprise a ses propres critères, dépendants de sa politique, de son passé, de ses problèmes particuliers... Même si on y retrouve certains points communs, ces objectifs sont trop dépendants de la compagnie, de l'environnement manufacturier ou tout simplement de la

personnalité et des habitudes du responsable de la production pour pouvoir être définitivement fixés dans les méthodes de résolution de problèmes d'ordonnancement. [LET, 01]

III.5. Le problème d'ordonnancement :

III.5.1. Définition :

Résoudre un problème d'ordonnancement consiste à trouver une planification des tâches sur les ressources en optimisant les objectifs et en respectant les contraintes. La modélisation du problème dépend fortement des différents paramètres (contraintes, objectifs...). Les problèmes d'ordonnancement sont différenciés suivant le nombre de machines (problèmes à machine unique ou multi-machines) et, si l'on a plusieurs machines, suivant l'ordre de réalisation des tâches [GOT, 93] [ESQ et LOP, 99] :

- l'ordre des opérations est fixé et commun à tous les travaux : on est dans le cas d'un «flow shop » ; l'ordonnancement concerne essentiellement l'ordre de lancement des différents OF,
- l'ordre des opérations est fixé mais propre à chaque travail : on est dans le cas d'un « job shop » ; ce problème d'ordonnancement est en général qualifié de n/m/job shop (exécution de n « jobs » sur m machines),
- l'ordre des opérations est indéterminé : on est dans le cas d'un « open shop ».

III.5.2.Représentation de la solution :

La représentation la plus courante pour un ordonnancement est le **diagramme de Gantt**. Celui-ci représente une tâche par un segment ou une barre horizontale dont la longueur est proportionnelle à la durée de l'opération. On trouve en général deux types de diagrammes de Gantt : par ordre de fabrication (Figure III.2.a) ou par ressource (Figure III.2.b). [LET, 01]

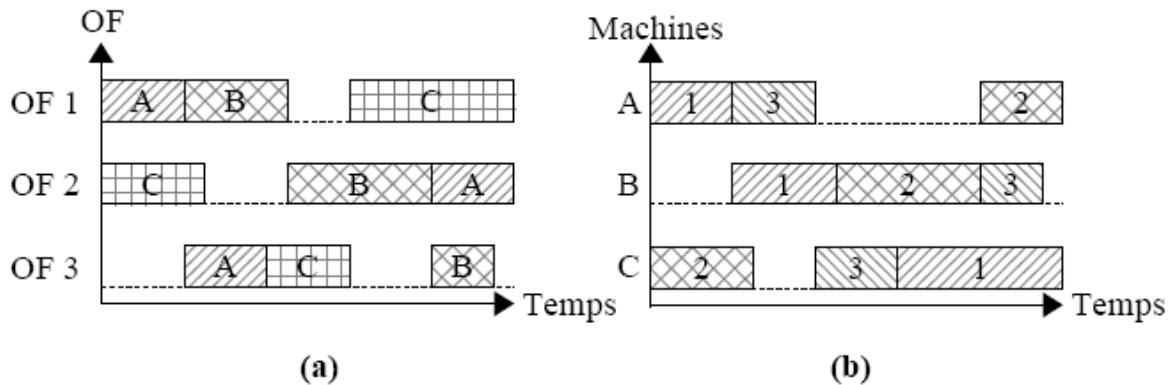


Figure III-2 Exemples de diagrammes de Gantt (a) par OF et (b) par ressource

III.6. Les différentes approches de résolution:

On peut distinguer deux grandes familles parmi les approches de résolution d'ordonnancement :

- Les approches résolvant le problème en une seule passe, que l'on qualifiera d'approches «directes »,
- Les approches, qualifiées « d'itératives », permettant de produire une solution puis de l'améliorer par itérations successives. [LET, 01]

III.6.1. Approches directes :

Ce paragraphe présente quelques méthodes de résolution d'ordonnancement parmi les plus courantes et les plus connues. Comme pour toute activité de décision, on distingue en ordonnancement deux approches fondamentales pour la résolution de problème :

- une approche dite « optimale » consistant à rechercher une décision optimale par rapport à un critère donné, à partir d'hypothèses fortement réductrices qui seules permettent d'établir et de prouver cette optimalité,
- une approche orientée « rationalité limitée » ne cherchant pas à atteindre l'optimalité de la solution et préconise de poser un ensemble d'hypothèses moins réductrices qui vont favoriser la recherche d'une décision satisfaisante [SIM, 77].

III.6.1.1. Méthodes de résolution optimales:

Ces méthodes considèrent le problème d'ordonnancement comme un problème d'optimisation où l'on cherche à satisfaire une fonction objectif, généralement unique. Elles sont décrites dans de nombreux ouvrages traitant des problèmes d'ordonnancement, comme par exemple [GOT, 93] ou [ESQ et LOP, 99]. Les méthodes optimales permettent d'avoir des solutions optimisant un seul et unique critère, sous des conditions bien particulières. Ces conditions sont rarement satisfaites dans les problèmes industriels. [LET, 01]

III.6.1.2. Méthodes de résolution non optimales:

Placement des ordres de fabrication:

Dans un premier temps, les OF sont classés suivant un critère quelconque (priorité, date de livraison, date de commande...). Une fois cette liste établie, toutes les opérations du premier OF de la liste sont planifiées sur les ressources quand celles-ci sont libres, puis toutes les opérations du deuxième OF... Une fois planifiées, ces tâches ne sont plus remises en cause. Les opérations d'un OF peuvent être placées sur les ressources de deux manières : au plus tôt (les tâches sont planifiées de la première à la dernière dès que possible) ou au plus tard (les tâches sont planifiées en partant de la dernière à la date de livraison et en remontant jusqu'à la première). Des techniques « mixtes » sont aussi possibles. C'est une méthode simple, rapide et facile à comprendre. Peu consommatrice en temps de calcul, elle a été utilisée par les premiers logiciels d'ordonnancement. Néanmoins, ne permettant aucune optimisation, même partielle ou locale, elle n'est quasiment plus utilisée dans les logiciels d'ordonnancement. [LET, 01]

Files d'attente:

Le principe est de simuler le fonctionnement de l'atelier. Les opérations sont placées sur les ressources par ordre chronologique. Si, lorsqu'une opération arrive sur une machine, celle-ci n'est pas disponible, la tâche est placée dans une file d'attente. Lorsque la ressource se libère, si la file d'attente comprend plusieurs opérations, on utilise une règle de priorité pour résoudre le conflit. Une règle de priorité est une formule qui associe une valeur à chaque opération d'une file d'attente, calculée en général sur les paramètres de l'opération [BOU, 91]. L'opération de la file qui sera placée sur la machine est celle dont la valeur est la plus faible ou la plus forte. De très nombreuses règles de priorité existent, utilisant des critères variés (voir par exemple [PAN et

ISK, 77], [MON et VAN, 90] ou [HOL et RAJ, 00] pour un recensement plus ou moins exhaustif des règles de priorité). Un grand nombre d'études ont été faites pour essayer de déterminer les effets de ces règles sur l'ordonnancement et leurs performances globales par rapport à quelques critères. Il ressort essentiellement de toutes ces analyses qu'aucune règle ne surpasse les autres sur tous les objets et dans toutes les configurations d'ateliers [MON et VAN, 90] [PIE et MEB, 97] [FER et al, 00]. Les effets d'une règle de priorité sur l'ordonnancement sont difficile à prévoir car fortement dépendants de l'atelier.

L'approche par files d'attente est très répandue dans les logiciels d'ordonnancement. Cela est principalement dû au fait que c'est la méthode la plus proche du raisonnement humain face à la résolution d'un problème d'ordonnancement. Elle est très attractive pour les utilisateurs de logiciels d'ordonnancement car ils en comprennent bien le fonctionnement. [LET, 01]

Théorie des graphes:

Le principe de cette technique d'ordonnancement repose sur l'utilisation d'un graphe dont les sommets représentent les tâches et dont les arcs modélisent les contraintes entre opérations. Au départ, seules les contraintes liées aux gammes sont représentées. A chaque étape, l'ensemble des opérations est séparé entre les tâches déjà ordonnancées, celles qui peuvent l'être et celles ni ordonnancées ni ordonnançables. On choisit une opération parmi celles ordonnançables ainsi que la ressource sur laquelle elle est affectée. A chaque conflit rencontré, on utilise une règle de résolution pré-définie. Chaque résolution de conflit entraîne l'apparition de nouvelles contraintes sur le graphe. [LET, 01]

Approches par satisfaction de contraintes:

Le principe général de ces approches consiste à réduire l'espace dans lequel on recherche la solution en exploitant les contraintes que doit satisfaire cette solution, et à rechercher cette solution dans l'ensemble restreint de solutions admissibles obtenu. Parmi les travaux sur l'utilisation de la satisfaction de contraintes en ordonnancement, on trouve par exemple ceux présentés dans [ERS, 76], ou plus récemment ceux relatés dans [SCH et DEC, 97], sur la propagation de contraintes temporelles. [LOP et al, 92] proposent des méthodes d'ordonnancement qui combinent les contraintes d'utilisation des ressources et les contraintes temporelles. Des systèmes d'ordonnancement tels que ISIS [FOX, 83], l'un des premiers

ordonnancements dits « intelligents », combinent l'utilisation de propagation de contraintes à celle de systèmes experts afin de minimiser le retard des OF. L'optimisation de l'utilisation des ressources a été ajoutée dans le système suivant OPIS [OW et SMI, 88]. On peut aussi trouver des systèmes faisant intervenir la logique floue afin de relâcher progressivement certaines contraintes [DUB et PRA, 89] [FAR, 94].

Les différentes techniques d'analyse sous contraintes en ordonnancement permettent d'introduire des degrés de liberté dans la résolution du problème d'ordonnancement, en distinguant les contraintes dites « relâchables » (les préférences) des contraintes strictes. [LET, 01]

Méthodes issues de l'intelligence artificielle:

L'intelligence artificielle a fourni de nouvelles approches et tendances en ordonnancement depuis deux décennies, notamment par l'utilisation de réseaux de neurones (voir par exemple [SAB, 98] sur l'utilisation des réseaux de neurones en ordonnancement) ou de systèmes experts (voir par exemple [SMI, 92] pour un état de l'art des systèmes experts en ordonnancement).

L'utilisation de la logique floue dans l'ordonnancement n'a pas pour but de proposer une nouvelle méthode, mais d'apporter ponctuellement des techniques qui vont permettre d'être plus proche de la réalité. L'incertitude et l'imprécision caractérisant les données d'une entreprise, bien que fréquemment constatées [GOU et KIE, 88] [SMI, 92], sont rarement prises en compte à court terme. La gestion de cette incertitude et de cette imprécision est plus souvent faite par le biais de méthodes statistiques, mais l'utilisation de la logique floue [ZAD, 65] et de la théorie de possibilités [ZAD, 78] [DUB et PRA, 87] a connu un succès certain. Elle concerne généralement les aspects suivants :

- La modélisation de critères de performance imprécis [BER, 97] [TÜR, 97],
- La modélisation de l'imprécision des connaissances sur les flux de produits [GRA et al, 97] [TÜR, 97],
- La modélisation de l'imprécision des connaissances sur les méthodes d'amélioration de l'ordonnancement [BEN et al, 88],
- La modélisation de l'imprécision temporelle (durées des tâches, dates de livraison, ...) [FAR, 97] [FOR, 97].

L'intelligence artificielle est susceptible d'être d'un grand intérêt pour l'ordonnancement, lui permettant notamment d'être plus proche de la réalité. Les méthodes d'ordonnancement issues de l'intelligence artificielle sont toutefois peu implantées dans l'industrie car elles ne sont pas encore suffisamment matures ni suffisamment transparentes pour l'utilisateur. [LET, 01]

III.6.2. Approches itératives :

Il a été fréquemment constaté dans la littérature ([FAR, 90], [BER et al, 98], [GRA et al, 99] ou [VAN, 99]) qu'un ordonnancement est rarement idéal « du premier coup » et qu'il est généralement nécessaire de procéder à des améliorations successives. On distingue deux approches d'amélioration d'un ordonnancement :

- Réparation de la solution par un processus automatique,
- Intervention de l'opérateur dans l'amélioration de la solution.

III.6.2.1. Réparation automatique:

La « réparation automatique » d'un ordonnancement consiste, à partir d'un ordonnancement déjà existant, à obtenir une solution plus ou moins optimale, cette amélioration étant entièrement faite par l'ordinateur. On considère trois approches dans cette automatisation de l'amélioration de l'ordonnancement : l'utilisation de l'intelligence artificielle, les méta-heuristiques et les techniques de choix de la meilleure méthode de résolution. [LET, 01]

Intelligence artificielle:

L'intelligence artificielle est fréquemment utilisée pour améliorer des ordonnancements déjà existants. Dans [BEL et al, 88] et [BEN et al, 88], les auteurs proposent de faire un ordonnancement par satisfaction de contraintes, puis d'améliorer le résultat grâce à un système expert. On peut aussi citer le système OPIS [OW et SMI, 88], qui détermine grâce à un système expert basé sur l'utilisation de tableaux noirs, les ressources goulots et relance un ordonnancement par satisfaction de contraintes en planifiant ces ressources en premier. On trouve dans [ART et AGH, 97] la présentation d'un système d'ordonnancement de systèmes complexes comportant un module « base de connaissances » qui, en fonction des problèmes et des performances de l'ordonnancement en cours, remodelise le problème et choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la mieux adaptée au modèle. Partant d'un ordonnancement fait par gestion des files d'attente, il est proposé dans [LER et al, 01] de capitaliser les résultats

successifs de l'ordonnancement pour constituer une base de connaissances qui pourra choisir le réglage des meilleurs paramètres.

Méta-heuristiques:

Les méthodes dites « méta-heuristiques » consistent à explorer « intelligemment » l'espace des solutions possibles pour trouver l'optimum ou une solution la plus proche possible. Parmi les méta-heuristiques les plus connues on trouve :

- Les méthodes de recherche avec tabous [GLO, 89] [GLO, 90], appliquées aux problèmes d'ordonnancement dans, entre autres, [HER et WID, 94], [DEL et TRU, 93] ou [TAI, 94]. La recherche avec tabous est alliée à un algorithme génétique dans [CHA et LO, 01] pour améliorer une solution d'ordonnancement par rapport à des objectifs quantitatifs et qualitatifs.
- Les algorithmes génétiques ([HOL, 75], [GOL, 89] ou [DAV, 91]). Dans [BER et al, 97], un ordonnancement obtenu par une simulation à événements discrets est amélioré au moyen d'un algorithme génétique. Dans [LI et al, 00], une approche par algorithmes génétiques est aussi utilisée pour améliorer un ordonnancement multi-objectif. Dans [PON et al, 01], un nouvel algorithme génétique est proposé pour améliorer des solutions d'ordonnancement.
- La méthode du recuit simulé [MET et al, 53], qui permet par exemple d'améliorer un ordonnancement obtenu par satisfaction de contraintes [VAN, 99] ou par la gestion des files d'attente [PON et al, 99].

Choix de la meilleure méthode :

On peut aussi classer dans cette catégorie les différentes approches qui proposent de sélectionner automatiquement la meilleure méthode de résolution en fonction des paramètres de l'atelier considéré. On trouve différentes approches de sélection comme les réseaux de neurones [BOU et al, 97] ou les systèmes experts [ROM et al, 97]. Dans [RIA et al, 99] est proposée une plateforme qui évalue et compare les différentes heuristiques de résolution. On peut aussi rappeler [ART et AGH, 97] dans lequel le système présenté comporte un module « base de connaissances » qui choisit la méthode ou l'heuristique de résolution la plus adaptée au modèle.

Des tentatives de sélection des meilleures règles de priorité en fonction des paramètres de l'atelier ont été faites, par exemple dans [BOU, 91] (ordonnancement job shop), [PIE et MEB, 97] (sélection dynamique), [GRA et al, 97] (règles floues) ou [SUB et al, 00] (sélection dynamique par Analytic Hierarchy Process [SAA, 80]).

Remarques:

En général, ces méthodes d'amélioration automatique de l'ordonnancement, bien que tentant de répondre à un réel besoin, sont peu mises en œuvre dans l'industrie. Leur complexité et leur temps d'exécution les rendent pour l'instant peu attractives pour des logiciels d'ordonnancement commerciaux.

De plus, si les industriels veulent un ordonnancement qui s'adapte à leur spécificité, ils veulent aussi en rester maîtres. Les « automatisations » proposées du processus d'amélioration isolent le gestionnaire d'atelier de son ordonnancement et peuvent ainsi le conduire à le rejeter [MYE, 00] [ALD et CAV, 01].

III.6.2.2. Intervention humaine:

Il est fréquemment reconnu que la résolution d'un problème d'ordonnancement est fortement dépendante de l'atelier auquel l'ordonnancement s'applique. Cet aspect explique l'échec relatif de toutes les solutions d'amélioration automatique qui ne permet pas de s'adapter aux spécificités de chaque entreprise. [BAE et al, 99] ont notamment constaté que globalement, les choix de l'opérateur humain donnent de meilleurs résultats que les choix de l'ordinateur. La recherche s'est donc tournée vers des solutions permettant d'intégrer la participation de l'utilisateur du logiciel d'ordonnancement, afin que celui-ci puisse guider la résolution en fonction de ses besoins particuliers [FAR, 90] [BER et al, 98] [GRA et al, 99]. On distingue en général deux approches de l'intervention humaine dans l'ordonnancement : la coopération et l'interaction.

Ordonnancement coopératif:

L'**ordonnancement coopératif** est défini dans [BER et al, 98], [LOP et al, 98] ou [GRA et al, 99] comme la mise au point conjointe de l'ordonnancement par le logiciel et par le gestionnaire d'atelier (Figure III.3.).

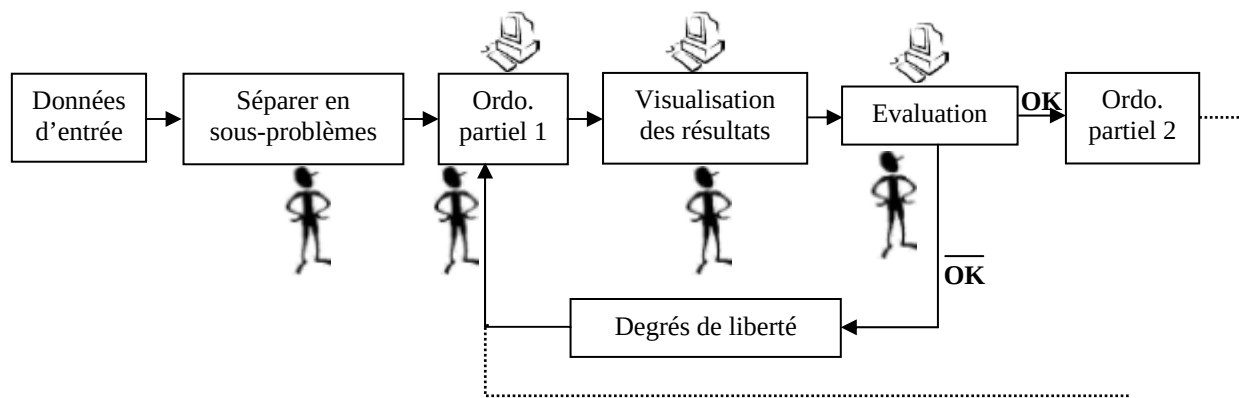


Figure III-3 Une approche coopérative de l'ordonnancement [GRA et al, 99].

La coopération présentée Figure III.3 présente plusieurs conditions :

- Une interface homme-machine très développée et très interactive pour que l'opérateur puisse pleinement participer à l'élaboration de l'ordonnancement,
- Une évaluation des résultats qui permet à l'utilisateur du logiciel d'avoir un ordonnancement correspondant réellement à ses besoins,
- Une forte implication de l'opérateur dans l'obtention de l'ordonnancement, ce qui permet à l'utilisateur de pouvoir s'approprier les résultats.

Néanmoins, la forte participation de l'utilisateur dans le processus d'obtention d'un ordonnancement nécessite aussi que celui-ci connaisse parfaitement le processus de résolution du logiciel afin de pouvoir participer activement. L'opérateur humain doit aussi être capable de séparer le problème d'ordonnancement en sous-problèmes pour réaliser des ordonnancements partiels. [LET, 01]

Ordonnancement interactif:

L'**ordonnancement interactif** se définit comme une alternance de décisions de l'opérateur et du logiciel. [FAR, 90] propose les étapes présentées Figure III.4.

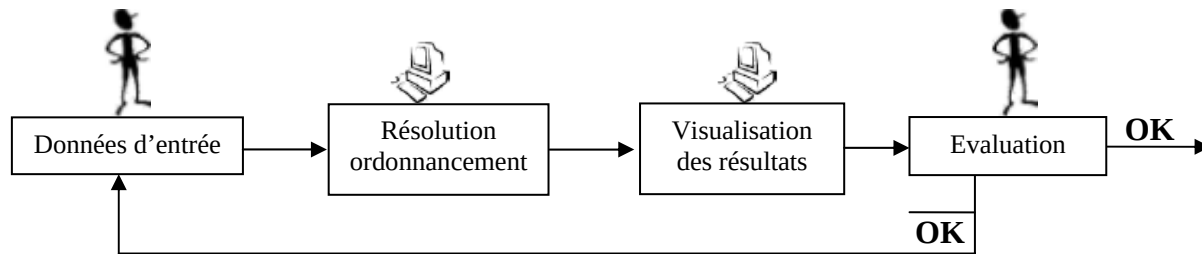


Figure III.4. Une approche interactive de l'ordonnancement.

L'approche de l'ordonnancement interactif présentée Figure III.4 fait ressortir l'alternance des décisions humaines (au niveau des données d'entrée de l'ordonnancement et de l'évaluation des résultats) et des décisions du logiciel (au niveau de la résolution du problème d'ordonnancement et de l'affichage des résultats). De plus, une telle approche met en avant l'aspect « évaluation des résultats » de l'ordonnancement qui nous semble être une étape indispensable à une utilisation pertinente des résultats de l'ordonnancement.

On peut néanmoins lui reprocher l'absence de l'aide logicielle au niveau de la boucle de retour. En effet, si l'ordonnancement produit par le logiciel ne convient pas à l'utilisateur, celui-ci va chercher à modifier divers paramètres, règles, données ou degrés de liberté pour obtenir un ordonnancement « meilleur ». Ces modifications, indispensables à l'amélioration de l'ordonnancement, sont difficiles à déterminer sans guide ou informations. **[LET, 01]**

Approche proposée:

Nous proposons une amélioration de l'approche interactive en ordonnancement, par une aide à l'identification des problèmes puis au choix des points d'action (Figure III.5). **[LET, 01]**

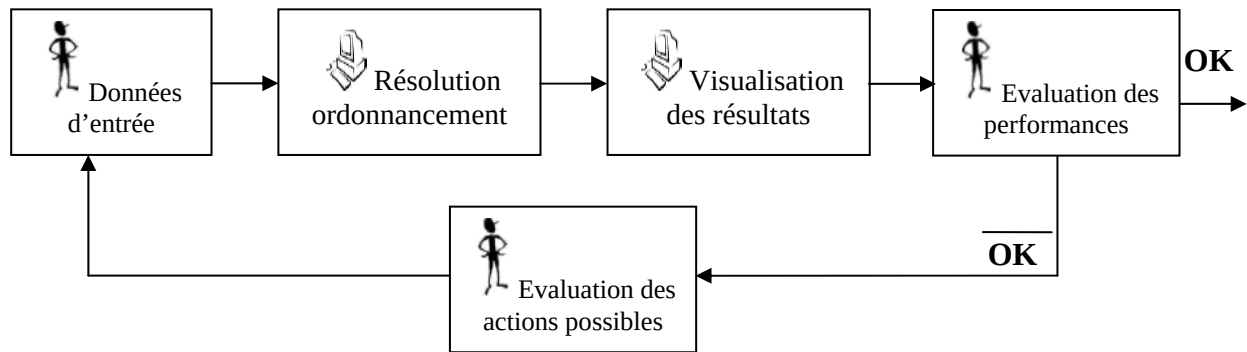


Figure III-5 L'évaluation dans l'ordonnancement interactif.

Dans cette approche, l'opérateur n'est plus seul pour refermer la boucle, le logiciel lui apporte une aide, sous forme d'évaluation, pour savoir où agir. Cette aide se présente sous la forme de tableaux de bord, comportant des indicateurs qui vont informer l'utilisateur des différentes possibilités d'amélioration qui s'offrent à lui. L'opérateur humain pourra alors modifier les données d'entrée (paramètres de l'ordonnancement, données techniques...) pour que la résolution par le logiciel aboutisse à un ordonnancement plus satisfaisant. Les différentes données sur lesquelles il peut intervenir dépendent d'une part des spécificités de l'entreprise et de l'atelier géré (expertise de l'utilisateur) et d'autre part des particularités du logiciel d'ordonnancement utilisé.

Cette approche interactive ayant pour ambition de permettre au gestionnaire d'atelier d'améliorer l'ordonnancement produit par son logiciel, la partie suivante propose un survol des logiciels d'ordonnancement dans l'industrie. **[LET, 01]**

III.7. Conclusion:

L'ordonnancement est un processus de décision qui apparaît dans la plupart des systèmes de production et de transport ainsi que dans la gestion de projet **[PIN, 95]**. L'ordonnancement trouve sa place essentiellement dans les ateliers ayant une production diversifiée en flux poussé (tels que le flow shop et le job shop), gérée par des ordres de fabrication. C'est un élément crucial dans l'ensemble des tâches liées au pilotage d'atelier, que l'on peut décrire par un cycle d'ordonnancement, de contrôle, de suivi et de réaction.

L'ordonnancement peut être vu comme un problème d'optimisation combinatoire. Il faut trouver une bonne solution, voire optimale au regard d'un ou de plusieurs critères d'évaluation. **[HAR, 03]**

Chapitre IV

Ordonnancement des activités de la maintenance

IV.1. Introduction :

L'ordonnancement représente la fonction « chef d'orchestre ». Dans un service maintenance caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité, l'absence du chef d'orchestre débouche vite sur la cacophonie quel que soit le brio des solistes. L'ordonnancement se situe entre la *fonction méthode*, chargée de la définition des tâches à effectuer et des moyens à mettre en œuvre, et la *fonction réalisation* chargée de leur exécution. [MON, 03]

IV.2. Missions de l'ordonnancement :

Ayant la responsabilité de la conduite et de la synchronisation des actions de maintenance internes ou externalisées, la fonction ordonnancement a pour mission :

- De prévoir la chronologie du déroulement des différentes tâches ;
- D'optimiser les moyens nécessaires en fonction des délais et des chemins critiques ;
- D'ajuster les charges aux capacités connues ;
- De lancer les travaux au moment choisi, en rendant tous les moyens nécessaires disponibles ;
- De contrôler l'avancement et la fin des travaux ;
- De gérer les projets (prévision, optimisation logistique, avancement et respect des délais);
- D'analyser les écarts entre prévisions et réalisation. [MON, 03]

Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir un instant t et un endroit x où un personnel p muni d'un outillage o et des matières m exécutera la tâche M en harmonie avec les autres travaux connexes.

Cette fonction stratégique est peu visible (effectif dédié faible) et souvent peu étudiée, mais elle repose sur des méthodes à connaître. Son absence ou son insuffisance est par contre fort visible : tâches préventives négligées, gaspillage de temps en recherche de moyens indispensables, améliorations toujours reportées à plus tard, techniciens parfois inoccupés associés à des heures supplémentaires évitables, etc. [MON, 03]

IV.3. Difficultés inhérentes à l'ordonnancement en maintenance :

IV.3.1. Quelques spécificités en matière d'ordonnancement :

Il est incontestable que la diversité des actions de maintenance complique leur programmation :

- D'une durée de quelques secondes en automaintenance à des milliers d'heures pour des chantiers lourds de type arrêt périodique d'unité de production. Dans le premier cas, le besoin du client est satisfait par une grande réactivité. Dans le second, il est satisfait par le respect du délai et la qualité du travail ;
- Du systématique planifié 6 mois à l'avance au correctif fortuit, au mauvais endroit et au mauvais moment ;
- De l'urgent à faire sans délai à l'amélioration dépourvue de délai et toujours remise à demain.

L'organisation à mettre en œuvre doit tenir compte de cette variabilité : légère et souple pour assurer la réactivité d'équipes de terrain, logistique lourde pour la gestion des arrêts. **[MON, 03]**

Autre difficulté, la production étant maîtresse de ses arrêts planifiés, la maintenance se retrouve logiquement dans une situation de dépendance. Une bonne synchronisation est indispensable entre les services ordonnancement afin de profiter des arrêts de production (formatage, chômage technique, etc.) pour réaliser des opérations de maintenance. **[MON, 03]**

IV.3.2. Réussir la gageure de la prévision du fortuit :

Mais la principale difficulté vient du caractère fortuit de la panne : comment intégrer l'imprévisible aux prévisions, ou comment intégrer des dépannages à un planning ? Certains services maintenance prennent prétexte de cette apparente contradiction pour ne pas ordonnancer leurs activités. Si 90 % de leurs activités sont fortuites, ils ne peuvent guère faire autrement. Mais si, grâce à une efficace politique préventive, les dépannages ne représentent que moins de la moitié de la charge de travail, alors ce fortuit devient prévisible et facilement programmable ! **[MON, 03]**

En effet, l'organisation du service maintenance doit « coller » à ces difficultés pour les résoudre sinon harmonieusement, du moins en « lissant » les imprévus : si l'on sait, par retour d'expérience des années passées, que 21 % de la charge de travail annuelle est constituée de petits dépannages fortuits, nous réserverons pour chaque unité d'ordonnancement 21 % de la capacité. 21 % la semaine prochaine, puis demain 21 % de la capacité disponible pour dépanner, etc. Ce qui s'avérera insuffisant et trop pessimiste demain, et optimiste après-demain, puis à la longue progressivement bien ajusté ! [MON, 03]

De la même manière que si l'on est parfaitement incapable de prédire « pile ou face » pour un événement, nous savons parfaitement le prévoir avec d'autant moins d'erreur relative que le nombre N d'événements croît. Cette estimation statistique de charge se nomme la « charge réservée ». [MON, 03]

IV.4. Terminologie de l'ordonnancement

L'ordonnancement utilise un vocabulaire spécifique qu'il est indispensable de définir avant d'aborder les méthodes à utiliser pour gérer les activités de maintenance. [MON, 03]

IV.4.1. Notions de charge et de capacité :

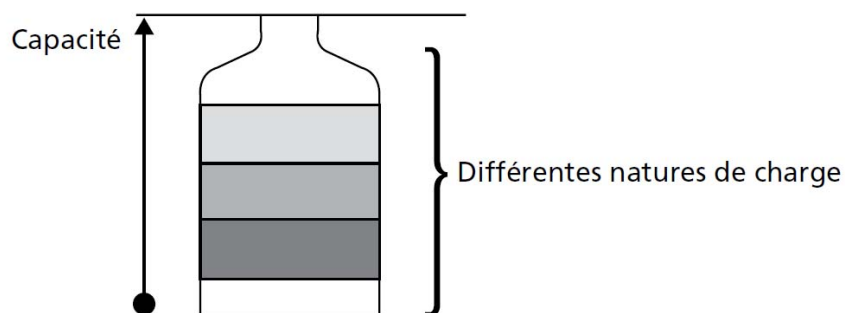


Figure IV-1 Charges et capacité.

IV.4.1.1. Capacité de charge :

Elle est illustrée par la notion de « contenant », estimée par le potentiel d'heures qu'une équipe représente, dans les horaires normaux de travail. C'est une valeur facile à estimer et sensiblement constante.

Exemple :

Une équipe d'antenne de maintenance formée de 8 techniciens représente une capacité de 8×35 heures/semaine = 280 heures, soit 13 160 heures/an avec 5 semaines de congés.

Nous distinguerons la *capacité théorique*, que nous venons d'estimer, et la *capacité réelle*, estimée en retranchant les absences prévisibles, qu'elles soient prévues (formation) ou non prévues (taux d'absentéisme). [MON, 03]

IV.4.1.2. Charges de travail :

C'est la notion de « contenu » matérialisée par le cumul des temps prévus affectés à une équipe (ou un technicien) pour une période de temps de référence nommée « unité d'ordonnancement ». Ce contenu est constitué de « strates » de travaux de natures différentes que l'on peut gérer : c'est une des missions de l'ordonnancement d'arriver à équilibrer les charges et les capacités. [MON, 03]

IV.4.1.3. Surcharges :

Elles se manifestent évidemment lorsque la charge est supérieure à la capacité, en supposant le temps « incompressible ». Comme 1,5 litre ne rentre pas dans une bouteille d'un litre, il faut trouver des solutions après analyse des causes et estimation du pourcentage de surcharge. Nous distinguerons donc les surcharges de nature permanente ou de nature conjoncturelle. [MON, 03]

Solutions envisageables pour les surcharges permanentes :

1. Repenser la politique de maintenance, sachant :
 - Que le préventif diminue naturellement la charge corrective, mais aussi la charge totale ;
 - Que le développement continu des « améliorations » diminue les taux de défaillance, donc la charge corrective ;
 - Que le développement des méthodes-ordonnancement optimise les temps d'opération et les aléas logistiques ;
 - Que les effets de ces politiques ne seront pas immédiats !

2. Externaliser les travaux éloignés des pôles de compétence des techniciens (recentrage sur le « métier »).
3. Supprimer certains travaux (ils étaient donc inutiles ?).
4. Augmenter la productivité des techniciens par la motivation : mais attention à ce que le gain de productivité ne se fasse au détriment de la qualité des interventions.
5. Transférer les travaux de niveaux 1 et 2 sur la production, dans une logique TPM.
6. Embaucher du personnel, pour augmenter la capacité tout en sauvegardant le savoir-faire interne relatif au maintien de la production. **[MON, 03]**

Solutions envisageables pour pallier les surcharges conjoncturelles :

1. Recourir aux heures supplémentaires (coûteux et fatigant).
2. Demander un effort ponctuel d'efficacité.
3. Recourir à la sous-traitance, sachant qu'elle se prête mal à une négociation dans l'urgence.
4. Renforcer les équipes, soit par transfert interne, soit par recours à l'intérim.
5. Chercher des priorités d'urgence et reporter certains travaux.
6. Remplacer une réparation par un échange standard plus rapide.
7. Panacher ces solutions.

Ce sont les services maintenance les plus surchargés qui ont le plus besoin d'une remise en cause de leurs méthodes et ordonnancement, et qui ne les remettent pas en cause, puisque surchargés... [MON, 03]

IV.4.1.4. Sous-charges :

Elles correspondent bien sûr à une surcapacité, de caractère permanent ou conjoncturel. Conjoncturelles, elles rendent disponible du personnel, ou bien elles sont masquées par la « volatilité » du temps de charge qui ajuste par miracle la charge à la capacité. Permanentes, elles posent le problème critique du sureffectif. **[MON, 03]**

IV.4.2. Notions de tâche et de projet :

IV.4.2.1. Notion de tâche :

La « phase » des méthodes devient la « tâche » caractéristique du vocabulaire propre à l'ordonnancement. *Une tâche est un ensemble d'opérations qu'il est logique de grouper afin de les confier à une même équipe d'intervention, dont le début et la fin sont bien définis et dont le contenu est contrôlable.* La situation d'une tâche dans le temps implique la définition des notions illustrées par la figure IV-2. [MON, 03]

A priori, la planification s'opère en plaçant chaque tâche « au plus tôt ». Les tâches peuvent être « en série » lorsque existe une contrainte d'antériorité du type « B débute lorsque A est terminé » ou en parallèle si cette contrainte n'existe pas (tâches indépendantes). [MON, 03]

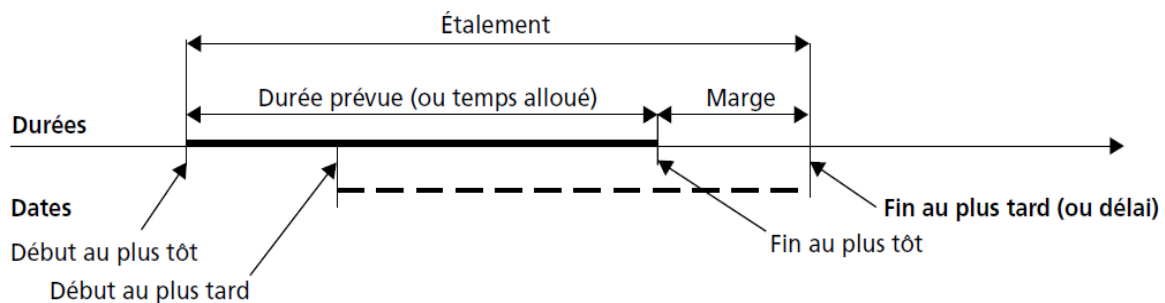


Figure IV-2 Vocabulaire de la tâche.

IV.4.2.2. Notion de projet :

Un « projet » est un ensemble décomposé en tâches élémentaires auxquelles le préparateur a attaché une durée prévue et a défini la liste des tâches *antécédentes* : « pour que M débute, il faut que K et L soient terminées ».

Exemples :

Révision périodique d'un équipement, arrêt annuel d'une unité de production, etc. [MON, 03]

Jalonnement : c'est l'ensemble des dates relatives à la succession des tâches qui caractérise le projet.

Chemin critique : c'est l'ensemble des tâches « en série » qui conditionne le délai final du projet (ou programme).

Délai de projet : c'est la date de fin de la dernière tâche critique. C'est également une contrainte technique ou commerciale (éventuellement associée à des pénalités de retard) s'appliquant à l'achèvement du projet (ou d'une tâche critique). [MON, 03]

IV.4.3. Notion de planning :

Le planning est un outil prévisionnel, application du diagramme de Gantt, qui *visualise*, sur panneaux muraux ou sur écran, la succession des tâches caractéristiques d'une période d'activité. Il peut prendre des formes matérielles très diverses (traits, rubans, cartons ou ficelles de couleurs). Par extension, on nomme parfois « planning » le service chargé de la programmation. [MON, 03]

IV.4.3.1. Principe du diagramme de Gantt :

Il est structuré à partir d'une échelle des temps nommée « unité d'ordonnancement » : jour décomposé en heures, semaine décomposée en jours, année décomposée en semaines, etc. Chaque tâche est représentée par une barre de *longueur proportionnelle au temps prévu*, et elle est positionnée a priori « au plus tôt ». [MON, 03]

Le même outil peut représenter la succession des étapes d'un projet (cas de la Figure IV-3) ou une succession de tâches indépendantes. Sur l'exemple, la tâche antécédente A libère les tâches B et C, la tâche B étant margée, ce qui donne une liberté pour « lisser » la charge. Le *lissage* consiste à jouer sur la liberté de programmation offerte par les marges pour régulariser la charge totale à un instant donné, ou à gérer différentes contraintes afférentes au projet. [MON, 03]

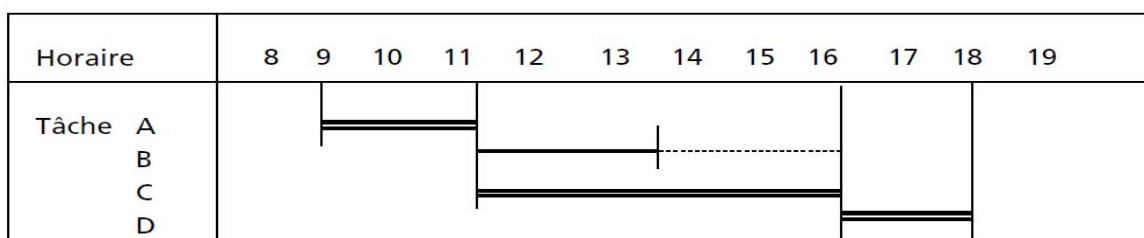


Figure IV-3 Structure d'un graphe de Gantt.

Le graphe de Gantt est un outil « naturel » et « visuel » très polyvalent dans ses applications et dans ses formes matérielles. [MON, 03]

IV.4.3.2. Tâche critique et chemin critique :

Le graphe de Gantt appliqué à la gestion d'un projet met en évidence une succession de tâches « en série » (A, C, D dans l'exemple) et non margées : ce sont les tâches critiques dont l'enchaînement forme le chemin critique et conditionne le délai final. Tout retard sur une tâche critique se répercute dans le délai. [MON, 03]

IV.4.4. Les trois horizons : le partage des compétences et des responsabilités :

IV.4.4.1. Principe de base :

« On ne voit distinctement que ce qui est près » et « Pour voir au loin, il faut s'élever ».

Le premier truisme montre qu'il est bien inutile de vouloir tenir des plannings d'activités de maintenance en dehors d'un futur probable et lisible. Plus la prévision est lointaine, plus elle doit être globalisée. Plus elle est proche, plus elle doit être détaillée.

Le second truisme propose un partage de responsabilités ainsi qu'un modèle d'organisation à partir de trois horizons de programmation, à court, moyen et long terme (Figure IV-4). [MON, 03]

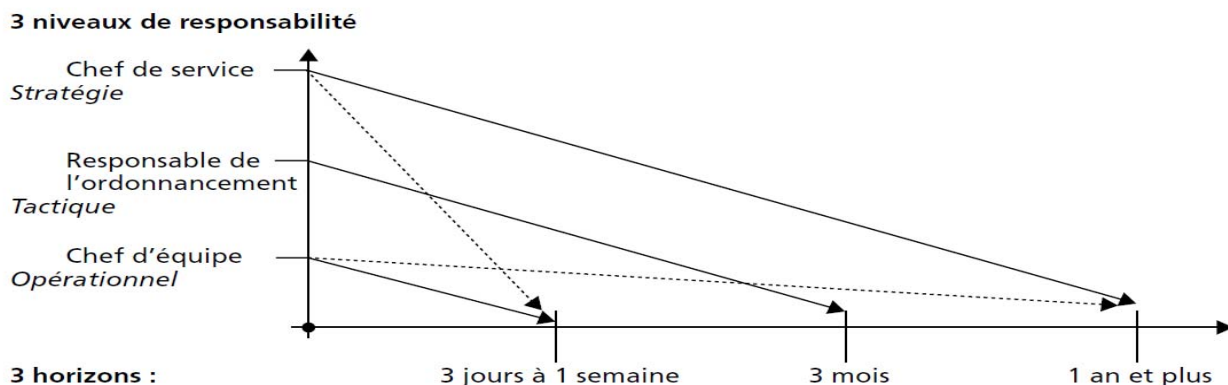


Figure IV-4 Le partage des responsabilités de programmation en maintenance.

IV.4.4.2. Horizon à long terme :

Le responsable du service maintenance a la responsabilité naturelle de prévoir les ajustements du « plan de charges annuel » avec les capacités, par extrapolation des bilans d'activités des années passées. Cette analyse est réalisée :

- En tenant compte des perspectives de l'entreprise et de sa conjoncture économique ;
- En intégrant les contraintes et les projets nouveaux ;
- En identifiant les phénomènes structurels affectant les charges ou les capacités. [MON, 03]

Elle s'apparente et est liée à l'analyse budgétaire qu'elle doit précéder. Cette indispensable réflexion prospective en phase avec le futur de l'entreprise doit déboucher sur des choix et des décisions à l'horizon « 1 an » en terme d'effectif, de choix des travaux et de politique d'externalisation. [MON, 03]

IV.4.4.3. Horizon à moyen terme :

C'est le domaine de responsabilité de l'agent d'ordonnancement, « chef d'orchestre » des activités du service maintenance. Il organise les activités à l'horizon 3 mois et les « lance » chaque semaine en direction des équipes de terrain. C'est ce profil de compétence que de lui dépend pour une bonne part l'efficacité du service maintenance. Ce que l'on vérifie le plus souvent par défaut. [MON, 03]

IV.4.4.4. Horizon à court terme :

La vocation naturelle d'un chef d'équipe est d'assurer la répartition équilibrée du travail des membres de l'équipe, en fonction de leur spécialisation, de leurs compétences et de leur disponibilité. Cela pour un horizon allant du futur immédiat (cas du dépannage urgent) à 3 jours pour le « planning d'atelier » (**voir figure IV-8**) et à la semaine pour le listing des travaux à effectuer. [MON, 03]

IV.5. Les niveaux de l'ordonnancement et leurs outils :

IV.5.1. Les cinq niveaux de l'ordonnancement :

On distingue cinq niveaux s'échelonnant dans le temps, allant du futur à long terme au passé immédiat suivant le tableau IV-1. [MON, 03]

Niveau	Nom	Horizon	Responsable
1	Plan de charge annuel	1 an	Chef de service
2	Plan de charge prévisionnelle	3 mois	Agent d'ordonnancement
3	Planning de lancement	1 semaine	Agent d'ordonnancement
4	Planning d'atelier	1/2 semaine	Chef d'équipe
5	Suivi de l'avancement	Passé immédiat	Agent d'ordonnancement

Tableau IV-1 Les cinq niveaux d'ordonnancement en maintenance.

IV.5.1.1. Niveau 1 : le plan de charge annuelle :

Il s'agit de recenser les activités sur l'année qui vient, à partir de deux bases.

- La prévision statistique, par extrapolation des années passées, pour toutes les activités «stabilisées» caractéristiques du service maintenance, exprimées en pourcentage de la capacité de charge. Ce qui suppose la maîtrise des temps d'activités passés les années antérieures, mis en familles (préventif, petites interventions et dépannages, réparations et révisions, travaux divers, etc.) et gérés par une GMAO opérationnelle dans une organisation cohérente.
- L'estimation temporelle de tous les projets de travaux « lourds » à programmer pour la période concernée : arrêt d'unité, rénovation, campagne de mise en conformité, travaux neufs, grosses révisions. L'ajustement de ce cumul de charges prévues avec la capacité réelle interne du service offre une base solide d'organisation, en particulier pour décider de la part de charge à externaliser. [MON, 03]

IV.5.1.2. Niveau 2 : le planning de charge prévisionnelle :

Cet outil de gestion est tenu par l'agent d'ordonnancement et sert de tableau de bord au chef de service, lui donnant une bonne lisibilité des activités à moyen terme, de 3 à 6 mois. [MON, 03]

- **Principe d'établissement :**

Le planning est basé sur l'équation, quantifiée sur la période d'ordonnancement choisie : [MON, 03]

$$\text{Capacité de charge réelle} = \text{charge programmée} + \text{réserve de charge} + \text{charge disponible programmable}$$

Nous en tirons la valeur de la charge disponible programmable suivant l'écriture vectorielle suivante facile à matérialiser sur un planning (figure IV-5) : [MON, 03]

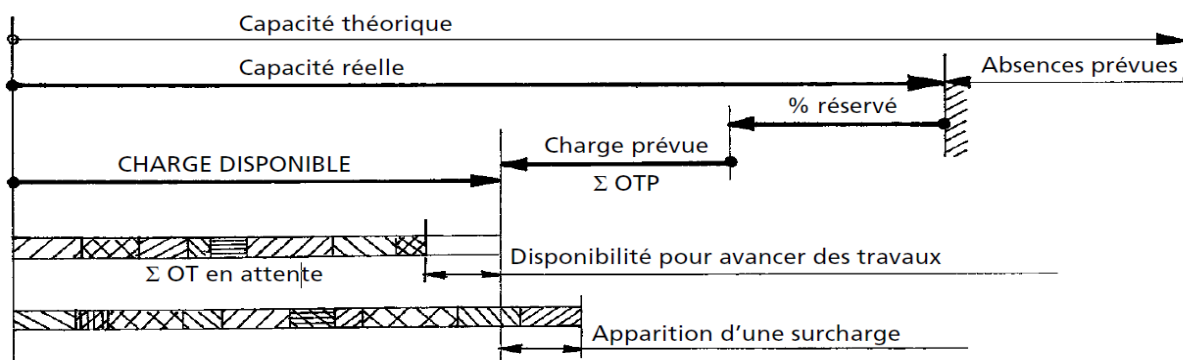


Figure IV-5 Structure d'un planning de charge prévisionnelle (sur 4 mois, par exemple).

La charge disponible programmable est constituée d'un certain nombre d'OT relatifs à des travaux « en attente » non urgents mais de durée importante, qu'il serait nécessaire de débloquer au cours de la période Δt considérée. [MON, 03]

- **Capacité de charge réelle :**

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\text{Capacité de charge réelle} = \text{capacité théorique} - (\text{heures non productives} + \text{aléas estimés})$$

La capacité théorique est l'horaire théorique de travail sur Δt . Les heures non productives sont constituées des heures de décharge, de nettoyage, de formation, etc. Elles sont connues à

l'avance (plan de formation, règlement interne, etc.). Les aléas comprennent l'estimation statistique des absences (taux moyen d'absentéisme), des arrêts maladies, des jours de grèves, etc. Ils sont quantifiés en pourcentage de la capacité, à partir des résultats antérieurs, éventuellement en prenant en compte les variations saisonnières. [MON, 03]

La charge prévue est constituée du cumul des OTP (préventif systématique) pendant Δt .

La charge réservée est estimée par la somme des pourcentages relatifs aux bons pour petits travaux (BTP), aux OT relatifs aux nombreux travaux correctifs urgents et de courte durée (OT U1 et 2) et aux aléas. Ces pourcentages de la capacité annuelle sont transformés en heures réservées pour la période considérée par simple règle de trois.

La charge disponible quantifie tous les travaux en attente qu'il va être possible d'intégrer dans la période d'ordonnancement, suivant leur délai et leur urgence relative. [MON, 03]

- **Graphique de charge prévisionnelle cumulée :**

Il est possible de déduire de la même équation de principe un outil de gestion dont l'effet de cumul sur la période d'ordonnancement choisie donne une bonne vision de la charge disponible. [MON, 03]

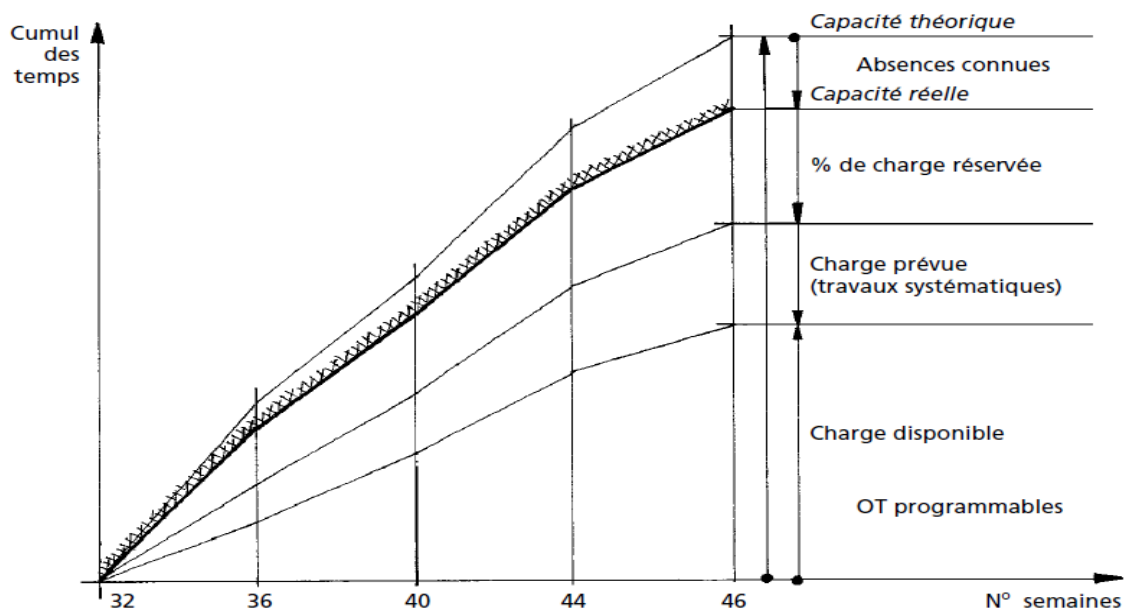


Figure IV-6 Graphique de charge cumulée.

Exemple :

La figure IV-6 donne le graphe de charge cumulée pour une équipe de 10 agents de maintenance sur la période semaine 32 à semaine 46. [MON, 03]

IV.5.1.3. Niveau 3 : le planning de lancement :

Géré par l'agent d'ordonnancement, ce planning a pour objet de distribuer une charge de travail hebdomadaire aux différentes équipes, antennes décentralisées ou ateliers de maintenance.

[MON, 03]

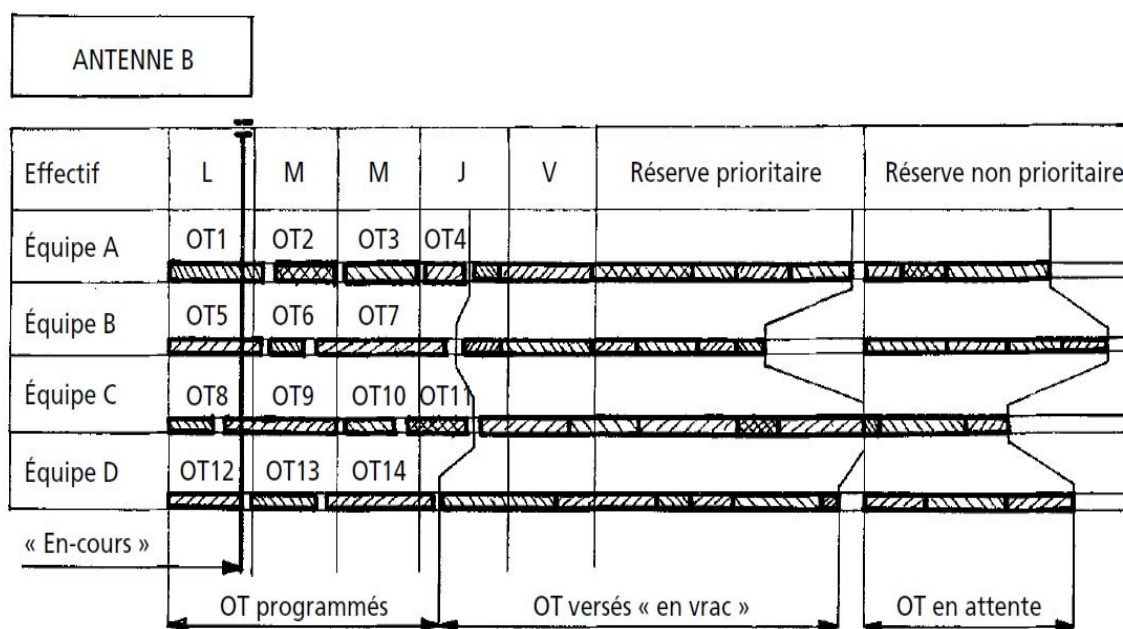


Figure IV-7. Exemple de planning de lancement.

Le planning de charge est ainsi « vidé » chaque semaine, les tâches plus détaillées étant transférées dans le planning de lancement, de façon planifiée pour les 2 à 3 jours à venir, « en vrac » pour les suivantes. En effet, il suffit d'un ajout dû à une urgence pour obliger à tout reconstruire, ce qui n'est pas trop gênant pour 2 journées. Les heures « préventives systématiques » sont débloquées chaque semaine pour la semaine suivante.

Le rôle de l'agent d'ordonnancement ne se limite pas à débloquer les tâches à exécuter, mais à les « lancer », c'est-à-dire à rendre disponible toute la logistique nécessaire. [MON, 03]

IV.5.1.4. Niveau 4 : le planning d'atelier :

Tenu par le chef d'équipe ou d'atelier, le planning d'atelier (figure IV-8) visualise l'affectation et la répartition du travail entre les techniciens. Les tâches « débloquées » par l'ordonnancement (niveau 3) doivent être « exécutables », c'est-à-dire associées à la logistique nécessaire à l'exécution. Le planning d'atelier couvre heure par heure, nominalement pour chaque technicien, les 2 à 3 prochains jours d'activité. [MON, 03]

IV.5.1.5. Niveau 5 : le suivi de l'avancement :

Le planning est une fonction « vivante » qui ne doit jamais être déconnectée des réalités du terrain. L'information de fin de tâche doit remonter à l'ordonnancement (planning de lancement) sous forme de BT (papier ou écran) complété par le temps passé et l'heure de fin de tâche. Il appartient à l'agent d'ordonnancement d'aller sur le site pour les tâches « critiques » conditionnant un délai à respecter. L'analyse des écarts prévision/réalité est de sa responsabilité. [MON, 03]

Remarque :

Pour toutes les « unités d'ordonnancement » considérées précédemment (3 jours, 1 semaine, 3 mois, 1 an), ainsi que pour les plannings et pour les outils correspondants, la difficulté réside dans le fait que le « présent » change tout le temps ! Sans aller jusqu'à la gestion en « temps réel », il est nécessaire de mettre à jour, actualiser et corriger ces outils chaque jour pour les plannings d'atelier et de lancement, tous les mois pour le niveau 2, deux à trois fois par an pour le niveau 1.

L'utilisation d'outils informatique (GMAO ou logiciel de gestion de projet) facilite grandement le suivi de l'avancement des activités. [MON, 03]

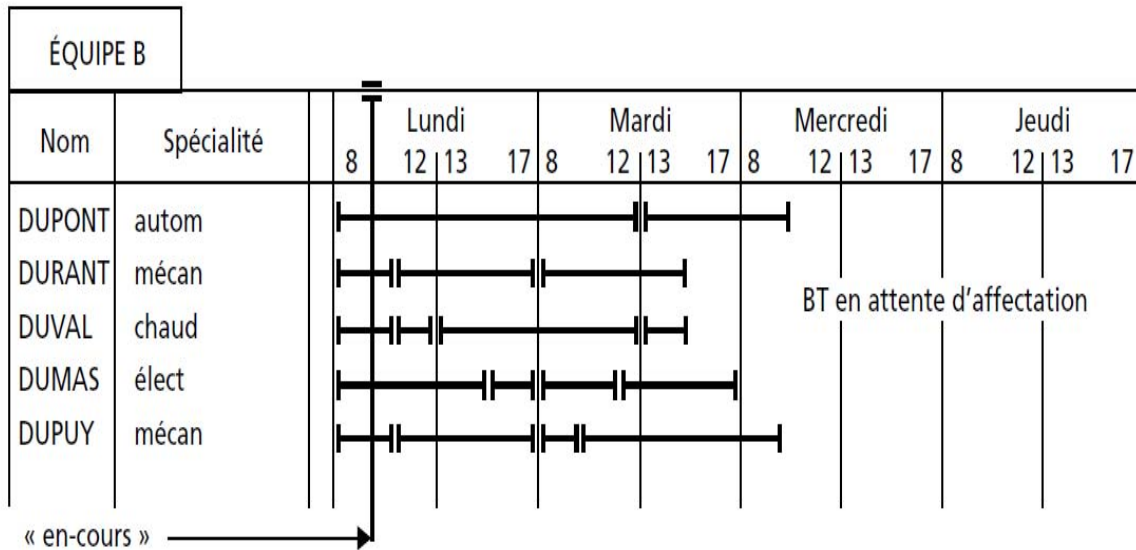


Figure IV-8 Structure d'un graphe d'atelier.

IV.6. Les sous-fonctions de l'ordonnancement en maintenance : flux et procédures :

La figure IV-9 met en évidence les flux de communication à travers les cinq sous-fonctions de l'ordonnancement. [MON, 03]

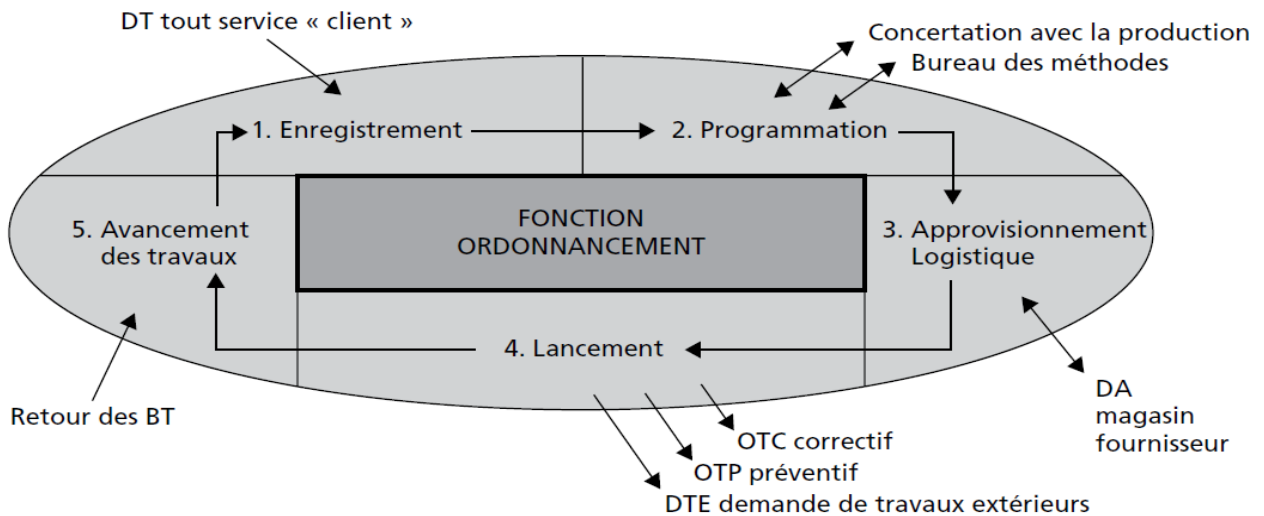


Figure IV-9 Les flux de communication de l'ordonnancement.

IV.6.1. Enregistrement :

Toutes les demandes de travaux DT émanent des différents « clients » et convergent à l'enregistrement, à l'exception des BPT (bons de petits travaux), qui font partie de la charge réservée et qui sont remis directement aux techniciens d'antennes de maintenance. Le tri se fait à partir des délais fixés, de la durée estimée d'intervention et de « l'urgence relative » éventuellement négociée, car chaque demandeur se pense prioritaire. Un arbitrage s'avère donc indispensable. [MON, 03]

Les OT U_1 (intervention immédiate) et U_2 (dès que possible) sont transmis aux équipes concernées via les méthodes (la définition d'une procédure de sécurité prime l'urgence).

Les OT U_3 (prochain arrêt) et U_4 (prochain arrêt programmé) sont mis en attente de charge disponible. [MON, 03]

IV.6.2. Programmation :

Il s'agit de gérer au niveau 2 le planning de charge prévisionnelle pour tous les OT U_3 et U_4 , à regrouper lors d'un arrêt à programmer en concertation avec les secteurs de production. Ces tâches sont préparées au bureau des méthodes, qui définit les moyens nécessaires à leur exécution. La figure IV-5 illustre la programmation de la charge disponible. [MON, 03]

IV.6.3. Approvisionnement et logistique :

Chaque préparation de tâche contient la liste des moyens nécessaires : il appartient à l'agent d'ordonnancement de vérifier leur présence en stock disponible, ou de les approvisionner (DA) en tenant compte des délais de livraison par rapport à la date programmée. [MON, 03]

IV.6.4. Lancement :

Définissons le lancement comme « la mise à disposition des techniciens, en préliminaire à toute intervention, de TOUS les moyens logistiques rendus disponibles nécessaires à la réalisation de l'intervention ». La figure IV-10 illustre la mission et le rôle stratégique que le lancement doit tenir. [MON, 03]

La sous-fonction lancement est la clé de l'amélioration de la performance du service maintenance. Toute analyse des « gaspillages de temps d'intervention » met en évidence les pertes dues à la recherche par les techniciens, pendant un arrêt machine, du schéma manquant, de l'outillage adapté, du testeur, du produit, de la référence de la pièce de rechange, puis de la pièce « qui ne va pas » et qu'il faut aller chercher chez le fournisseur. [MON, 03]

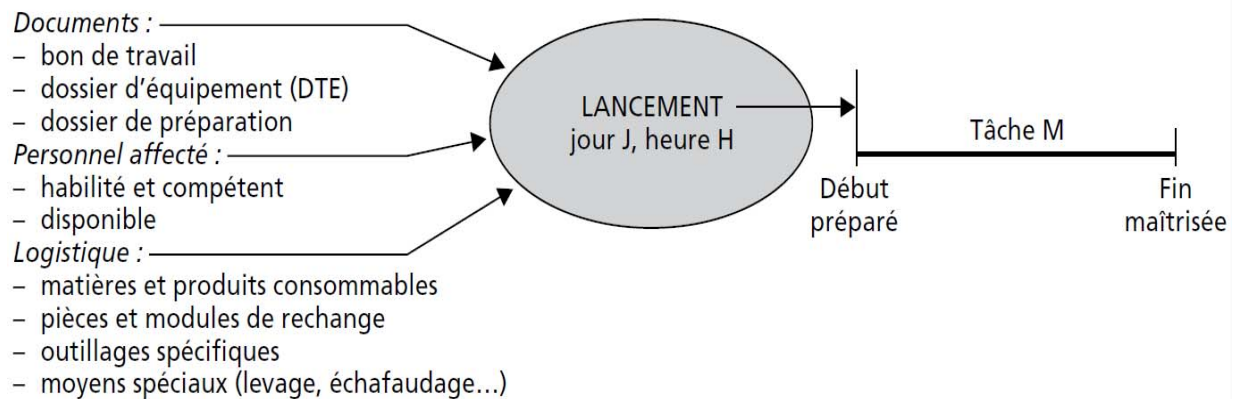


Figure IV-10 Le lancement, clé de la productivité de la maintenance.

IV.6.5. Avancement des travaux :

Le suivi de l'avancement des travaux est le moteur de l'ordonnancement, chaque tâche achevée libérant la tâche suivante. Il se fait par l'exploitation de tous les retours de BT complétés par les techniciens et contrôlés par les chefs d'équipe, par écrits ou sur écran. Cette sous-fonction permet à l'ordonnancement de ne jamais se déconnecter des réalités du terrain. [MON, 03]

IV.7. Déclenchement des différents travaux de maintenance :

IV.7.1. Déclenchement des actions préventives :

IV.7.1.1. Consignes permanents :

Dans le cadre de la TPM, ces tâches de niveaux 1 et 2 sont destinées aux opérateurs et concernent des actions de nettoyage et de petites interventions (surveillance, réglages, petits dépannages, etc.) non enregistrés. [MON, 03]

IV.7.1.2. Rondes et fiches de route :

Ce sont aussi des consignes permanentes de « surveillance active » qui concernent les rondiers ou les agents chargés de relever des paramètres dans l’optique de la maintenance conditionnelle. [MON, 03]

IV.7.1.3. Maintenance systématique :

L’échéancier basé sur la méthode ABAC-ABAD établie par les méthodes est traduit en OTP par l’agent d’ordonnancement qui lance les actions préventives chaque semaine (déclenchement automatique à l’aide de la GMAO). Dans le cas où l’unité d’usage choisie est relative au fonctionnement, un relevé périodique de compteur permet une programmation au niveau 3 de l’ I_{ps} . [MON, 03]

IV.7.1.4. Maintenance conditionnelle :

Subordonné à l’état constaté de l’équipement, le déclenchement se fait suivant un OTP sachant que le seuil d’alarme doit être positionné pour laisser un « délai d’ordonnancement ». La date d’intervention présente le caractère fortuit du correctif, mais il n’y a pas, dans ce cas, de DT émise de l’extérieur. [MON, 03]

IV.7.1.5. Révisions périodiques :

Le dossier de préparation des méthodes est décomposé en tâches formant un « projet » géré par une gamme d’ordonnancement. Un seul numéro d’OTP est attribué, un schéma d’enclenchement des phases permettant la programmation par l’ordonnancement. [MON, 03]

IV.7.2. Synthèse des procédures :

En dehors de la GMAO, le modèle industriel fonctionnel le plus commun consiste en un carnet à trois volets DT, BT, OT, portant le même numéro d’identification (figure IV-11).

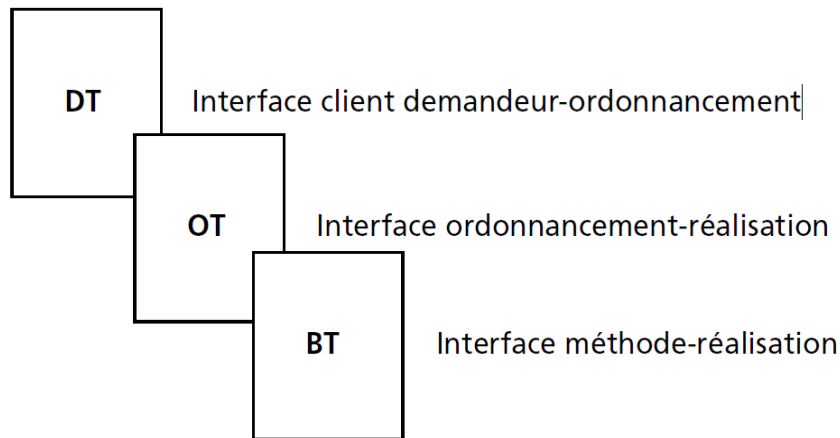


Figure IV-11 Carnet à trois volets.

Afin de simplifier l'ordonnancement, deux autres procédures sont utiles :

- En correctif, des BPT (bons pour petits travaux) ne transitant pas par l'ordonnancement, mais dont le bureau des méthodes garde la trace à fin d'analyse ;
- En préventif, les OTP (Ordre de Travail Préventif).

La figure IV-12 propose la synthèse des procédures. [MON, 03]

Remarques :

D'autres procédures peuvent exister, adaptées à la typologie et à l'échelle du service maintenance. Citons :

- Les procédures de sécurité, de consignation, de permis de feu, etc. ;
- Les DTE (Demandes de Travaux Extérieurs) ;
- Les FIT (Fiche d'Intervention Technique), destinées à l'atelier central ;
- Les DA (Demande d'Approvisionnement) et BSM (Bons de Sortie Magasin).

Rappelons l'objectif général : obtenir une traçabilité complète des activités du terrain pour un poids administratif minimal. [MON, 03]

IV.8. Gamme d'ordonnancement :

Afin de simplifier l'ordonnancement, lorsqu'une opération homogène, de type révision d'un équipement par exemple, est décomposable en phases, le bureau des méthodes réalise une «gamme d'ordonnancement ». L'ordonnancement enregistrera le dossier d'OT sous un seul numéro d'OT. Le dossier d'OT comprendra :

- Le graphe d'enclenchement des phases et les temps prévus pour chaque phase ;
- Les bons de phases, descriptifs du travail à réaliser. **[MON, 03]**

IV.8.1. Schéma d'enclenchement des phases :

Lorsqu'il existe, une *contrainte d'antériorité* du type 20 ne peut commencer que si 10 est achevée, les tâches sont mises en série. Nous dirons que 10 libère 20, ou 20 libère 30 et 40 (figure IV-13). La succession des phases en série détermine le « chemin critique » de la gamme d'ordonnancement, qui sera gérée comme un miniprojet. **[MON, 03]**

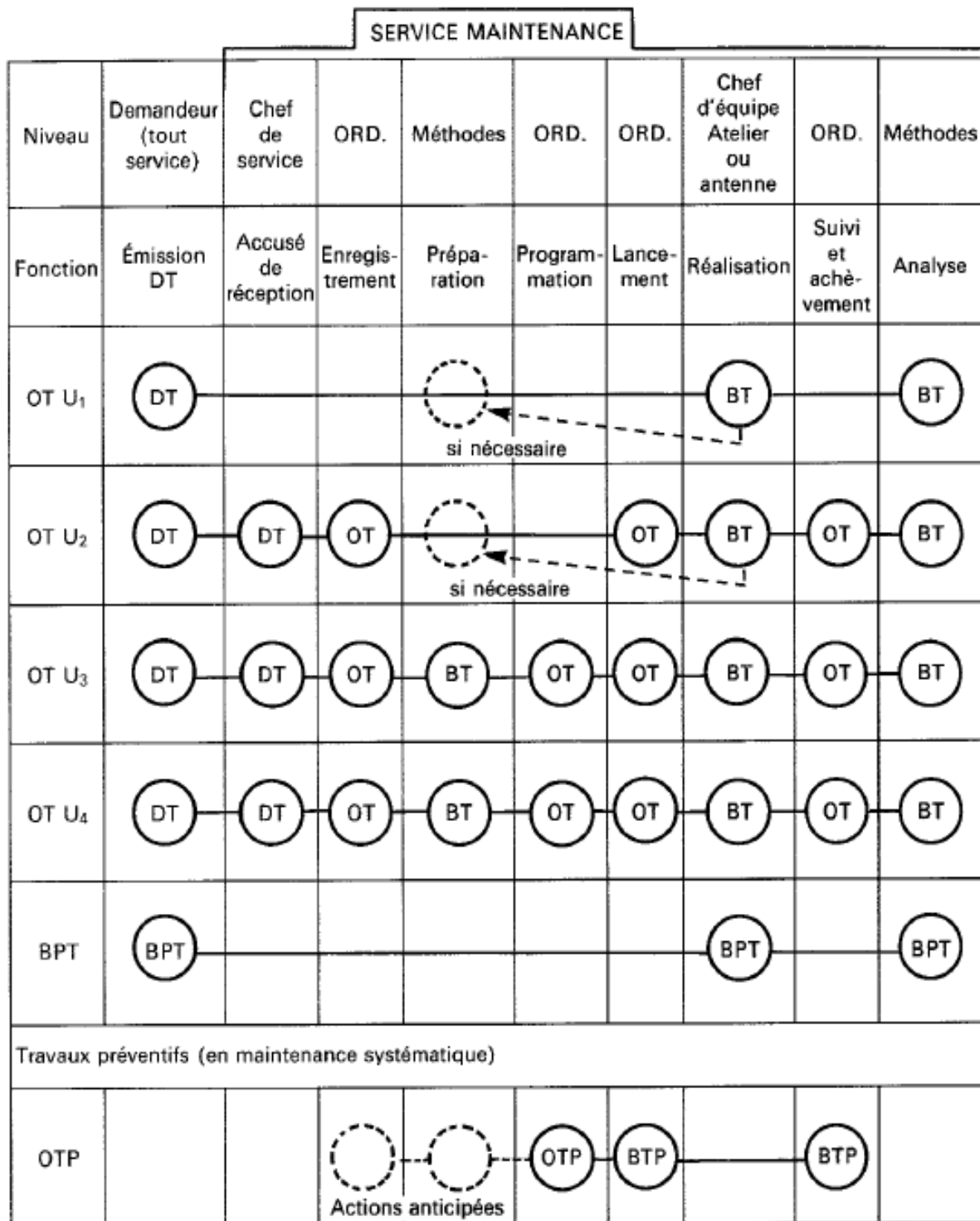


Figure IV-12 Synthèse des procédures.

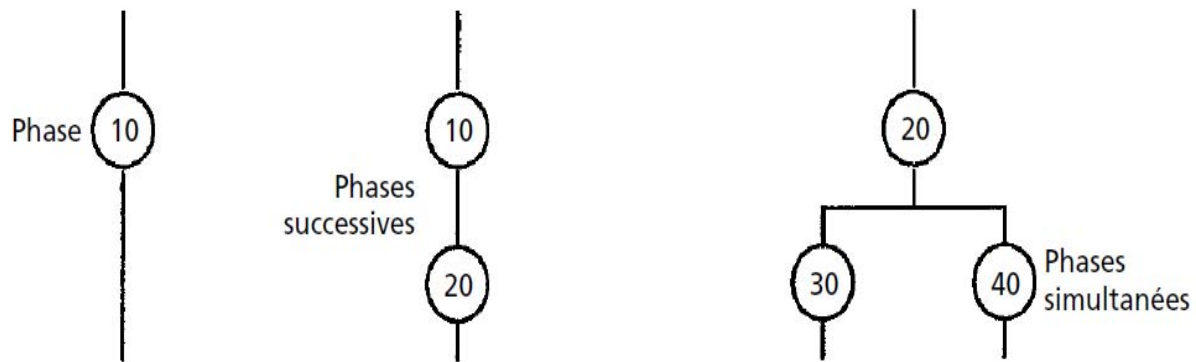


Figure IV-13 Enclenchement des phases.

IV.9. Conclusion :

Des tâches correctement planifiées, bien ordonnancées et communiquées de façon pertinente permettent d'accomplir un travail efficace à un coût moindre. Le travail ainsi préparé génère moins de perturbations, une qualité supérieure, une plus grande satisfaction et une plus grande morale organisationnelle que les tâches effectuées sans préparation correcte.

L'ordonnancement de la maintenance porte spécifiquement sur les tâches préparatoires permettant d'utiliser et d'appliquer efficacement les ressources de maintenance. [NYM et LEV, 10]

Chapitre V

Application

V.1. Introduction :

L'objectif de notre application est d'obtenir un ordonnancement optimisé des activités de la maintenance basée sur la fiabilité des équipements, la plate forme de notre étude est la société de production de matériels de Gerbage et de Manutention GERMAN Ain Smara Constantine.

Après une représentation de la société et ses différents services, on procède à notre étude qui est fondée sur l'historique des équipements pour le calcul des paramètres de fiabilité, et la construction du diagramme PARETO, suivie de la programmation par le logiciel « MATLAB ».

V.2. Présentation de l'entreprise de Matériels de Gerbage et de Manutention (GERMAN) :

GERMAN EPE SPA, Constructeur de chariots élévateurs et fabricant d'organes pour engins roulants.

V.2.1 Historique de GERMAN :

Durant la réalisation de l'usine de chariot, l'ENMTP avait relevé certains problèmes inhérents à cet ouvrage qu'elle devait prendre immédiatement en charge. Parmi ces problèmes nous reprenons si après les plus importants :

- Défaillance du partenaire qui n'a pas été à la hauteur de sa mission et qui n'a pu réaliser que deux produits des quatre prévus.
- Obsolescence de la licence qui n'a permis de réaliser que des produits de qualité moindre.
- Déprime du marche qui s'est traduit par une réduction des quantités contractuelles et donc par excédent de capacité.

En 1991 le bureau d'études ERNEST-YOUNG a procédé à une analyse diagnostique du projet CHARIOT ELEVATEUR pour le compte l'ENMTP.

La conclusion tirée par les experts était que la poursuite de l'activité en conservant dans l'ENMTP le projet chariot élévateur remettrait en cause le plan de restriction et la sérénité de l'entreprise et qu'il fallait de toute urgence :

- Identifier le projet chariot élévateur de manière séparée.
- L'affecter dans une structure juridique indépendante.

Le 23 juillet 1997 est créé par le HPM (Holding de mécanique) une entreprise publique économique sous la forme juridique d'une société par action de 90.000.000 DA de capital dénommée société des matériels de gerbage et manutention par abréviation<<GERMAN>>.

Elle a pour objet la production, le développement et la commercialisation des matériels de Gerbage et de manutention.

GERMAN dispose d'une usine dotée d'un équipement de dernière génération et d'une technologie de pointe, constituée de 214 machines et autres installations à forte densité de production. Sa superficie globale est de 14,5 ha, dont 4 ha sont couverts.

Elle est située à la zone industrielle d'Ain Smara (Constantine), à proximité immédiate (2 km) de l'autoroute Est/Ouest, à 17 km de l'aéroport international Mohamed Boudiaf et à 80 km du port de Skikda.

GERMAN occupe une place géostratégique de premier ordre. Elle est certifiée ISO 9001-2000 depuis le 04 juillet 2006, la transition vers une certification ISO 9001-2008 de son système management qualité est en cours.

V.2.2. Situation géographique de GERMAN :

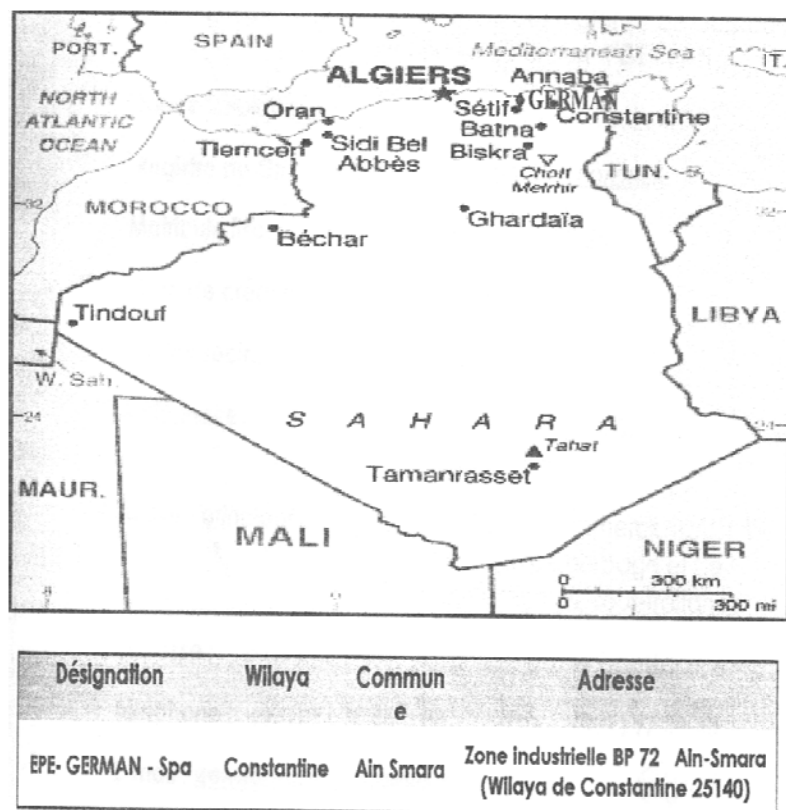


Figure V-1 Situation géographique de GERMAN.

Géographiquement GERMAN se trouve à :

- 15 km de l'aéroport de Constantine.
- 100 km du port de Skikda.
- 120 km de Batna (pôle économique et aéroport).
- 120 km de Sétif (pôle économique et aéroport).
- 150 km du port et de l'aéroport de Jijel.
- 160 km du port et de l'aéroport d'Annaba.
- 230 km du port et de l'aéroport de Bejaia.
- Sur la route nationale n°5, principal axe reliant le centre du pays à l'est.
- Proximité de l'axe autoroutier Est-Ouest (en cours de réalisation).

Dénomination : Entreprise des matériels de Gerbage et de Manutention « GERMAN ».

Forme juridique : EPE/SPA.

Registre de Commerce : 25 / 00 97 B 0062046.

Matricule fiscal : 0997 2510 03593 26.

Date de création : 23 juillet 1997.

Capital social : 90 000 000 DA.

Actionnaire : SGP EQUIPAG pour le compte de trésor.

Activité principale : production et commercialisation de matériels de Gerbage et de Manutention et sous-traitance.

Adresse : zone industrielle Ain Smara 25140 Constantine.

Téléphone : (031) 97 38 85 à 88. **Fax :** (031) 97 38 40.

E-mail : ce.german@yahoo.fr

Site internet : www.german-dz.net

Domiciliation bancaire : BNA « 850 » Filali – Constantine.

Effectif : 259 personnes au 31.12.2009.

V.3. L'objectif tracé par l'entreprise :

Les dirigeants de l'entreprise GERMAN SPA ont tracé un plan de travail qui a pour objectif la sauvegarde des postes de travail déjà existants par le biais d'une production rationnelle et qualitative et le développement de ses produits pour qu'ils deviennent plus compétitifs et essayer de réaliser de nouveaux produits dont la demande est forte dans le marché national.

C'est dans ce cadre qu'une mobilisation collective de l'ensemble du personnel est entamée, ce qui a permis à l'entreprise de faire un grand saut vers l'avenir marqué par le contrat signé avec le partenaire anglais <<BOSS>>.

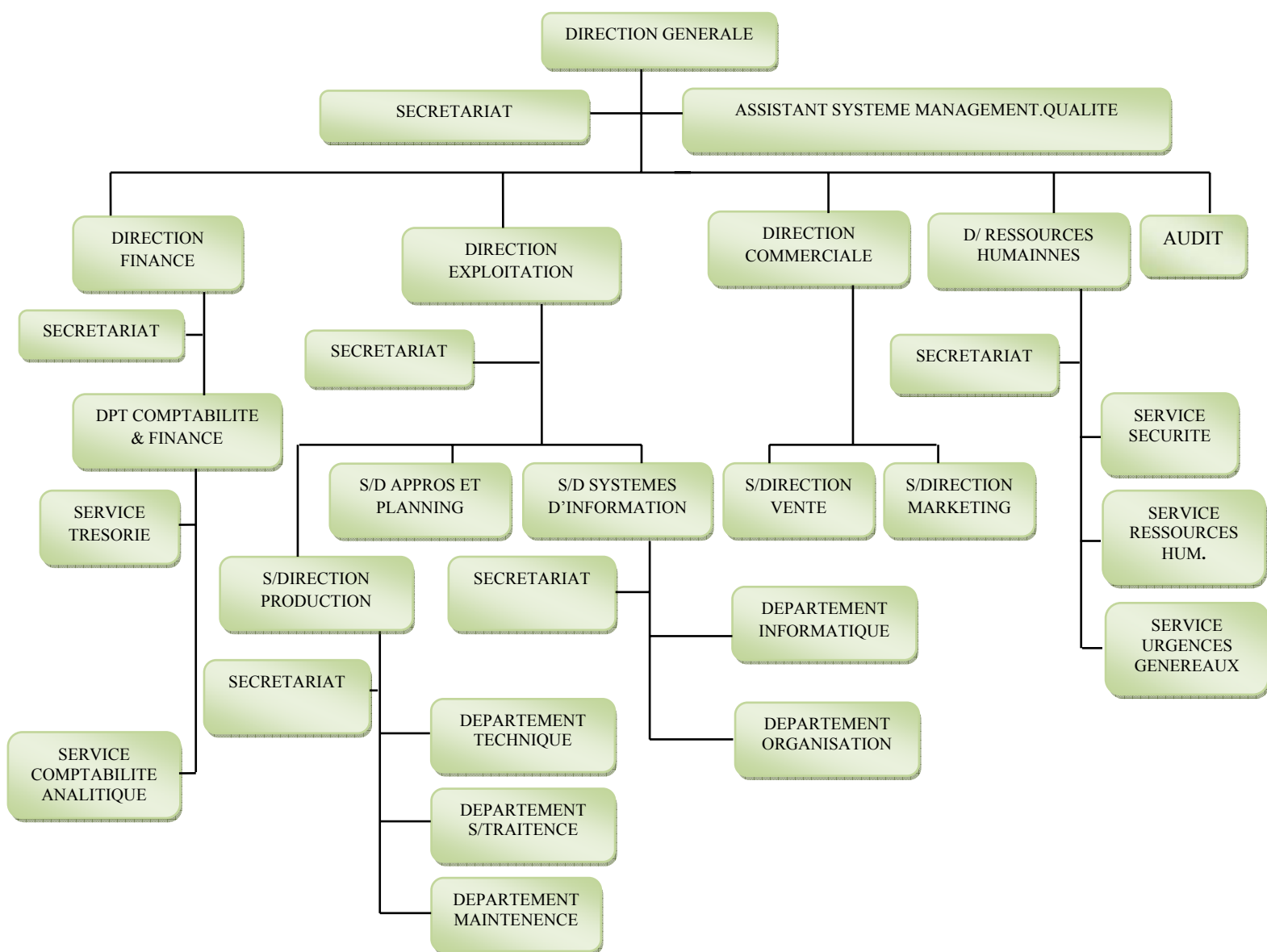


Figure V-2 Organigramme de l'entreprise GERMAN.

V.4. Attribution des tâches :

- Assurer la coordination des différentes directions.
- Elaborer la politique d'investissement de plan de production en relation avec la direction générale (siège).

V.4.1. Direction Générale :

Elle se compose d'un directeur générale, son assistant et une secrétaire.

V.4.2. Direction d'Exploitation :

Dirigée par le directeur d'exploitation et une secrétaire.

V.4.3. Département Organisation d'Informatique (D.O.I) :

Il est chargé de :

- L'information de la gestion de production.
- La maintenance de l'outil informatique.
- La mise en place des procédures d'organisation.
- Elaborer la documentation concernant les codifications de toute opération.
- La programmation et le contrôle opérationnel.

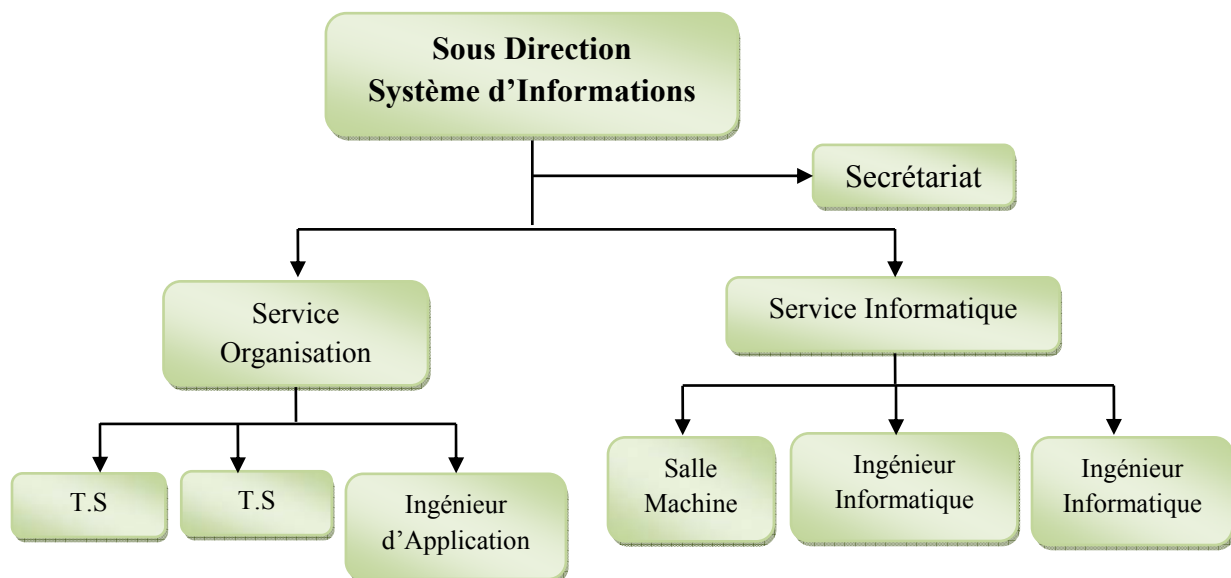


Figure V-3 Organigramme de la Sous Direction Systèmes d'Informations.

V.4.4. Finances:

Est chargé :

- D'élaborer et de suivre le plan de financement.
- D'assurer la comptabilisation des charges et revenus.
- D'établir le bilan financier.

V.4.5. Département Administration Générale (D.A.G) :

- Il s'occupe:
- De la propriété.
- De la coopérative.
- Du transport.
- De la gestion du personnel.
- De la sécurité sociale.

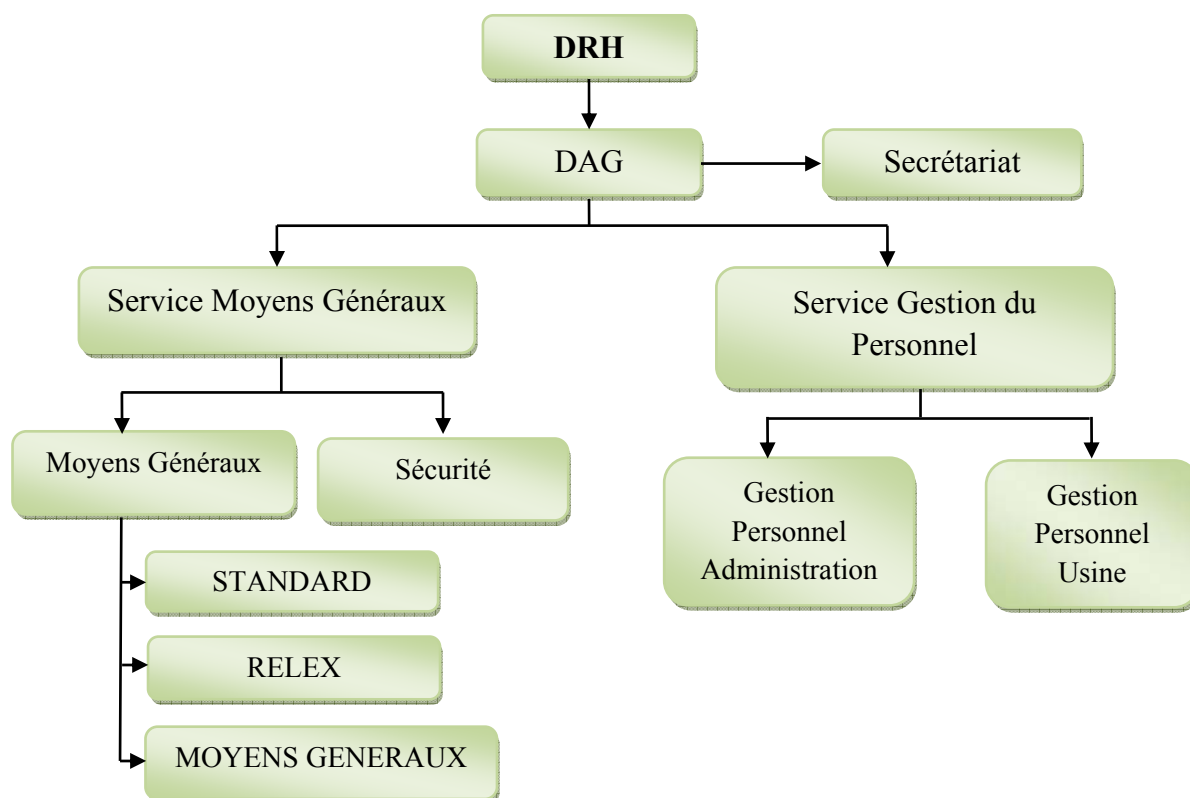


Figure V-4 Organigramme du Service des Ressources Humaines.

V.4.6. Direction Commerciale (D.C) :

Elle consiste à :

- Etablir le plan d'approvisionnement de la matière et pièces de rechanges.
- Etablir le fichier fournisseur.
- Assurer les négociations avec les fournisseurs concernant les approvisionnements.
- Exécuter la politique d'approvisionnement.

V.4.7. Direction Technique / Production :

Consiste à :

- Elaborer les méthodes appropriées pour l'exécution des opérations : le temps, préparation du travail, à travers les ordres de fabrication.
- Assurer le contrôle technique.
- Elaborer le plan à travers les études et le développement du produit.
- Assurer la fabrication des produits.

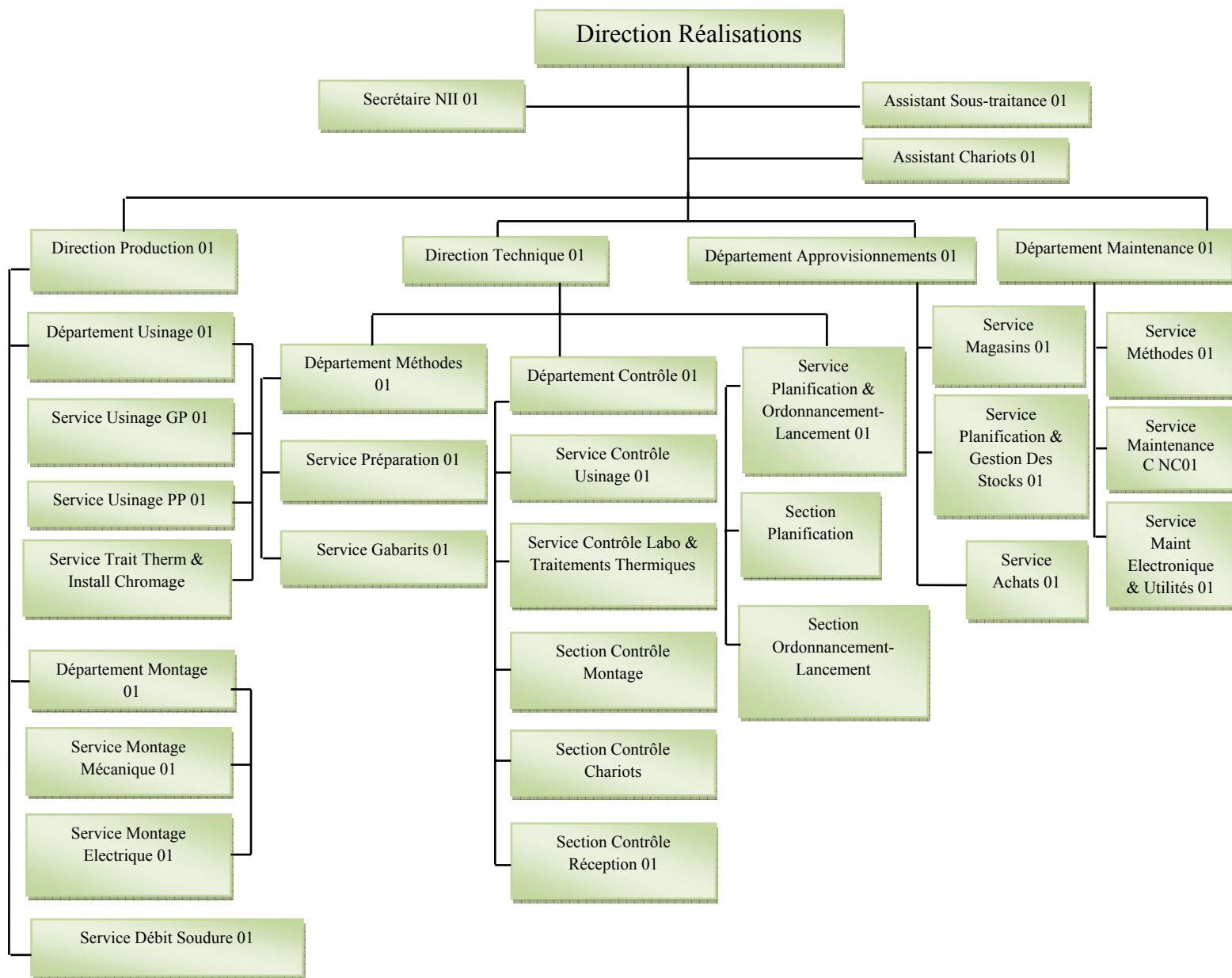


Figure V-5 Organigramme de la Direction Réalisation.

V.5. Partenariat :

A l'effet de remplacer Balkan car, l'entreprise a en juillet 1997 concrétisé une convention de partenariat avec le groupe britannique BOSS.

V.6. Exportation :

Un contrat de 5.3 MDS Dollars a été conclu en septembre 1999 avec la société irakienne KAMADIA. Il est prévu que son exécution se fera au cours de cette année.

Il faut signaler qu'un autre contrat a été négocié, le contrat porte sur un montant de 11.6 MUS Dollars.

V.7. L'effectif de la Sous Direction Production :

L'effectif engagé par la Sous Direction Production est réparti en plusieurs formes :

- CDI (Contrat à Durées Indéterminées) (Permanents) —————> 33 Employés.
- CDD (Contrat à Durées Déterminées) —————> 67 Employés.
- DAIP (Dispositif d'Aide à l'Insertion Professionnelle) / CTA
(Contrat de Travail Aidé)—————> 46 Employés.

Total= 146 Employés.

V.8. Les différents équipements de production de GERMAN :

- Les Machines (CNC)————> à Commande numérique (les machines les plus importantes).
- Les Centres d'Usinage (CNC) : les plus performants.
- Les Machines Conventionnelles : Semi-automatiques (perçage, rectification,...).

V.9. Les différents produits fabriqués par GERMAN :

- Chariot électrique 1,6 T.
- Chariot thermique (DIESEL) 3T.
- Chariot thermique (DIESEL) 4T.
- Chariot thermique (DIESEL) 5T.
- Chariot thermique (DIESEL) 7T.
- Chariot thermique (DIESEL) 10T.
- Chariot thermique (DIESEL) 12T (commande exceptionnelle).
- Les transpalettes.
- + les prestations (sous-traitance) de différents clients (SNVI, ETRAG, EMO, NAFTAL....).

V.9.1. Production CHARIOTS ELEVATEURS tous types année 2010 :

Produits	Production
• CE 130 D (3 tonnes)	29 Chariots
• CE 170 D (7 tonnes)	31 Chariots
• CE 140 D (4 tonnes)	05 Chariots
• CE 150 D (5 tonnes)	05 Chariots
• CE 110 E (1,6 tonnes)	14 Chariots
• CE 1100 E (10 tonnes)	20 Chariots

Une moyenne de 09 Engins par mois.

Tableau V-1 Production CHARIOTS ELEVATEURS année 2010.

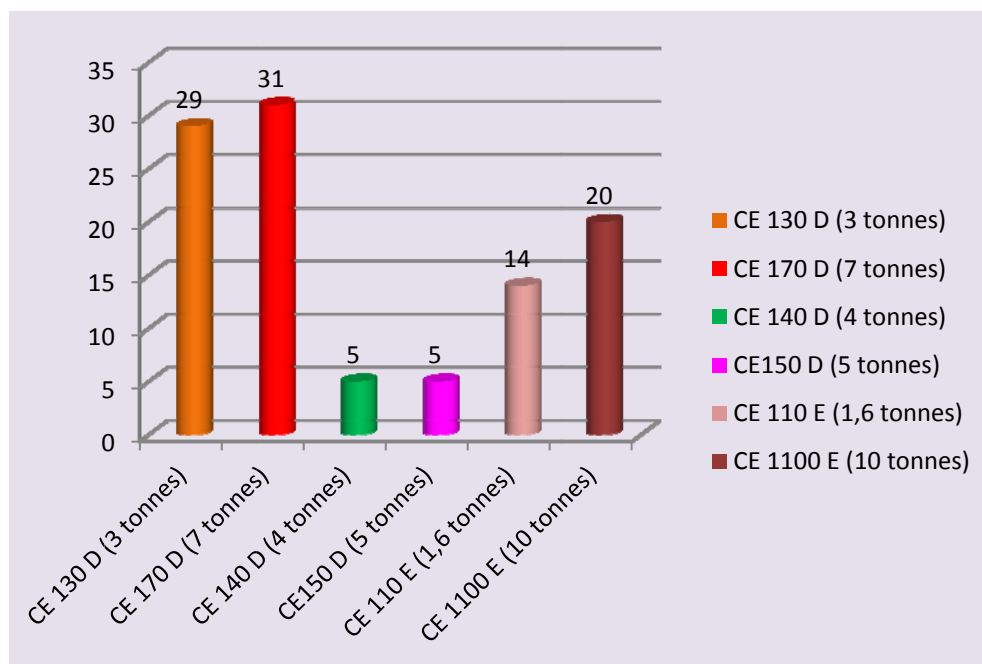


Figure V-6 Production CHARIOTS ELEVATEURS année 2010.

V.9.2. Programme de production 2^{ème} trimestre 2011:

Produits	Objectif annuel	Réalisations	Avril	Mai	Juin	Total 2 ^{ème} trimestre
• CE 1100/1200D	41	--	10	--	10	20
• CE170 D	51	16	6	07	07	20
• CE 150 D	8	01	--	07	--	07
• CE140 D	4	04	--	--	--	--
• CE130 D	32	10	--	15	--	15
• TR 20	180	32	40	40	40	120
S/T/	150	33	20	20	20	60

Tableau V-2 Programme de production 2^{ème} trimestre 2011.

V.10. Origines des approvisionnements :

Le chariot élévateur est composé de pièces fabriquées en usine et pièces achetées.

- **Matière première (pour les pièces fabriquées en usine):** Marché national et étranger.
- **Pièces achetées :** pour les articles disponibles sur le marché national tel que : visserie, rondelles, flexibles, ...), et pour les Organes importants (moteurs) c'est le marché étranger :
 - L'Angleterre (BOSS).
 - L'Italie (les ponts).
 - La France.

V.11. Département Maintenance :

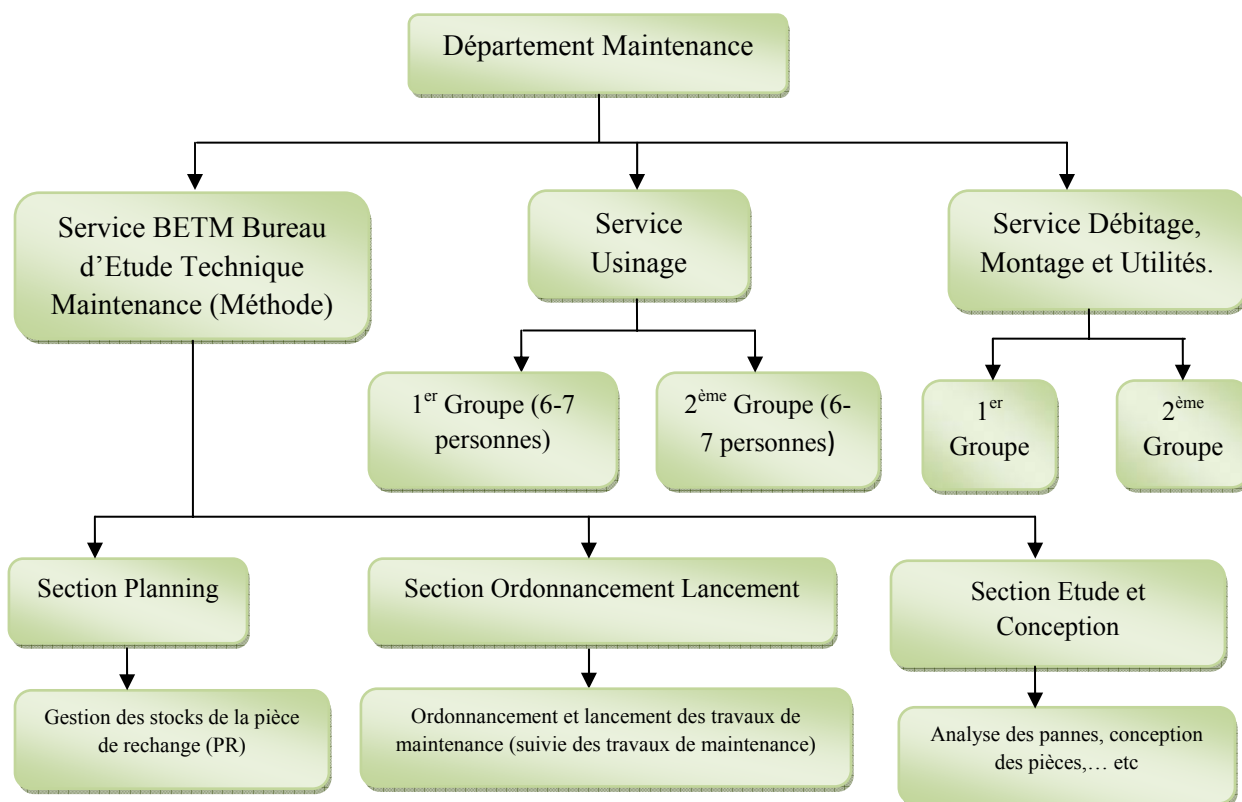


Figure V-7 Organigramme du Département Maintenance.

- **Service Usinage** : entretien des équipements des secteurs usinage (machines à commande numérique).
- **Service Débitage, Montage et Utilités** : entretien des équipements des secteurs débitage, montage et utilités (Gaz, eau, air comprimé, électricité,...etc.) Utile pour la production.

V.12. Les activités du Département Maintenance :

C'est la politique de maintenance appliquée par l'entreprise :

- La maintenance Préventive.
- Maintenance Curative ou Systématique.
- et les Travaux Neufs.

Pour la maintenance préventive : établie suivant un plan donné par le constructeur de la machine (il peut être journalier, hebdomadaire, mensuel, bimensuel, trimestriel, semestriel, ou annuel), ou selon le nombre d'heures que la machine a travaillé.

Pour Les travaux neufs : c'est l'innovation, la mise en service d'un nouveau équipement ou aménagement d'un lieu de travail ou rénovation d'une installation ou équipement.

V.12.1. Les différentes durées de la politique de maintenance :

- **Durée d'intervention:** Procédure de réparation entre l'arrêt de l'équipement et le début de réparation (5min-2jours), dépend de la disponibilité et des compétences des agents de maintenance.
- **Durée du diagnostique:** entre le début d'intervention et la détection de la panne (5min-2jours), dépend de la disponibilité et des compétences des agents de maintenance.
- **Durée de réparation:** entre le début et la fin de réparation (5min-1semaine), dépend de la disponibilité et des compétences des agents de maintenance.
- **Durée de l'immobilisation:** entre arrêt et marche de l'équipement (15min- ?), le paramètre influant sur la durée c'est la disponibilité de la P.R (Pièce de Rechange).

V.12.2. Disponibilité des pièces de rechange :

Selon les équipements dont dispose l'entreprise (80% des équipements sont à commande numérique) nous pouvons dire que la majorité de la pièce de rechange (P.R) est non disponible sur le marché Algérien.

- P.R disponible sur le marché Algérien : 30% (les composants électriques, pneumatiques, hydrauliques,...).
- P.R disponible ou peut être confectionnée (10%-15%).
- P.R spécifique aux constructeurs (60%).

V.12.3. Disponibilité des agents de maintenance:

Ils sont disponibles et selon la durée d'intervention. C'est la section ordonnancement lancement qui gère les travaux de maintenance ; pour une moyenne de 03 à 04 pannes par jour.

V.13. L'effectif du Département Maintenance :

- CDI (Contrat à Durées Indéterminées) (Permanents) —————> 12 Employés.
- CDD (Contrat à Durées Déterminées) —————> 05 Employés.
- DAIP (Dispositif d'Aide à l'Insertion Professionnelle) / CTA
(Contrat de Travail Aidé) —————> 22 Employés.

Total =39 Employés.

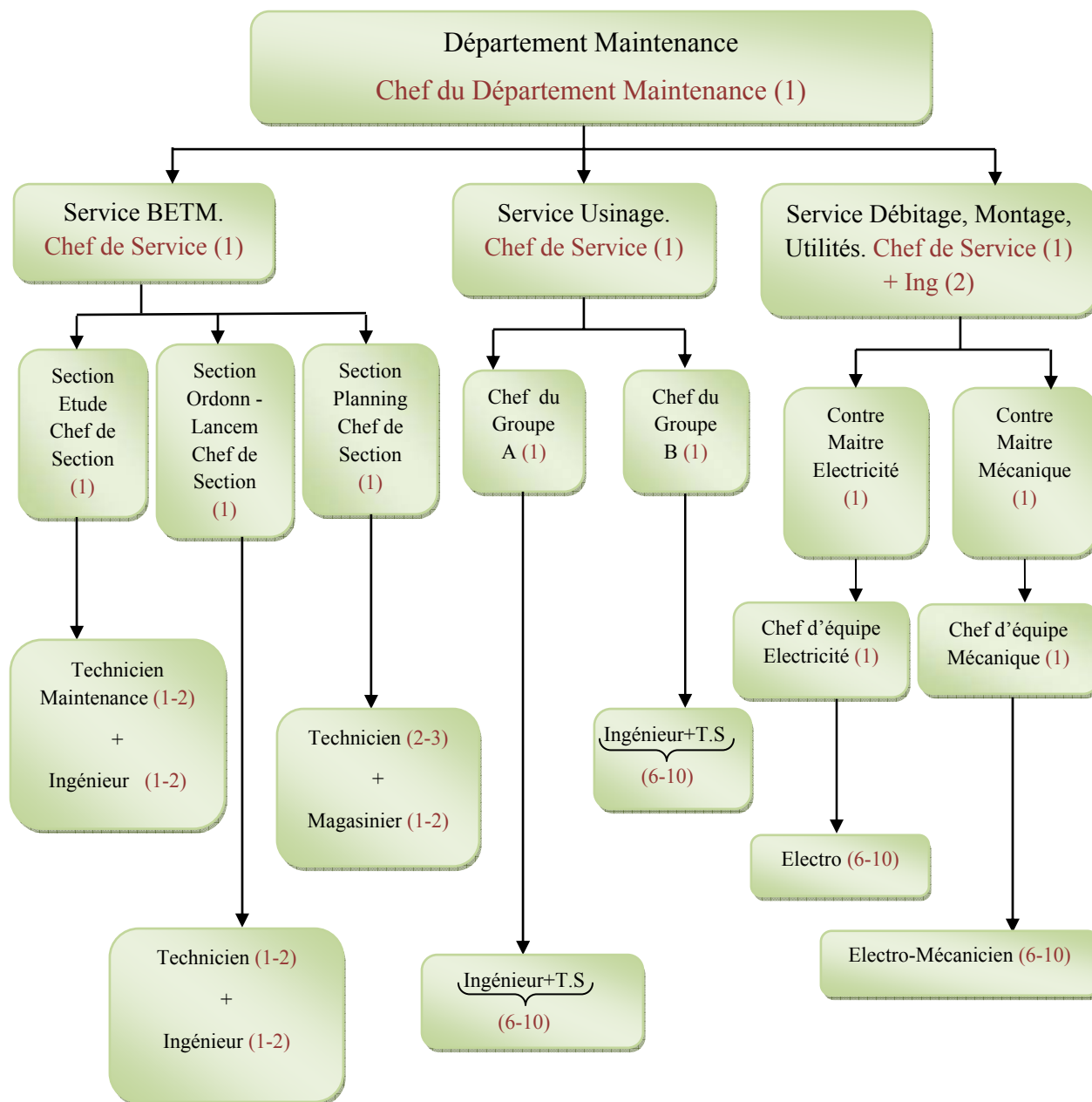


Figure V-8 L'effectif du Département Maintenance.

V.14. Processus de fabrication d'un CHARIOT ELEVATEUR :

Les différentes étapes de fabrication du CHARIOT ELEVATEUR sont les suivantes:

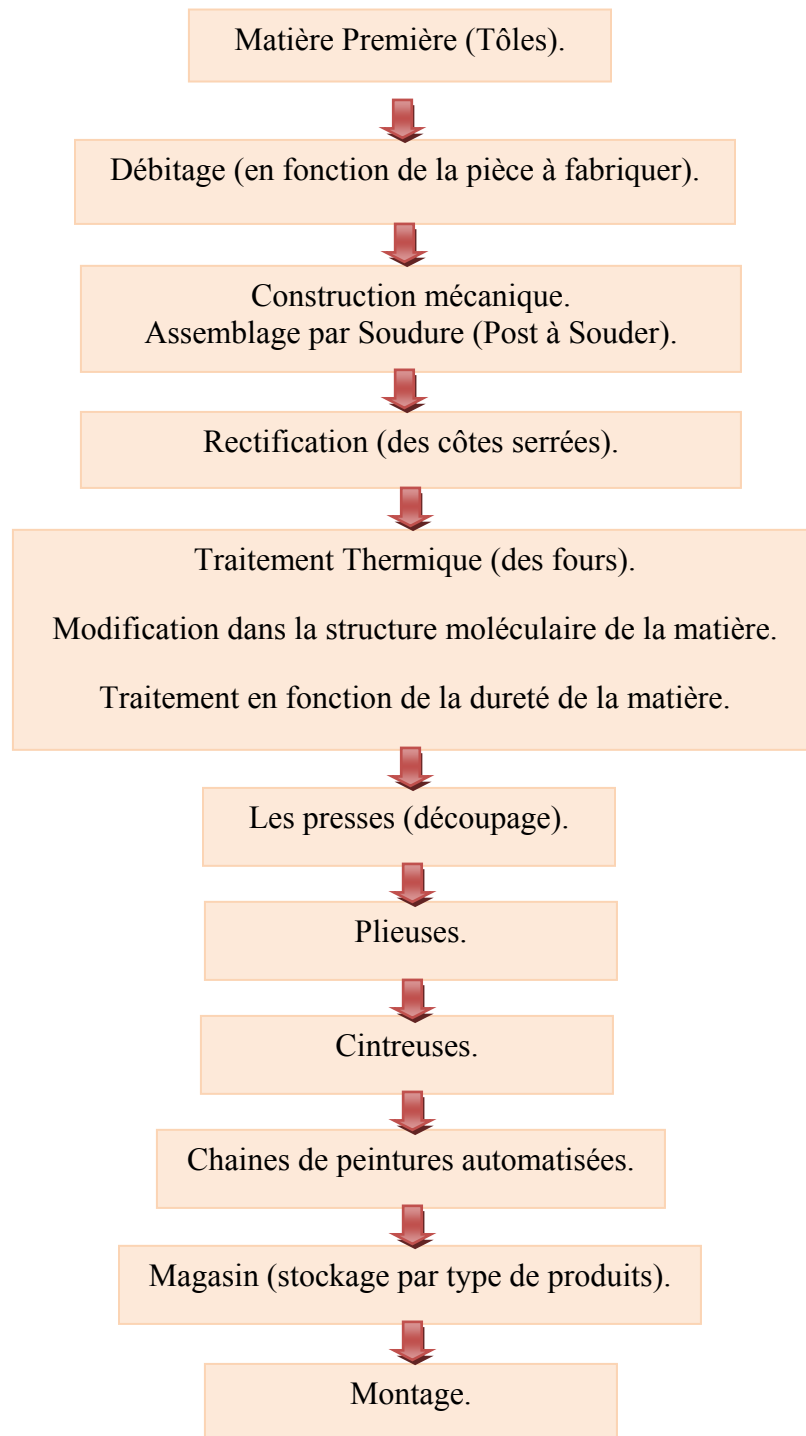


Figure V-9 Le processus de fabrication d'un CHARIOT ELEVATEUR.

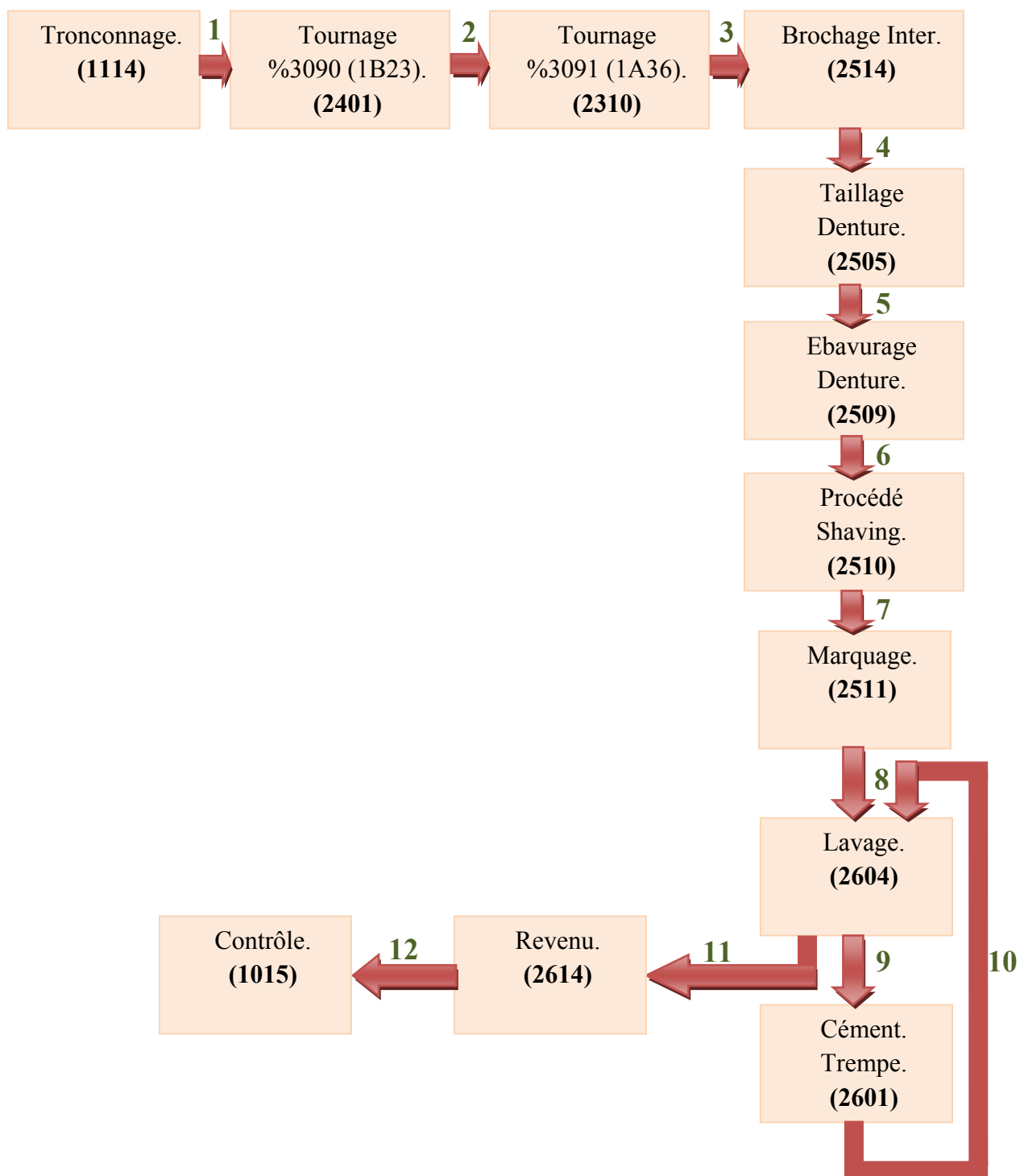
V.15. Codification des machines :

ITEM	Désignation	Date essais à vide
1114	SCIE CIRCULAIRE	19/05/1991
2401	TOUR A 4 AXES POUR TRAVAIL EN MANDRIN.	22/12/1991
2310	TOUR A 2 AXES POUR TRAVAIL EN MANDRIN.	21/03/1992
2514	MACHINE A BROCHER VERTICALE.	17/02/1992
2505	MACHINE A FRAISER LES ENGRENAGES CYLINDRIQUES M = 8.	25/04/1993
2509	MACHINE A BISEAUTER ET CHANFREINER LES ENGRENAGES.	16/06/1992
2510	MACHINE A SHAVER.	04/07/1992
2511	STYLO ELECTRIQUE DE MARQUAGE.	- -
2604	MACHINE DE LAVAGE.	22/02/1992
2601	FOUR A CHAMBRE DE CEMENTATION ET DE TREMPE.	12/04/1992
2614	FOUR DE RECUIT 450°C.	12/04/1992

Tableau V-3 Codification des machines.

Le processus de fabrication du Chariot élévateur est composé de plusieurs sous-processus, sa structure est l'assemblage de plusieurs pièces, et chacune d'elle dispose de son propre processus.

Compte tenu de l'importance de la fonction de la pièce « Roue Dentée » dans le chariot élévateur et vu la variété des opérations qu'elle subit, ajouter à cela les problèmes d'ordonnancement de la maintenance, cette pièce a été choisie pour notre étude.

V.16. Processus de fabrication de la Roue Dentée :**Figure V-10 Le processus de fabrication de la ROUE DENTÉE.**

V.17. Calcul des paramètres de fiabilité (MTBF, MTTR, D, μ et λ) :

L'introduction de la Maintenance Basée sur la Fiabilité pour l'ordonnancement et l'optimisation des tâches de maintenance nécessite un calcul des paramètres de fiabilité à savoir (MTBF, MTTR, D, μ et λ) et ceci pour nous permettre de tirer des conclusions sur la fiabilité des équipements étudiés.

- **MTBF (Mean Time Between Failures)** : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

$$MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n BF_i$$

- **MTTR (Mean Time To Restoration)**: Moyenne des Temps des Tâches de Réparation.

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$$

- **D** : Le Taux de Disponibilité.

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

- **μ** : Taux de Réparation.

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

- **λ** : Taux de Défaillances.

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

Les calculs ont été faits sur la base de l'historique de chaque équipement depuis sa mise en service jusqu'à la période de notre stage.

Après calcul on obtient le tableau ci-dessous qui résume les différents paramètres de fiabilité de chaque équipement entrant dans le processus de fabrication de la pièce Roue Dentée.

Machine	MTBF	MTTR	D	μ	λ
2604	48.18	07.28	0.869	0.137	0.021
2614	70.22	09.62	0.880	0.104	0.014
2505	40.78	04.85	0.894	0.206	0.025
2514	39.86	05.64	0.876	0.177	0.025
2510	45.35	04.48	0.910	0.223	0.022
2509	73.97	09.13	0.890	0.110	0.014
2601	67.48	09.26	0.879	0.108	0.015
2401	91.29	13.63	0.870	0.073	0.011
1114	46.82	07.58	0.861	0.132	0.021
2310	43.27	05.82	0.881	0.172	0.023

Tableau V-4 Calcul des paramètres MTBF, MTTR, D, μ et λ .

Après calcul des paramètres de fiabilité (MTBF, MTTR, D, μ et λ) et leur mise en évidence nous remarquons que les machines 2505, 2514 et 2310 représentent un goulot d'étranglement dans le processus de fabrication de la Roue Dentée, car d'une part leurs moyennes des temps de bon fonctionnement (MTBF) sont relativement faibles par rapport aux autres machines et d'autre part leurs moyennes des temps de réparation (MTTR) sont aussi faibles ce qui facilite une intervention rapide.

L'intervention en priorité sur ces dernières nous permet de gagner un temps très important et aussi de remettre rapidement l'équipement en service, d'où une amélioration de la disponibilité.

V.18. Diagramme de PARETO :

Une analyse par le diagramme de PARETO nous permettra de déterminer les équipements névralgiques.

Machines	MTBF	MTTR	%MTTR	Nbre Ma	%cum MTTR
2401	91.29	13.63	17.63	10	17.63
2614	70.22	09.62	12.45	20	30.08
2601	67.48	09.26	11.98	30	42.06
2509	73.97	09.13	11.81	40	53.88
1114	46.82	07.58	09.81	50	63.68
2604	48.18	07.28	09.42	60	73.10
2310	43.27	05.82	07.53	70	80.63
2514	39.86	05.64	07.30	80	87.93
2505	40.78	04.85	06.28	90	94.20
2510	45.35	04.48	05.80	100	100.00
			$\Sigma = 77.29$		

Tableau V-5 calcul des paramètres du diagramme de PARETO.

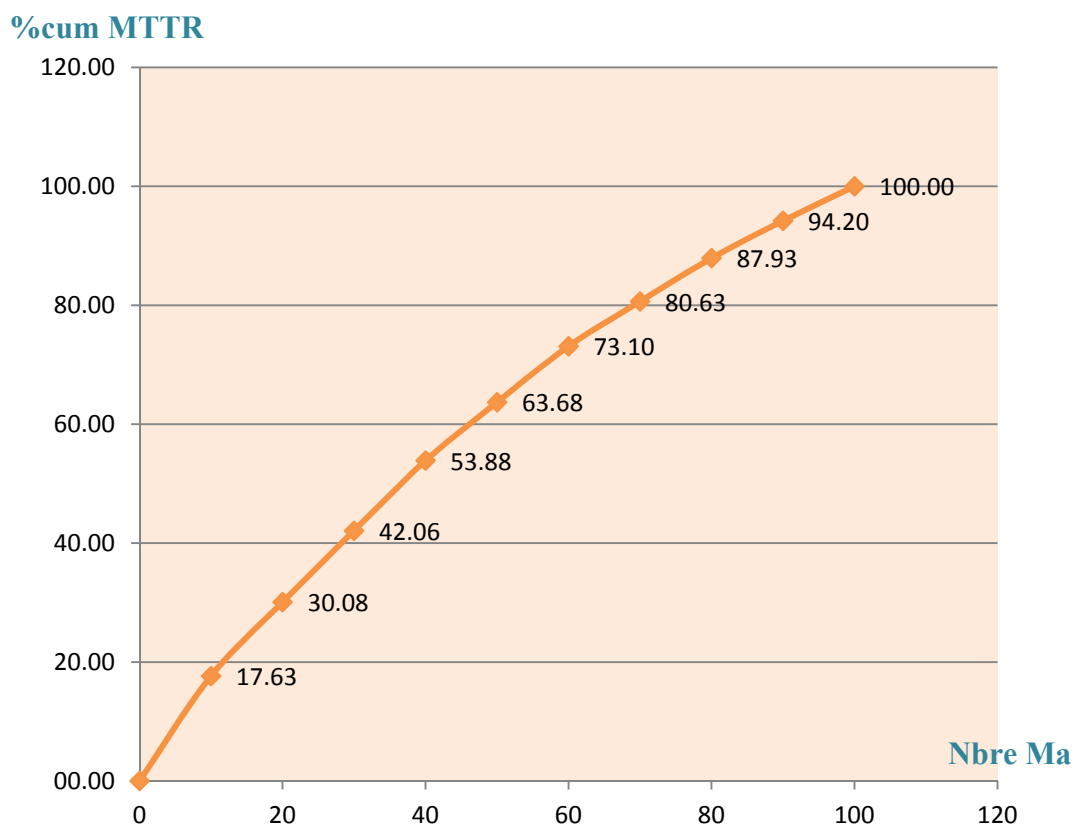
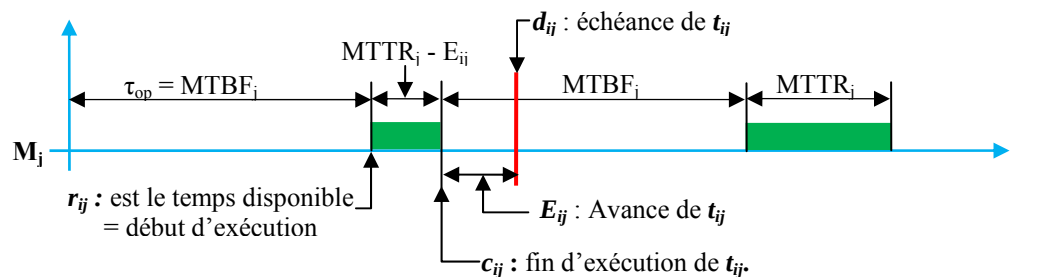


Figure V-11 Diagramme de PARETO.

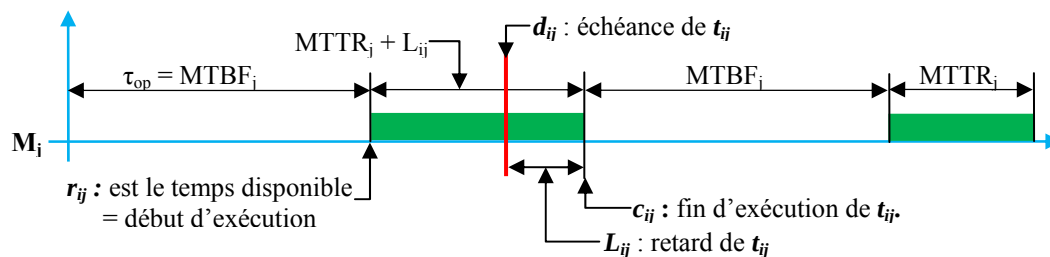
Après analyse du diagramme PARETO nous constatons que les trois premières machines représentent 42% du temps de réparation et compte tenu de leurs faibles MTTR relativement aux autres machines, ces 3 machines ont fait l'objet d'une priorité dans le cadre des opérations de maintenance.

V.19. Les hypothèses de travail :

- Une équipe de maintenance pluridisciplinaire (cas de notre application).
- On a un ensemble de machines.
- L'intervention s'effectue machine par machine.
- Après le calcul des paramètres MTBF et MTTR, on opte pour le principe First In First Out, c'est-à-dire la première machine qui tombe en panne est soumise à la maintenance.
- Ensuite on fait un classement pour la MTBF de la plus petite valeur à la plus grande.
- Vu que la valeur de la MTBF représente une moyenne, et sachant que le temps entre 2 défaillances successives n'est pas constant, d'où il est intéressant d'optimiser le retard ou l'avance de l'exécution de la tâche de maintenance préventive (figure V-12).



(a)



(b)

Figure V-12 Planification des tâches de maintenance (a) une avance et (b) un retard.

Machine	MTBF(j)	MTTR(j)	r(j)	p(j)	d(j)	λ	μ	D
2604	48.18	07.28	48.18	07.28	55.46	0.021	0.137	0.869
2614	70.22	09.62	70.22	09.62	79.84	0.014	0.104	0.880
2505	40.78	04.85	40.78	04.85	45.63	0.025	0.206	0.894
2514	39.86	05.64	39.86	05.64	45.50	0.025	0.177	0.876
2510	45.35	04.48	45.35	04.48	49.83	0.022	0.223	0.910
2509	73.97	09.13	73.97	09.13	83.10	0.014	0.110	0.890
2601	67.48	09.26	67.48	09.26	76.74	0.015	0.108	0.879
2401	91.29	13.63	91.29	13.63	104.92	0.011	0.073	0.870
1114	46.82	07.58	46.82	07.58	54.40	0.021	0.132	0.861
2310	43.27	05.82	43.27	05.82	49.09	0.023	0.172	0.881

Tableau V-6 Planification des tâches de maintenance.

- **r(j)** : temps du début d'exécution = MTBF (j).
- **p(j)** = MTTR.
- **d(j)** : échéance de $t_{ij} = \text{MTBF} + \text{MTTR}$.

On remarque l'apparition des conflits et la superposition des tâches de maintenance, et pour gérer ces conflits on retarde les tâches qui apparaissent en 2ème ou en 3ème ... position.

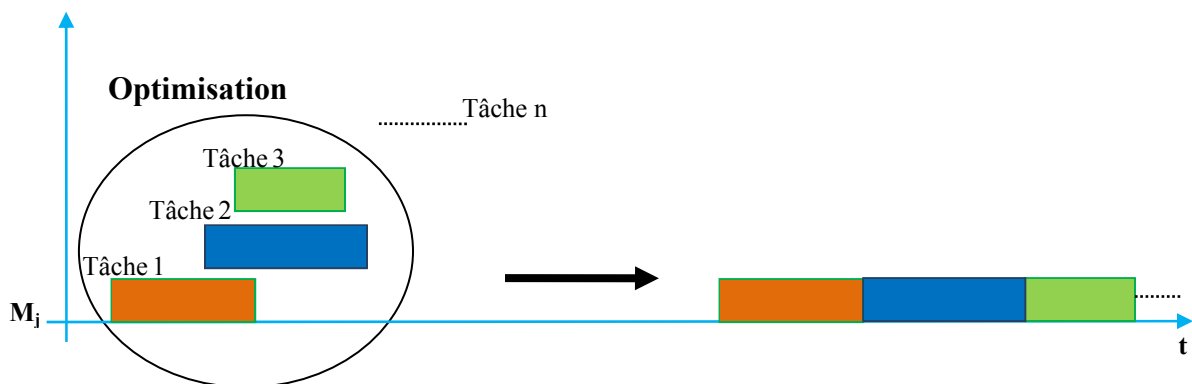


Figure V- 13 Exemple de représentation des conflits.

V.20. Programmation par MATLAB :

Pour représenter les conflits et par la suite l'ordonnancement des tâches de maintenance, on a utilisé le logiciel « MATLAB » (figures V-14 et V-15).

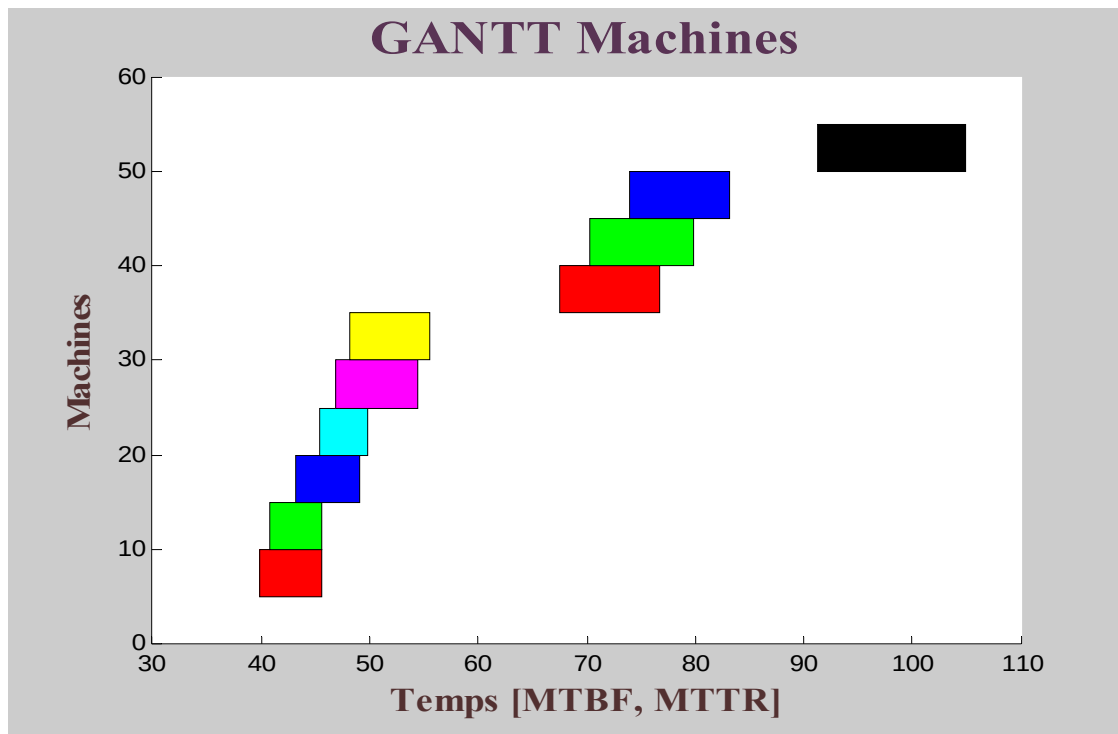


Figure V- 14 GANTT Machines.

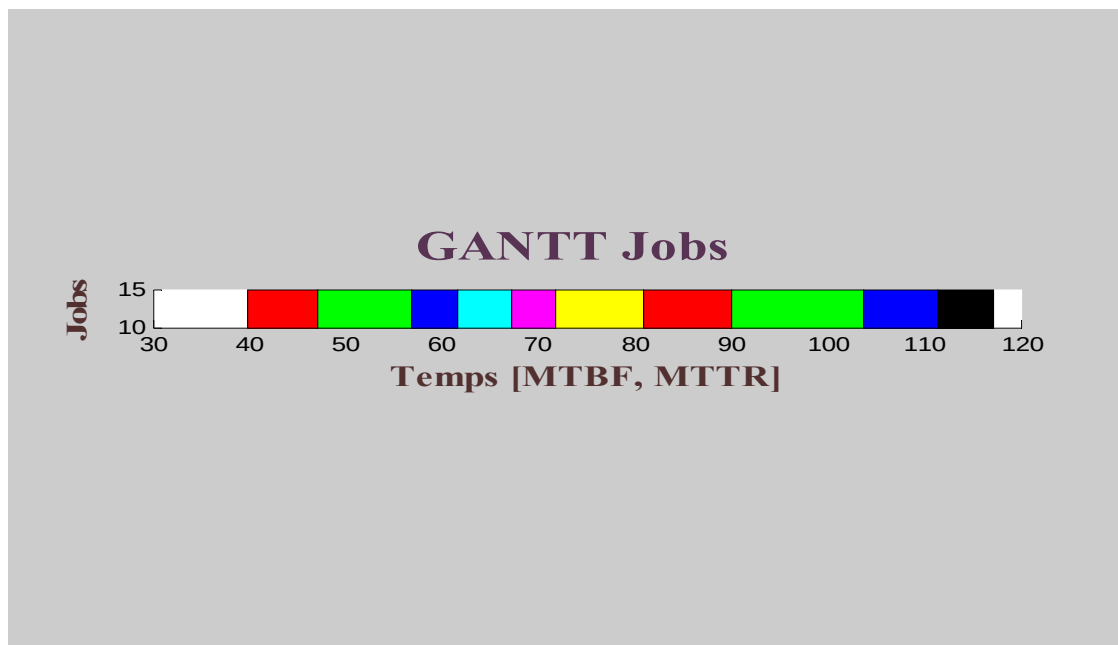


Figure V-15 GANTT Jobs.

La programmation par ce logiciel nous a permis de gérer et trouver les solutions des conflits et d'obtenir un ordonnancement optimisé des tâches de maintenance en fonction de la fiabilité des équipements, ainsi que les écarts (c'est-à-dire si on a un retard ou une avance dans l'exécution des tâches de maintenance).

V.21. Les résultats :

Tâches	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Ecart	0	-4.72	-2.36	-3.74	-3.01	-6.22	-12.02	-6.52	-5.87	8.19

Tableau V-7 Résultats des écarts.

On remarque que le retard est minimisé.

V.22. Conclusion :

Dans ce chapitre, et dans un premier temps nous avons procédé au calcul des différents paramètres de fiabilité (MTBF, MTTR, D, μ et λ), dans un deuxième temps, on a utilisé le diagramme de PARETO, ce qui nous a permis de définir les équipements névralgiques dans le processus de fabrication de la Roue Dentée, pour terminer le chapitre par la programmation par « MATLAB » de l'ordonnancement des opérations de maintenance tout en minimisant le temps d'intervention et la gestion des conflits rencontrés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans le contexte de mondialisation actuel, caractérisé par une concurrence féroce les entreprises doivent être de plus en plus compétitives. Le fonctionnement des moyens de production étant très sophistiqué, il est nécessaire de trouver d'autres leviers d'amélioration. Les services de maintenance interviennent pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements. Ces services sont composés de ressources humaines qui existent en quantité limitée et des moyens matériels qui ne répondent pas toujours à leur mission qui est le suivi, la remise en état et l'amélioration de la disponibilité des équipements de production. L'affectation et l'ordonnancement des tâches de maintenance représentent donc un moyen d'action directe sur la performance des entreprises.

Les problèmes de l'ordonnancement sont présents dans tous les secteurs de l'économie et constituent, une fonction importante en gestion de la maintenance. Un problème de l'ordonnancement consiste à allouer dans le temps les tâches à des ressources, tout en satisfaisant un ensemble de contraintes.

Dans un environnement international à forte connotation, TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), nous permet à l'heure actuelle de mettre en place des techniques innovantes de gestion de la maintenance. Cet environnement technologique donne aux entreprises un atout majeur pour la planification et l'ordonnancement des tâches de maintenance dans des délais étudiés, tout en tenant compte d'un certain nombre de contraintes de l'entreprise.

Le contexte de notre travail concerne l'ordonnancement des activités de la maintenance dans une entreprise de production des équipements de Gerbage et de Manutention GERMAN (chariots élévateurs), basée sur la fiabilité de l'équipement concerné.

Après avoir effectué une étude détaillée sur l'historique des défaillances subies par les équipements de cette entreprise, notre étude s'est étalée sur une période qui a pour origine la

date de mise en service de chaque équipement, ce qui nous a permis de déterminer leurs paramètres de fiabilité (MTBF, MTTR ...).

Le travail cité ci-dessus nous a servi de base pour l'introduction de l'outil diagramme de PARETO, dans le but de faire une sélection des équipements névralgiques dans la chaîne de production en fonction de leurs MTBF et MTTR. Ce qui nous a permis de mettre sur pied un programme souple et convivial pour gérer l'ordonnancement des tâches de la maintenance selon le principe First In First Out.

Les résultats obtenus (présentés) selon notre démarche sont acceptables pour l'ordonnancement des tâches de maintenance prévisionnelle et curative. Et peuvent aider l'entreprise à organiser ces moyens humains et matériels pour une utilisation rationnelle.

Dans nos perspectives nous nous intéressons à la l'ordonnancement des tâches de maintenance en temps réel et sous contraintes. Aussi intégrer les problèmes liés à la production pour répondre à la demande des clients.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[BEN, 06] L. BENALI, « Maintenance Industrielle », Office des Publications Universitaires 09-2006.

[BOI et HAZ, 87] Daniel BOITEL et Claude HAZARD, « Guide de la maintenance », Edition NATHAN, 1987.

[BOU, 91] D. BOUCON, « Ordonnancement d'atelier : Aide au choix des règles de priorité », Thèse de Doctorat en Automatique, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Avril 1991.

[CAR et al, 01] Benoît CART, Valérie GOSSEAUME, Françoise KOGUT-KUBIAK et Marie-Hélène TOUTIN, Publications « Céreq », Centre d'études et de recherches sur les qualifications, Avril 2001.

[DES, 04] Antoine DESPUJOLS, « Approche fonctionnelle de la maintenance », revue technique de l'ingénieur, Octobre 2004.

[DES, 05] Antoine DESPUJOLS, « Approche fonctionnelle de la maintenance », revue technique de l'ingénieur, 2005.

[DUB et PRA, 87] D. Dubois, H. Prade, « *Théorie de possibilités, Applications à la représentation des connaissances en informatique* », Masson, 1987.

[ERS, 76] J. ERSCHLER, « Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement », Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier, 1976.

[ESQ et LOP, 99] P. ESQUIROL et P. LOPEZ, « *L'ordonnancement* », Economica, 1999.

[FER et al, 00] W. FERRELL, J. SALE, J. SAMS, M. YELLAMRAJU, « Evaluating simple scheduling rules in a mixed shop environment », Computers and Industrial Engineering, vol n°38, 2000, pp. 39-66.

- [FOX, 83]** M.S. FOX, « Constraint-directed search: a case study in job shop scheduling», Ph. D. Thesis, Carnegie Mellon University, 1983.
- [GOT, 93]** Groupe d'Ordonnancement THéorique et Appliqué, «Les problèmes d'ordonnancement», R.A.I.R.O. Recherche opérationnelle/Operational Research, vol.27, n°1, 1993, pp. 77-150.
- [HAR, 03]** Youssef HARRATH, « Contribution à l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance: Applications au cas d'un JOB SHOP», Thèse de Docteur de l'université de FRANCHE-COMTE en Automatique et Informatique, 2003.
- [HOL et RAJ, 00]** O. HOLTHAUS, C. RAJENDRAN, «Efficient job shop dispatching rules: further developments», Production Planning and Control, vol.11, n°2, 2000, pp. 171-178.
- [LET, 01]** Agnès LETOUZEY, « Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs», Thèse de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2001.
- [LOP et al, 92]** P. LOPEZ, J. ERSCHLER, P. ESQUIROL, «Ordonnancement de tâches sous contraintes : une approche énergétique», Revue d'Automatique, Productique, Informatique Industrielle, vol.26, n°56, 1992, pp. 453-481.
- [MAC et LIU, 93]** B.L. MACCARTHY, J. LIU, «Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling», International Journal of Production research, vol.31, n°1, 1993, pp. 59-79.
- [MON, 00]** François MONCHY, « Maintenance : Méthodes et organisation», Édition DUNOD, 2000.
- [MON, 03]** François MONCHY, « Maintenance : Méthodes et organisation», 2^{ème} édition, Édition DUNOD, 2003.
- [MON et VAN, 90]** M. MONTAZERI et L.N. VANWASSENHOVE, «Analysis of scheduling rules for an FMS», International Journal of Production Research, vol.28, n°4, 1990, pp. 785-802.

[NYM et LEV, 10] Don NYMAN et Joel LEVITT, «Maintenance Planning, coordination & Scheduling», Industrial press, June 2010.

[PAN et ISK, 77] S.S. PANWALKER et W. ISKANDER, « A survey of scheduling rules », Operations Research, vol.9, 1977, pp. 45-61.

[PIE et MEB, 97] H. PIERREVAL, N. MEBARKI, «Dynamic selection of dispatching rules for manufacturing systems scheduling», International Journal of Production Research, vol.35, n°6, 1997, pp. 1575-1591.

[RIC et al, 96] Daniel RICHET, Marc GABRIEL, Denis MALON et Gaëtan BLAISON, «Maintenance Basée sur la Fiabilité, un outil pour la certification», Édition MASSON, 1996.

[SCH et DEC, 97] E. SCHWALB et R. DECHTER, «Processing disjunctions in temporal constraint networks», Artificial Intelligence, vol., n°93, 1997, pp. 29-61.

[SIM, 77] H.A. SIMON, *The new science of management decision*, Prentice-Hall, 1977.

[ZWI, 95] Gilles ZWINGELSTEIN, « Diagnostic des défaillances», Édition HERMES, 1995.