

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

UNIVERSITE HADJ LAKHDAR BATNA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département de Génie Industriel

MEMOIRE

*Présenté au*

**Laboratoire d'Automatique et Productique**

En vue de l'obtention du diplôme de

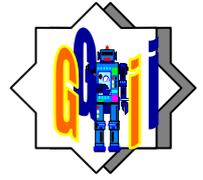
**MAGISTER**

Spécialité: *Génie Industriel*

Par

**MAACHE Younes**

*Ingénieur d'état en informatique*



---

Aide à la décision d'ordonnancement inter-entreprises dans le  
cadre des travaux de la maintenance

**Cas : Société de Maintenance de l'Est (SME)**  
Hama Bouzienne –CONSTANTINE

---

*Directeur du mémoire : Dr : H SMADI*

Soutenu le : 28/04/2011, devant le jury composé de:

<i>Dr : M.D. MOUSS</i>	<i>MC</i>	<i>Université de Batna</i>	<i>Président</i>
<i>Dr : H SMADI</i>	<i>MC</i>	<i>Université de Batna</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Dr : N.K. MOUSS</i>	<i>MC</i>	<i>Université de Batna</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr : A.DHIB</i>	<i>MC</i>	<i>Université d'Oum-el-Bouaghi</i>	<i>Examineur</i>

*Année universitaire 2010-2011*

*À la mémoire de mes parents,  
À ma femme,  
À ma fille Selsabil,*

*Avec Tendresse,  
Qu'ils m'excusent pour tout le temps que j'ai consacré à ce  
mémoire et que je leurs ai volé*

# Remerciement

*Je tiens à remercier, tout d'abord: Dr. M. D. MOUSS, Dr. K. N. MOUSS, et Dr. A. D. B pour nous avoir fait l'honneur d'être membres du jury. Ainsi que pour avoir consacré une partie de leur temps précieux pour lire et apporter leur avis sur ce mémoire.*

*Je souhaite remercier Dr H. SMADI pour avoir accepté de me suivre dans l'élaboration de ce mémoire. Je suis particulièrement reconnaissant de son aide, et ses suggestions qui ont amélioré ce travail.*

*Je remercie également toute l'équipe du LAP (Laboratoire d'Automatique et Productique) de l'université de Batna.*

*Je remercie tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à tout le monde.*

---

# **SOMMAIRE**

---

---

# Tables des Matières

---

Tables des Matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Liste des algorithmes.....	vii
Introduction générale.....	01

## **CHAPITRE I.**

<b>Aide à la décision.....</b>	
1.1 Introduction.....	03
1.2 Processus de décision et aide à la décision.....	03
1.2.1 Processus de décision .....	03
1.2.2 Décision et Aide à la décision.....	04
1.2.2.1 La décision .....	04
1.2.2.2 Aide à la décision .....	04
1.3 Présentation des S.I.A.D .....	05
1.3.1 Définition .....	05
1.3.2 La signification des mots clés selon [Checroun ,92] .....	05
1.3.3 Pourquoi un S.I.A.D ?.....	06
1.3.4 Les fonctions d'un SIAD .....	07
1.3.5 Les principaux modules d'un SIAD et leur architecture .....	07
1.3.5.1 le module de dialogue .....	08
1.3.5.2 le module base de données .....	09
1.3.5.3 le module base de modèles .....	09
1.3.6 Les différents types d'architecture.....	10
1.3.6.1 Architecture en réseau .....	10
1.3.6.2 Architecture centralisée .....	11
1.3.6.3 Architecture hiérarchisée .....	12
1.3.7 Spécification du problème et approche de solution (Formulation du problème).....	13
1.3.8 Les critères de décision .....	15
1.3.9 Architecture du SIAD proposée pour la génération du planning des interventions....	15
1. Niveau interface.....	17
2. Niveau de traitement .....	17
3. Niveau de données .....	17
1.4 Conclusions.....	18

## **CHAPITRE II.**

<b>La fiabilité et la maintenance.....</b>	
2.1 Introduction .....	19
2.2 Evolution de la maintenance.....	19
2.3 La fiabilité .....	21
2.3.1 La notion de la fiabilité.....	21
2.3.2 Taux de défaillance.....	21
2.3.2 Les lois de la fiabilité .....	22
2.4 La maintenance.....	23
2.4.1 la notion de la maintenance.....	23
2.4.2 les différents types de maintenance .....	23
2.4.2.1 Maintenance corrective .....	23

2.4.2.2	Maintenance préventive .....	23
2.4.2.2.1	Les objectifs visés par la maintenance préventive .....	24
2.4.2.2.2	Les différents types de maintenance préventive .....	25
2.5	Le système d'information et de mesure .....	27
2.5.1	Informations externes sur les équipements de l'entreprise.....	27
2.5.2	Informations internes utiles pour la maintenance.....	27
2.6	Le système de gestion de la maintenance .....	28
2.7	La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) .....	29
2.7.1	Les différents modules de la GMAO .....	29
2.8	les nouvelles approches de la maintenance .....	30
2.8.1	La Maintenance Productive Total (TP M) .....	30
2.8.2	La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) .....	32
2.8.3	La Télémaintenance et la E-maintenance .....	34
2.8.3.1	La Télémaintenance .....	34
2.8.3.1.1	Domaines d'application .....	35
2.8.3.1.2	Systèmes de télémaintenance .....	35
2.8.3.1.3	Les étapes d'un système de télémaintenance .....	36
2.8.3.1.4	Processus de la télémaintenance .....	37
2.8.3.2	La E-maintenance .....	37
2.8.3.2.1	Système de la E_maintenance .....	38
2.8.3.2.2	Processus de la E_maintenance .....	39
2.8.3.3	La maintenance distribuée .....	40
2.8.3.3.1	Concept de la maintenance distribuée .....	40
2.8.3.3.2	Avantages de la maintenance distribuée .....	41
2.8.3.3.3	Système de la maintenance distribuée.....	41
2.9	Conclusion.....	43

### **CHAPITRE III.**

	<b>Ordonnancement des activités de la maintenance.....</b>	
3.1	Introduction.....	45
3.2	Définition de l'ordonnancement .....	45
3.2.1.	Les tâches .....	46
3.2.2	Notations .....	46
3.2.3	Les ressources.....	47
3.3	Représentation.....	48
3.4	Les contraintes .....	49
3.5	Objectifs de l'ordonnancement .....	50
3.6	Typologie des problèmes d'ordonnancement .....	50
3.6.1	Les problèmes à une machine.....	51
3.6.2	Les problèmes à machines parallèles .....	51
3.6.3	Les problèmes d'atelier multi machines .....	51
3.7	Les différentes approches de résolution de problèmes d'ordonnancement.....	52
3.7.1	Les approches exactes .....	53
3.7.1.1	Les méthodes optimales efficaces .....	53
3.7.1.2	Les méthodes optimales énumératives.....	54
3.7.2	Les méthodes approchées .....	54
3.8	Ordonnancement de la maintenance .....	55
3.8.1	les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance.....	56
3.8.2	Ordonnancement et affectation des activités de la maintenance .....	57
3.8.3	Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance.....	57

3.8.3.1 Les tâches .....	57
3.8.3 2 Les ressources humaines.....	59
3.8.3 3 Les variables.....	59
3.8.3.4 Les contraintes.....	60
3.8.3 5 Objectif.....	60
3.8.3.6 Critères d'évaluation.....	60
3.8.3 7 Définitions.....	60
a. liberté d'une tâche.....	61
b. Fenêtre élémentaire.....	61
c. Fenêtre maximale.....	61
3.8.4 Ordonnancement statique et dynamique .....	62
3.9 Etat de l'art : ordonnancement et affectation des activités de maintenance .....	62
3.9.1 Problèmes à une machine .....	63
3.9.2 Problèmes à machines parallèles.....	70
3.10 Conclusion .....	77

#### **CHAPITRE IV.**

##### ***Etude de cas: application à l'entreprise SME (Société de Maintenance de l'Est)***

4.1 Introduction.....	78
4.2 Présentation générale de l'ERCE .....	78
4.3 Présentation de La société de maintenance de l'Est (SME).....	78
4.4 Mission de La société de SME Projets réalisés.....	80
4.5 organisation de l'entreprise.....	80
4.5.1 Service fabrications mécaniques .....	81
4.5.2. Département Maintenance.....	82
4.5.2.1 Service maintenance industrielle externe .....	82
4.5.2.2 Service technique.....	83
4.5.2.3 Section parc roulant.....	84
4.5.3 Service méthode et sous-traitance .....	84
4.5.4 Service maintenance conditionnelle .....	85
4.5.5 Service des technologies de l'information et des communications.....	86
4.5.6 Service Approvisionnement .....	86
4.6 Principaux équipements de la société : .....	86
4.7 Projets réalisés .....	87
4.8 Le processus de fabrication des ciments.....	88
4.9 Les interventions externes (Maintenance préventive) .....	90
4.10 Les interventions externes (Maintenance conditionnelle).....	96
4.11 Approche pour l'ordonnancement et l'affectation des activités de maintenance.....	100
4.12 Les données de la maintenance.....	101
4.13. La fonction objective.....	101
4.14. Ordonnancement prévisionnel des tâches (maintenance préventive systématique).....	102
4.14.1 <i>Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel</i> .....	102
4.14.2 <i>Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement prévisionnel</i> .....	103
4.15 Ordonnancement prévisionnel (maintenance conditionnelle systématique).....	107
4.15.1 <i>Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel</i> .....	107
4.15.2 <i>Ordonnancement des tâches aléatoire (maintenance conditionnelle)</i> .....	112
4.16 Conclusion .....	114
<b>Conclusion Générale</b> .....	115
<b>Références Bibliographiques</b> .....	117

---

## Liste des figures

---

Figure 1.1 : Processus de décision selon [Simon 77].....	04
Figure 1.2 : Architecture type d'un SIAD.....	09
Figure 1.3 : Architecture en réseau.....	11
Figure 1.4 : Architecture centralisée.....	12
Figure 1.5 : Architecture hiérarchisée.....	13
Figure 1.6 : Architecture de notre cas d'étude.....	14
Figure 1.7 Architecture de SIAD proposée pour la génération du planning des interventions.....	16
Figure 2.1: Différentes politiques de maintenance.....	20
Figure 2.2 : La courbe en baignoire.....	22
Figure 2.3 : Diagramme des différents concepts de maintenance... ..	26
Figure 2.4 :Le système de gestion de la maintenance.....	28
Figure 2.5 : Structure de la promotion de la T P M .....	32
Figure 2.6 : Exemple de critères de sélection des matériels critiques.....	33
Figure 2.7. Schéma d'interaction entre les différents composants d'un système de télémaintenance.....	36
Figure 2.8 : Modèle d'un centre de décision.....	38
Figure 2.9: Interactions entre les composants d'un système de E_maintenance.....	39
Figure 2.10: Fonctionnement de la E_maintenance.....	40
Figure 2.11: intensité croissante du lien entre l'unité de maintenance et l'entreprise.....	42
Figure 2.12: Illustration de schéma global de (Atelier central, atelier mobile et site de production.....	43
Figure 3.1: caractéristique d'une tache.....	47
Figure 3.2 : typologie par les ressources des problèmes d'ordonnancement.....	48
Figure 3.3: Exemple de diagramme de Gantt.....	49
Figure 3.4: Flow shop à m machines.....	52
Figure 3.5:Job shop à 3 trois machines et 3 travaux .....	52
Figure 3.6 : Les différentes approches de résolution de problèmes d'ordonnancement... ..	53
Figure 3.7: Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance	56
Figure 3.8 : Modélisation du coût d'une tâche de maintenance.....	58
Figure 3.9_a : Ordonnancement faisable.....	58
Figure 3.9_b: Dépassement échéance.....	56
Figure 3.10 : Un ordonnancement $\Pi$ .....	61
Figure 3.11 : fenêtre élémentaire entre deux taches.....	61
Figure 3.12 : Système de production.....	63
Figure 3.13 : Sélection d'une tache à insérer dans la marge .....	65
Figure 3.14 : Exemple illustratif.....	68
Figure 3.15 : Algorithme de [IVAN et al, 03] .....	70
Figure 3.16 : Algorithme de [MARM, 07] .....	71
Figure 3.17 : Graphe utilisé dans le problème d'ordonnancement.....	72
Figure 3.18 : Graphe de calcul des dates de début au plus tard et au plus tôt.....	72
Figure 3.19 : fenêtre d'insertion.....	73
Figure 3.20 : Méthode d'insertion dynamique de tâches.....	75

Figure 4.1 : Architecture de notre cas d'étude.....	79
Figure 4.2 : Déroulement d'une activité du service de fabrication mécanique.....	82
Figure 4.3 : les différentes étapes de la maintenance externe.....	83
Figure 4.4 : les activités d'une maintenance interne .....	84
Figure 4.5 : Les étapes d'une opération d'étalonnage .....	84
Figure 4.6 : Maintenance conditionnelle .....	85
Figure 4.7: Processus de fabrication des ciments.....	89
Figure 4.8 : Ordonnancement prévisionnel des taches préventives.....	100
Figure 4.9 : l'interface graphique.....	102
Figure 4.10 : Données de la maintenance préventive.....	103
Figure 4.11: le Gantt de l'unité de Ain Touta.....	104
Figure 4.12: le Gantt de l'équipe volante .....	105
Figure 4.13 : Ordonnancement prévisionnel des taches de maintenance conditionnelle...	110
Figure 4.14 : les taches affectées à la première équipe (List_Equip1).....	112

---

## Liste des Tableaux

---

Tableau 3.1 : caractéristiques des taches programmables.....	75
Tableau 3.2: Taches prévisionnel pour la première ressource.....	75
Tableau 3.3 : Taches prévisionnel pour la deuxième ressource.....	75
Tableau 4.1 : Catégories et caractéristiques des équipements de production de SME....	87
Tableau 4.2: Les différentes interventions externes.....	90
Tableau 4.16: Les différentes interventions externes (maintenance conditionnelle).....	96

---

## Liste des algorithmes

---

Algorithme 3.1 : Algorithme de maximisation du nombre de tache sans retards .....	64
Algorithme 3.2 : Procédure de remplissage des marges .....	64
Algorithme 3.3 : Procédure d'élimination de la tache la plus défavorable .....	66
Algorithme 3.4 : Procédure d'insertion d'une tache aléatoire.....	67
Algorithme 3.5 : Procédure de calcul de la borne supérieur BS .....	76
Algorithme 4.1 : Algorithme principal de l'ordonnancement prévisionnel par équipe.	103
Algorithme 4.2 : Algorithme principal de l'ordonnancement prévisionnel pour l'équipe volante.....	105
Algorithme 4.3: Procédure Construction_EDD .....	106
Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser_Tache_Rejeté.....	107
Algorithme 4.5 : Algorithme principal pour la maintenance corrective.....	108
Algorithme 4.6 : Procédure Recherche-Pos-Inser .....	109
Algorithme 4.7 : Algorithme principal pour la maintenance conditionnelle .....	111
Algorithme 4.8 : Procédure Affectation_Par_Equipe.....	112
Algorithme 4.9 : Algorithme principal pour la maintenance corrective conditionnelle	113

---

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

---

---

## Introduction générale

---

Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises subissent de grandes pressions de la part de leurs clients. Ces derniers deviennent de plus en plus exigeants et demandent, en outre, des produits et des services de bonne qualité, à moindre coût, livrés rapidement et au bon moment et un service après-vente défiant la compétition. Pour satisfaire la demande en qualité et en quantité tout en respectant les délais de livraison et les coûts, l'entreprise manufacturière doit disposer d'un outil de production fiable, donc bien entretenu.

Maintenir l'équipement de production n'est pas une tâche facile. Les concepts de la maintenance définissent des façons de faire pour maximiser la performance globale de l'entreprise. La mise en oeuvre de ces concepts exige des ressources humaines compétentes, des outils et du matériel adaptés aux équipements et aux installations à entretenir, un système de gestion de pièces de rechange adéquat et un système d'information bien pensé pour assurer un échange efficace entre les différents intervenants.

De nos jours, avec les avancées technologiques dans le domaine de l'information et de la communication (TIC), la notion d'entreprise locale est passée vers celle d'entreprise étendue. Pour assurer la fonction maintenance des équipements répartis, les utilisateurs et les constructeurs se dirigent de plus en plus vers des services de maintenance et de contrôle à distance dont le but est de diminuer les temps d'inactivités des machines.

Le service de maintenance intervient pour maintenir ou remettre en état de bon fonctionnement les équipements répartis. De ces deux politiques d'interventions, il découle deux types de tâches de maintenance : les tâches de maintenance préventive et les tâches de maintenance corrective [AFNOR, 2001]. La principale différence existant entre ces tâches est que les tâches préventives sont connues et que l'on sait quand elles doivent avoir lieu. Les tâches correctives, quant à elles, sont nécessaires suite à des événements imprévisibles et la connaissance que l'on en a dépend d'un diagnostic. En fonction des caractéristiques des tâches et de celles des ressources, l'un des problèmes du manager du service de maintenance sera de trouver, pour chaque tâche, quelle ressource doit la traiter et quand.

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. Elle consiste à la mise en oeuvre d'une démarche d'aide à la décision pour l'ordonnancement

des activités de la maintenance des différentes unités de production des ciments de l'Est. L'objectif est de proposer une approche pour la minimisation des conflits sur les ressources (équipes exécutant les tâches de la maintenance) et en fin de développer un outil pour l'ordonnancement des tâches de la maintenance prévisionnelles systématique et de la maintenance conditionnelle.

Afin d'atteindre cet objectif, nous commençons d'abord par la définition de la décision, le processus de décision et, les concepts des Systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) pour pouvoir proposer, une architecture type suivant notre cas d'étude.

Le deuxième chapitre, traite les notions de base de la maintenance : nous commencerons par définir le concept de maintenance, son évolution, et les différentes formes de la maintenance. La deuxième partie sera consacrée aux approches nouvelles de la maintenance.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des notions de base et aux problèmes d'ordonnancement. Dans la seconde partie, nous présenterons quelques méthodes dédiées aux problèmes d'ordonnancement des activités de la maintenance.

Enfin dans le dernier chapitre, et après un bref représentation de la société et ces différents services servant à notre application. Nous présentons par la suite un outil développé et dédié au problème traité, permettant l'implémentation de la méthode proposée, afin de résoudre les problèmes de conflit et de répondre à la demande des clients en temps optimum. En conclusion, nous présenterons l'apport de notre travail ainsi des perspectives.

---

# CHAPITRE I

*Aide à la décision*

---

## **1.1 Introduction :**

Ce chapitre a pour but de présenter les systèmes d'aide à la décision. Ces derniers sont apparus au cours des années soixante. Dans sa partie notre travail est axée sur les définitions de processus et la décision, caractérisée par les propriétés développées par [SIMO, 77] selon [LEVI et POME, 90], et portant sur la "rationalité limitée".

Dans la deuxième partie, est consacrée aux concepts des systèmes Interactifs d'Aide à la décision (SIAD), puis l'intérêt de l'approche SIAD dans la maintenance, dans le cadre notre étude qui se déroule au niveau de la société de la maintenance des cimenteries de l'Est (S M E).

Ainsi, après avoir présenté les concepts SIAD, nous proposerons une architecture pour aider les managers à prendre, des décisions rationnelles se rapportant aux demandes d'interventions.

## **1.2 Processus de décision et aide à la décision :**

### **1.2.1 Processus de décision :**

La prise de décision peut difficilement être définie indépendamment de l'environnement dans lequel elle est développée la décision est indissociable du contexte global du processus de prise de décision [TREN, 96].

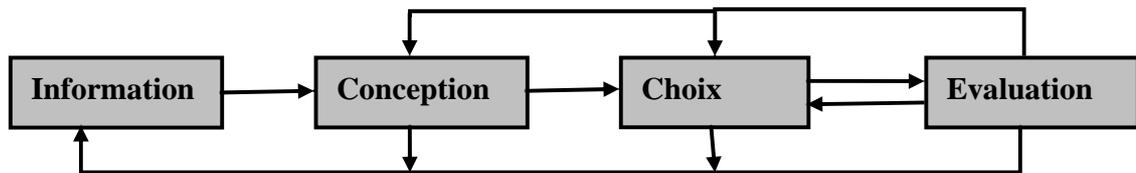
Selon [LEVI et POME, 90], Simon [SIMO, 77] est un des premiers auteurs à décrire le processus de prise de décision, il le situe selon quatre phases (Fig 1.1) :

- L'information ou le renseignement (intelligence) consiste à rechercher des conditions nécessaires aux décisions,
- La conception intègre l'invention, le développement et l'analyse de séries d'actions possibles,
- Le choix consiste à sélectionner une série d'actions parmi celles disponibles.
- L'évaluation des choix précédents.

Pour [LEPR, 05], [CHEC, 92], ont regroupé le processus de décision en trois principes :

- Le principe rationnel (économique) où les processus de décision doivent maximiser la valeur attendue du résultat en déterminant les coûts et les risques de chaque alternative.

- Le principe heuristique où la prise de décision consiste à rechercher la première alternative dont le rapport coût/efficacité soit acceptable.
- Le principe du consensus qui préconise d'effectuer des comparaisons successives entre les alternatives jusqu'à l'obtention du consensus des décideurs.



**Figure 1.1 :** Processus de décision selon [Simon 77]

## 1.2.2 Décision et Aide à la décision :

### 1.2.2.1 La décision :

La décision est souvent vue comme le fait d'un individu isolé (« le décideur ») exerçant un choix entre plusieurs possibilités d'actions à un moment donné. Comme le définit [LEBA, 03] selon [ROY, 00], Aider à décider, c'est tout d'abord aider à clarifier la formulation, la transformation et l'argumentation des préférences. A ce niveau, le concept clé est celui du critère.

### 1.2.2.2 Aide à la décision :

Roy [ROY, 00] définit l'aide à la décision comme étant , l'activité de celui qui, prend appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement formalisés, et aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un acteur dans un processus de décision, l'éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d'autre part .

### 1.3 Présentation des S.I.A.D :

#### 1.3.1 Définition :

Selon [MORV, 89], le SIAD est un système informatique permettant de gérer, d'analyser et de comparer des ensembles d'informations provenant de sources diverses (par exemple les différents services d'une entreprise : ventes, marketing, production, personnel...) et accessible à des utilisateurs divers (un ingénieur commercial, un directeur des ventes, un directeur financier...) ayant des points de vue et des besoins différents.

Les SIAD sont des systèmes d'information interactif, flexible et adaptable, développé spécialement pour aider à la solution de problèmes de management peu ou non structurés. Ils utilisent des données, fournissent une interface simple et autorise le manipulateur à exprimer ses propres opinions [AKHR, 00], [ZERH et al, 01].

Les SIAD comportent une machinerie d'outils, destinés à faciliter les manipulations de l'utilisateur dans ses efforts pour arriver à la conclusion de son étude .Ces moyens de manipulation et de contrôle, sont mis à la disposition de l'utilisateur, par l'intermédiaire des menus, des masques, des commandes et des guides, c'est à dire tout ce qui peut faciliter l'accessibilité d'un système informatique à un non informaticien [LEVI et POME, 90].

#### 1.3.2 La signification des mots clés:

Les SIAD sont des systèmes d'information interactifs destinés à aider les décideurs à exploiter des données et des modèles pour résoudre des problèmes peu ou non structurés. La signification de chaque mot clé est expliquée ainsi [LEPR, 05] :

- Système : ensemble complexe et maîtrisable.
- Interactif : couplage homme\_machine qui sous-entend ergonomie et contrôle par l'utilisateur. L'utilisation conversationnelle de l'ordinateur est nécessaire. Le dialogue est dirigé par le système et non par l'homme.
- Données et modèles : le système d'information comporte non seulement les informations brutes mais aussi les traitements nécessaires à une mise en forme compréhensible (tris, sélections, calculs, éditions), de même que les outils élaborés pour analyser, comprendre, communiquer, démontrer. . .

- Problèmes non structurés : c'est le lot commun à tous les problèmes posés par le management. Une grande part est faite à l'intuition, au tâtonnement, à l'expérience du décideur. Le SIAD ne constitue qu'un élément du processus de décision.
- Aider : il s'agit de fournir au décideur une amplification du pouvoir de raisonnement et non pas de se substituer à ce raisonnement par une modélisation des processus qui caractériseraient ce dernier.

### **1.3.3 Pourquoi un S.I.A.D ? :**

Les raisons à l'origine des situations dans lesquelles l'appel à un SIAD est utilisé sont connues à savoir [CHEC, 92], [AKHR, 00], [ZERH et al, 01] :

1. les facteurs de préférence, le jugement, l'intuition, l'expérience du décideur sont essentiels,
2. la recherche de la solution implique un mélange de :
  - recherche d'informations,
  - manipulation de données,
  - calculs,
  - formalisation ou structuration du problème (modélisation).
3. la séquence des opérations précédentes n'est pas connue à l'avance car :
  - elle peut dépendre des données,
  - elle est infléchie par l'obtention des résultats intermédiaires.
4. les critères de décision sont nombreux, conflictuels en général et dépendent des utilisateurs.
5. les données ne sont pas toujours connues à l'avance.
6. l'obtention d'une solution satisfaisante doit être réalisé en temps limité.
7. le problème est soumis à une évolution rapide.

### **1.3.4 Les fonctions d'un SIAD :**

Un SIAD est utilisé par un décideur pour accomplir une ou plusieurs fonctions telle que [CHEC, 92] :

1. Accéder à l'information pertinente et permettre un contrôle de ces accès.
2. Diagnostiquer le problème objet de l'étude, en rendant possible la présentation des informations sous une forme bien adaptée à l'interprétation des données.
3. définir de nouveaux concepts à partir des concepts déjà existant (structuration des données).
4. Structurer l'information sous forme de modèles.
5. permettre la description et l'analyse de l'information sous forme de modèles.
6. Conserver et gérer les objets du système.
7. Permettre la manipulation de ces objets pour la prise de décision.
8. Permettre une évaluation des possibilités par l'utilisateur des fonctions de préférence modélisant les préférences du décideur vis à vis des divers critères.
9. Faciliter la communication entre les décideurs, même s'ils sont dispersés géographiquement.

### **1.3.5 Les principaux modules d'un SIAD et leur architecture :**

Les fonctionnalités précédentes peuvent être regroupées en trois sous- systèmes principaux, auxquels il faut ajouter le module de contrôle qui assure la supervision des différentes fonctions [CHEC, 92], [LEVI et POME, 90], ces fonctions sont illustrées par la figure (fig 1.2) :

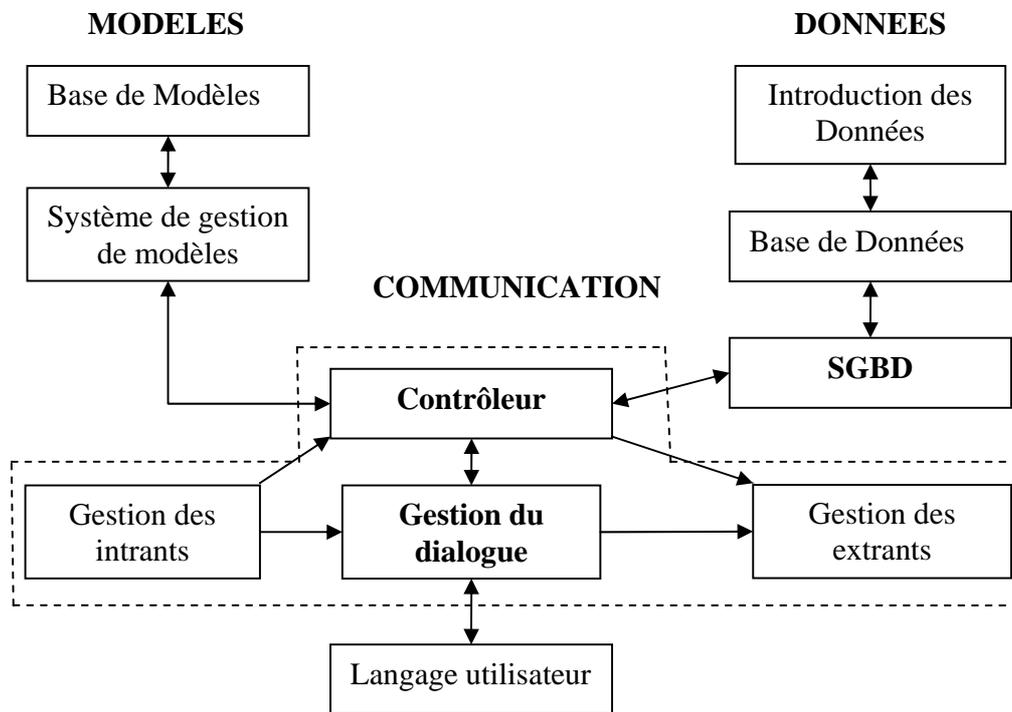
1. Une interface de dialogue qui assure les fonctions de représentation et de manipulation des représentations, c'est aussi par cette interface que passe le contrôle de l'utilisateur.
2. Une base de données, qui assure une fonction de mémoire.
3. Une base de modèles qui assure les fonctions de traitement (computation assuré par les processeurs).

**1.3.5.1 Le module de dialogue :**

Le module de dialogue manipule des représentations, c'est à dire que l'opérateur acquiert par son intermédiaire une information structurée .Suivant les types de représentations, l'opérateur est invité à réagir sur des tableaux, des graphiques, des textes, etc. La réalisation du module de dialogue devra se faire dans l'optique d'une standardisation suffisante pour permettre rapidement les modifications nécessaires.

Suivant [LEVI et POMEL, 90], le module de dialogue, est constitué d'un ensemble de modules et sous modules :

- Un sous\_ ensemble de sous modules transforment des messages internes au système, c'est à dire venant des autres modules du SIAD en messages pour l'utilisateur,
- Un deuxième sous ensemble de sous\_ modules transforment des intrants fournis par l'utilisateur, en messages pour les divers modules du SIAD,
- Un module gère l'interface matérielle,
- Un module assure le contrôle des différents sous modules.



**Figure 1.2 :** Architecture type d'un SIAD

### 1.3.5.2 Le module base de données :

Le dictionnaire informatique, [MORV, 89] a défini une base de données comme un ensemble structuré et intégré de données, enregistré sur des mémoires secondaires, crée et tenu à jour pour les besoins d'un ensemble d'utilisateurs, les données d'une base de données représentent généralement les informations nécessaires au fonctionnement de l'entreprise. Les bases de données sont gérées par des logiciels spécifiques appelé systèmes de gestion de bases de données (S.G.B.D.). Le S.G.B.D chargé de définir les accès aux données en cas de partage de la base entre plusieurs utilisateurs et intervient en cours de traitement jusqu'à l'enregistrement des résultats finaux, qui est le rôle fondamental dans le SIAD.

### 1.3.5.3 Le module base de modèles :

Un modèle selon [MORV, 89], est une représentation approchée d'un système réel afin d'en étudier le comportement. Un SIAD comprend souvent plusieurs modèles qui interviennent à différentes phases du traitement dans les problèmes d'aide à la décision complexe. Les modèles

sont gérés par le système de gestion des modèles, et peuvent communiquer avec les données sous contrôle de communication comme l'indique la figure (fig 1.1).

### 1.3.6 Les différents types d'architecture

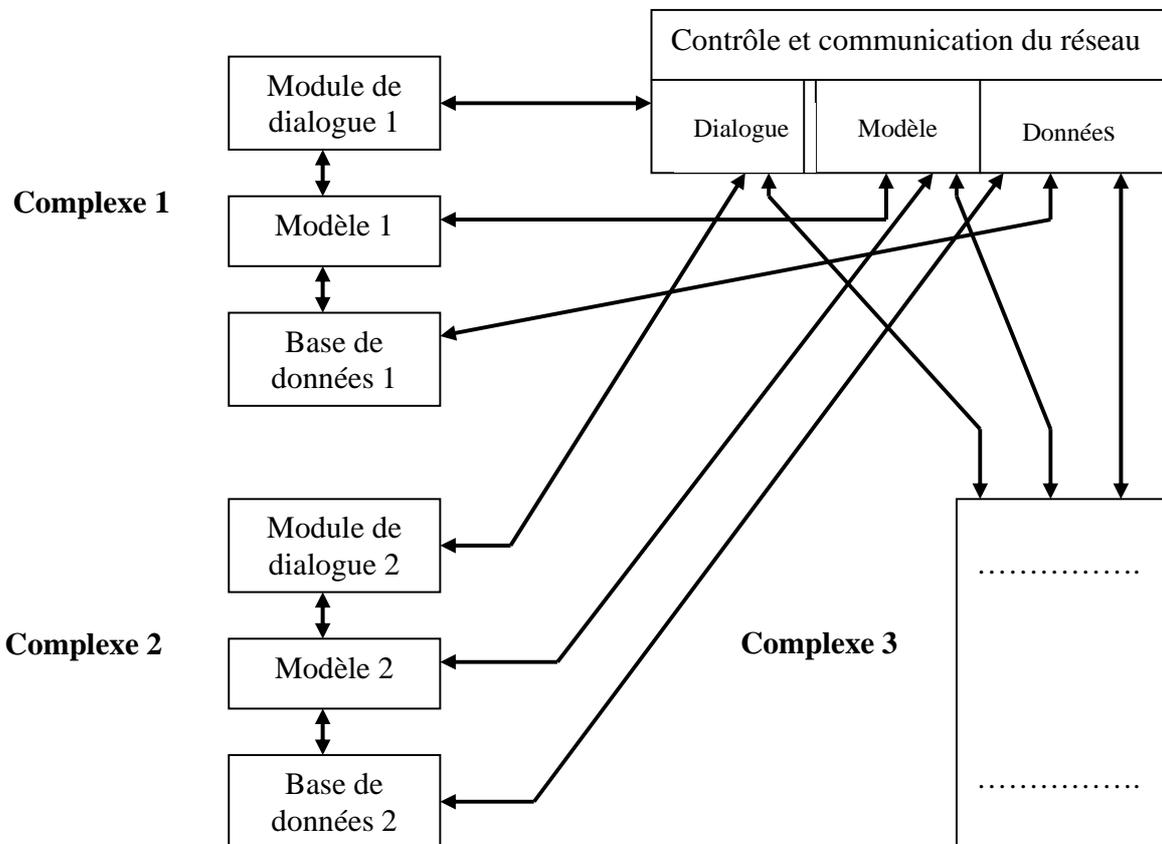
Selon [LEPR, 05], [BONC et al, 81] ont défini un SIAD comme étant, un système logiciel intégrant trois composants : un système de langage, qui est un mécanisme permettant une communication entre l'utilisateur et les autres composants du SIAD, le second système est un système de connaissance dans le domaine du problème, et en fin le système de traitement du problème, qui lie les deux autres composants, contenant une ou plusieurs capacités de manipulation du problème demandé pour la prise de décision

[CHEC, 92], [LEVI et POME, 90], ont présenté une architecture similaire constituée de trois composants : les bases de données, les modèles et les modules de dialogue. Bien qu'il ne soit pas toujours très facile de distinguer les différents modules, on peut tout de même affirmer que le rôle de l'architecture consiste à relier d'une façon efficace trois types de modules. Les principaux types d'architecture sont :

- Architecture en réseau
- Architecture centralisée
- Architecture hiérarchisée

#### 1.3.6.1 Architecture en réseau :

Chaque modèle possède sa base de données, son module de dialogue ainsi que les modules d'intégration. Autrement dit, chaque modèle et ses satellites forment un complexe différencié, une espèce de sous SIAD comparable à une machine d'un réseau, le contrôle de réseau est fait par les modules d'intégration comme l'indique la figure (fig 1.3). Le principal avantage de cette architecture est une grande modularité.

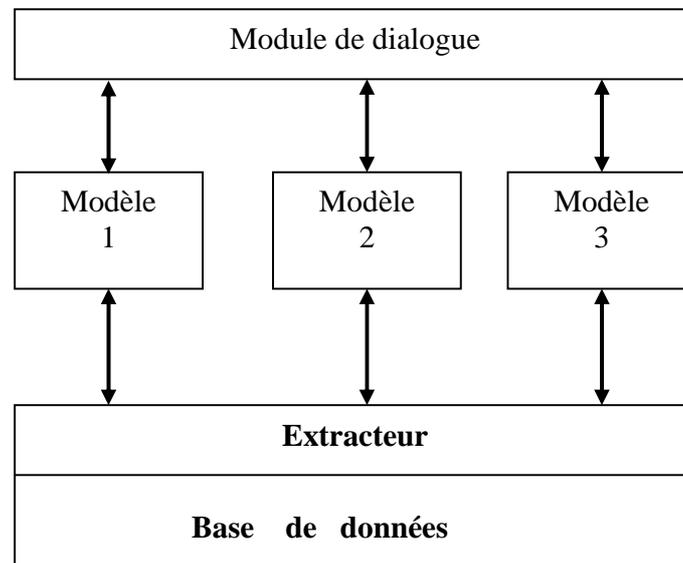


**Figure 1.3 :** Architecture en réseau

### 1.3.6.2 Architecture centralisée :

Dans cette architecture, chaque modèle relève d'un module unique de dialogue et communique avec une seule base de données ; l'architecture est celle représentée sur la figure (fig 1.4).

L'unité des dialogues est un élément de confort pour l'utilisateur .De même, le partage d'une base de données unique facilite les échanges d'information entre les modèles. Le contrôle se fait par dialogue.

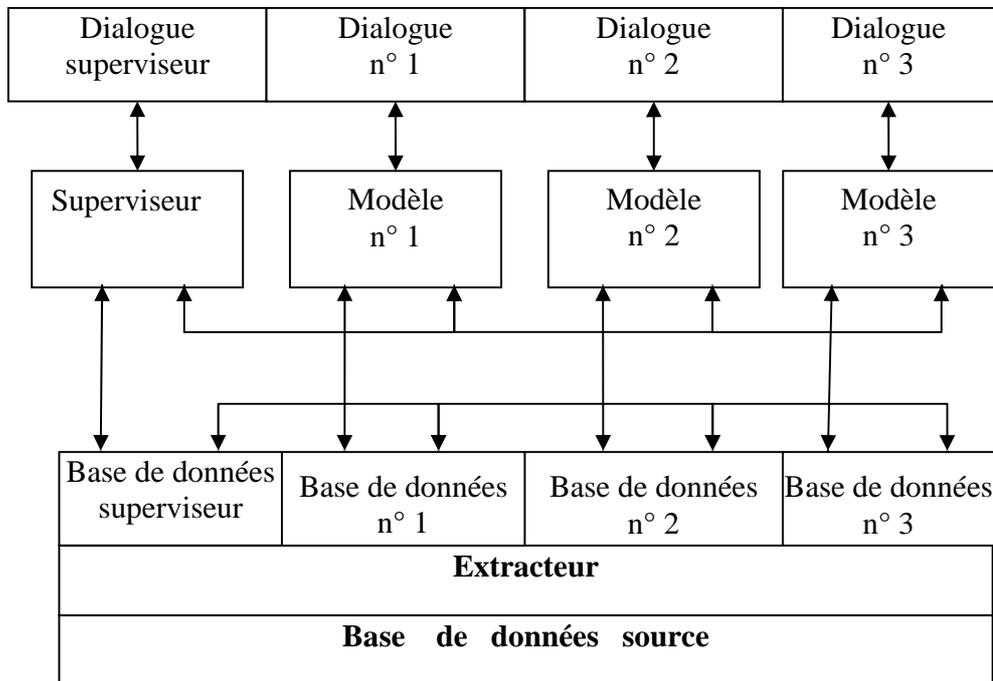


**Figure 1.4** : Architecture centralisée

### 1.3.6.3 Architecture hiérarchisée :

L'architecture hiérarchisée se rapproche du système centralisé comme indique la figure (fig 1.5). La principale différence est que le module de dialogue est divisé, tandis que le module base de données est muni d'une couche supplémentaire. Cette couche est destinée à pallier le principal défaut de l'architecture centralisée en permettant des adaptations plus faciles (ajout et suppression des modèles).

Le module de dialogue est divisé en deux parties. Une partie gère des échanges avec l'utilisateur qui ne relève pas directement d'un modèle, c'est le dialogue inter modèles. Nous trouverons dans la partie suivante les modules de dialogues qui sont directement liés aux modèles. Le superviseur gère les échanges entre les modules de dialogue et les modèles et gère le passage d'un modèle à un autre.



**Figure 1.5 :** Architecture hiérarchisée

### 1.3.7 Spécification du problème et approche de solution (Formulation du problème) :

Notre cas d'étude est réalisé au sein de la Société de Maintenance de l'Est (SME), spécialisé en maintenance industrielle des installations des différentes cimenteries de l'Est, implantée à HAMA BOUZIENNE à CONSTANTINE comme indique le schéma de la figure (Fig 1.6).

Les activités de SME sont : maintenance externe (préventive, corrective), maintenance conditionnelle et fabrications de pièces de rechange.

Le problème vient du fait qu'il y a des contraintes conflictuels à prendre en considération telles que :

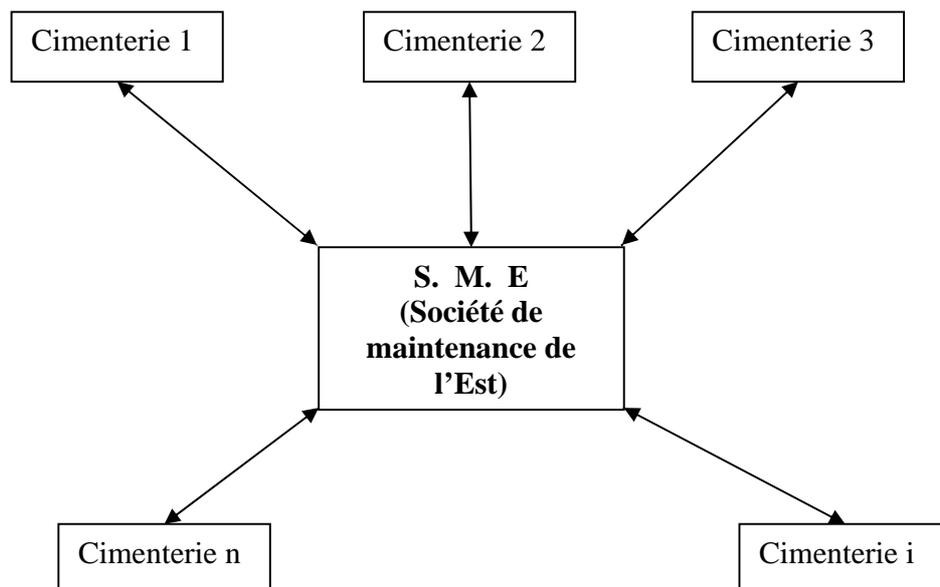
- Les demandes de travail des différentes cimenteries peuvent arriver en même temps ce qui nécessite une planification et ordonnancement (voir le troisième chapitre) au niveau de la SME, d'une part et d'autre part assuré l'affectation des moyens matériels et humains de chaque activité de maintenance et le suivi simultané des travaux de sous traitance par les deux parties afin d'optimiser les coûts d'intervention.

- Les demandes de travail, parfois sont de mêmes types, par exemple la réparation de fours de deux unités, représentant deux interventions de mêmes tâches et nécessitant les mêmes ressources (matériels, humains) et même délai.

Suivant la disponibilité des ressources, la solution serait peut être de classer les différentes interventions selon les délais d'exécution, le type de process de chaque unité de production afin d'optimiser le temps d'arrêt de production.

L'appel à un système interactif d'aide à la décision (SIAD) nous semble justifié pour les raisons suivantes :

1. le SIAD permet de déterminer l'intervention provoquant, l'arrêt immédiat de cycle de production, d'une unité quelconque suivant les critères de décision, afin de maximiser la durée de disponibilité des équipements de différentes unités de production.
2. le SIAD offre aussi des moyens qui permettent de visualiser les différentes interventions en cours d'exécution et les ressources disponibles.
3. le SIAD facilite à son utilisateur l'activation (exécution) d'une intervention mise en attente, suivant la disponibilité des ressources.



**Figure 1.6 :** Architecture de notre cas d'étude

**1.3.8 Les critères de décision :**

Les paramètres principaux sur lesquels le décideur simule des solutions et prendre des décisions dépendent de :

1. la disponibilité des ressources (matériels et humains),
2. les délais d'exécution des interventions (ordre de travail), qui engendrent des temps logistique non négligeable,
3. les dates prévues d'intervention dans le cas de la maintenance préventive ou prédictive conditionnelle c'est à dire, si la date d'intervention coïncide avec une autre demande (ordre de travail, intervention), alors les autres ordres de travail peuvent être planifiés ou mise en attente, suivant la disponibilité des ressources.
4. après l'évaluation de chaque ordre de travail (coût, délai), le client doit être informé pour transmettre un ordre de service, sinon l'ordre de travail sera mis en attente.
5. la redondance des équipements, par exemples pour les cimenteries ayant plus d'un four (Cimenterie de AIN TOUTA), et d'autre dispose uniquement d'un seul four (Cimenterie de HAMMA BOUZIANE), l'intervention correspond à la réparation d'un four des deux unités de production et les ressources disponibles ne suffisent pas de lancer les deux interventions en même temps, dans ce cas, les managers favorisent l'unité de production ayant un seul four car l'autre peut fonctionnée avec un seul four.
6. la distance entre plusieurs filiales et aussi est un critère de choix.

**1.3.9 Architecture du SIAD proposée pour la génération du planning des interventions :**

L'architecture SIAD proposée sera de type centralisé, car le partage d'une base de données unique permet de faciliter les échanges d'information entre la SME et les différentes cimenteries. La résolution des problèmes de conflits est faite par le module du dialogue, afin d'assurer une rentabilité optimum des moyens matériels et humains .

Le système se présente comme un ensemble de modules indépendants et communicants, décomposé en trois niveaux élémentaires (fig 1.7) :

- le niveau interface (module dialogue),
- le niveau traitement,
- le niveau données

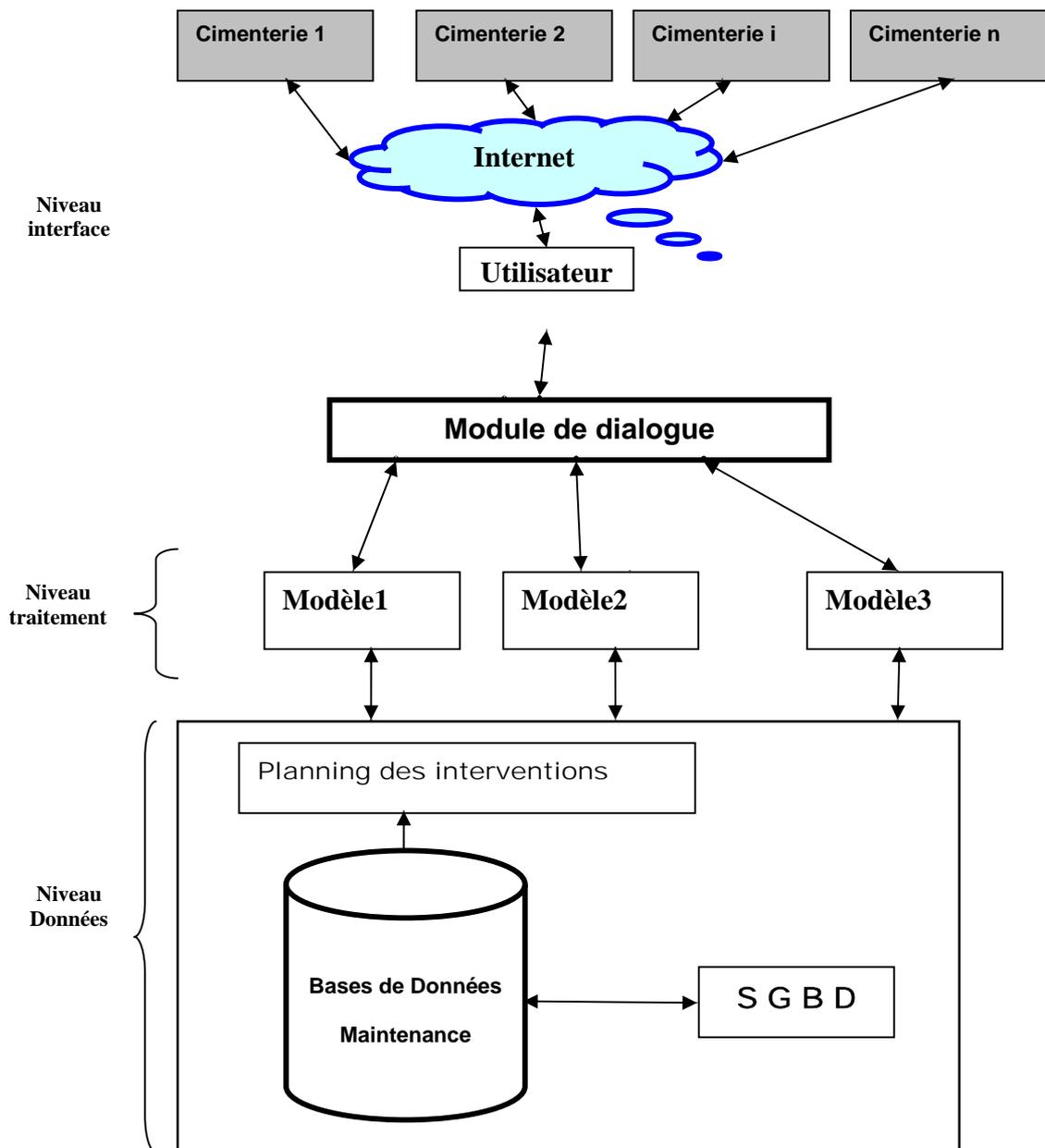


Figure 1.7 Architecture de SIAD proposée pour la génération du planning des interventions

**1. Niveau interface :**

Ce niveau est manipulé par le responsable de la maintenance, il lui permet de:

1. visualiser l'arrivé des ordres de travail (interventions de différentes cimenteries),
2. accéder aux données de chaque cimenterie,
3. lancer les modèles et apprécier les résultats.

**2. Niveau de traitement :**

Ce niveau est constitué d'un ensemble de modèles, ayant des tâches spécifiques d'aide à la décision à savoir :

1. le modèle qui détermine le délai d'exécution et le coût de chaque ordre de travail,
2. le modèle qui permet de déterminer les prévisions des besoins réels en moyens humains, en moyen matériels et pièces de rechanges,
3. le modèle qui classifie les ordres de travail.

**3. Niveau de données :**

Ce niveau de données regroupe les informations de chaque cimenterie. Les informations peuvent être des résultats intermédiaires qui ont une signification dans le cours du traitement ou qui peuvent servir de base à d'autres manipulations, pour ces données on distingue deux classes :

1. les données des différentes interventions (coût, délai, moyens humains, moyens matériels, pièces de rechanges, qualification des moyens humains, contraintes rencontrées),
2. les données des équipements de chaque cimenterie.

**1.4 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons défini la décision et le processus de décision .Il est important de connaître, les concepts des Systèmes interactifs d'aide à la décision (SIAD) pour pouvoir proposer, une architecture type suivant notre cas d'étude, qui tourne autour de la fonction maintenance dans une entreprise. La fonction maintenance devient une activité coûteuse en terme de mobilité et disponibilité des moyens matériels et humains d'une part, et d'autre part l'arrivée des demandes de travail de différentes unités de production pose le problème de conflits.

La vision SIAD peut offrir au décideur en maintenance, un environnement de simulation lui permettant de prendre des décisions pour élaborer un planning de différentes interventions en fonction des ressources disponibles. Dans le prochain chapitre, nous détaillerons les concepts de la maintenance.

---

# **CHAPITRE II**

*La fiabilité et la maintenance*

---

**2.1 Introduction :**

L'évolution et la complexité grandissante des systèmes de production ainsi que le besoin de produire vite et bien, ont obligé les industriels à créer de nouveaux concepts d'organisation et de nouvelles manières d'intervenir sur des structures de production concernant les produits manufacturés. La production intensive, la complexité des systèmes de production et surtout la rentabilité, ont poussé les industriels à créer un nouveau domaine et une structure accompagnatrice dans l'entreprise appelée « service maintenance ». Ce dernier est maintenant devenue une activité stratégique pour assurer la pérennité des équipements, de diminuer les pannes et les imprévus et de réduire les coûts de révision et de remise en état de fonctionnement.

La maintenance a beaucoup évolué depuis le début de l'ère industrielle. Cette évolution est liée à l'émergence successive de nouvelles technologies induisant la mise en place de différents types de maintenance vue la transformation des caractéristiques des équipements.

Ce chapitre commence par une présentation des notions de base de la maintenance : nous commencerons par définir le concept de maintenance, son évolution, et les différentes formes de la maintenance. La deuxième partie sera consacrée aux approches nouvelles de la maintenance.

**2.2 Evolution de la maintenance :**

Le terme maintenance est apparu dans les années 1950 aux Etats-Unis. En France, on parlait encore à cette époque d'entretien. A cette époque, la maintenance a été préconisée comme un moyen permettant de réduire les défaillances et les accidents imprévus.

Progressivement, une attitude plus positive vis-à-vis de la défaillance voit le jour. Il faut tirer une leçon de l'apparition d'une panne pour mieux réagir face aux aléas de fonctionnement [HENG, 02]. Dans la norme AFNOR-NF-X60-010], la maintenance industrielle peut se décliner sous différentes formes selon les situations [HECT, 06]. La figure (Fig 2.1) montre les différentes formes de maintenance. En effectuant un bilan des différentes évolutions des politiques de maintenance dans le Temps, nous pouvons donner à titre indicatif les repères suivants [RACO, 06]:

**Années 60 :** Maintenance réactive / corrective

Intervient après la détection et la localisation d'un défaut. Elle revient à corriger entièrement (curative) ou en partie (palliative) le défaut observé

**Années 70 :** Maintenance préventive (préventive systématique)

Elle représente une maintenance préventive effectuée selon un échancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage

**Années 80:** Maintenance prédictive (prévisionnelle, préventive conditionnelle)

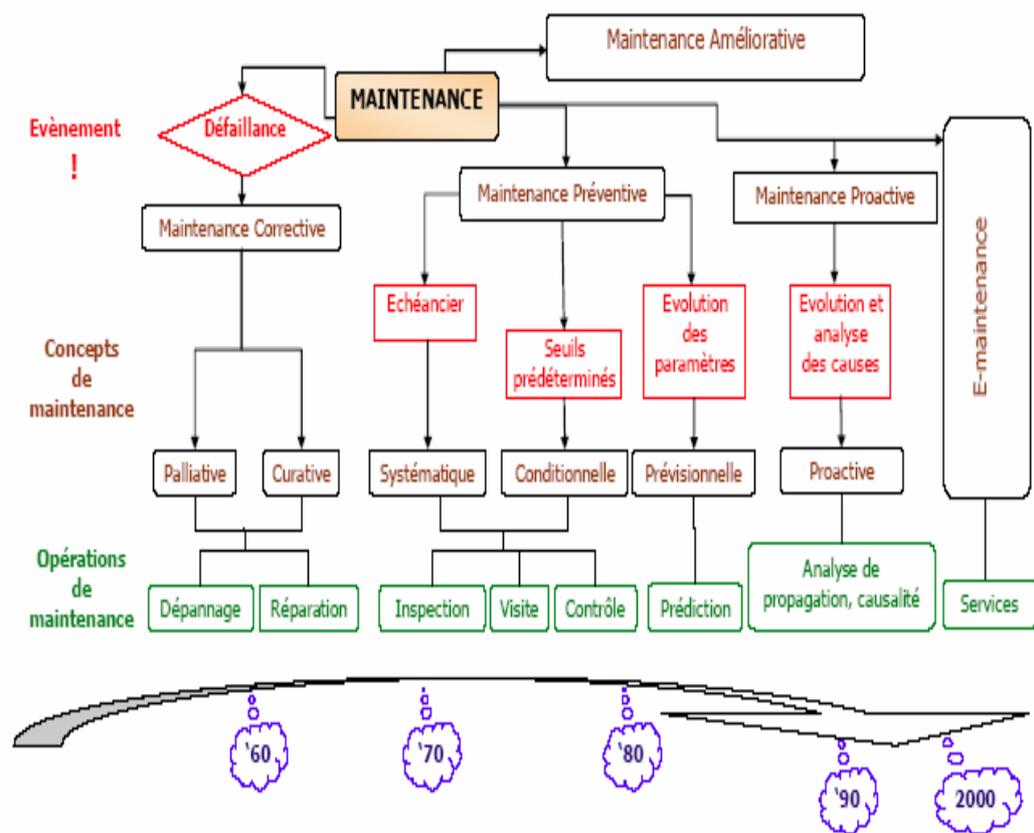
La décision d'intervention préventive est prise lorsqu'il y a évidence expérimentale de défaut imminent, ou approche d'un seuil de dégradation prédéterminé.

**Années 90 :** Maintenance proactive (PRM)

Implique la surveillance et la vérification continues des causes primaires de défaillance du système surveillé

**Années 2000 :** E-maintenance

La E-Maintenance est un concept lié au principe de web services, de coopération et de partage des connaissances.



**Figure 2.1 :** Différentes politiques de maintenance

**2.3 La fiabilité :****2.3.1 La notion de la fiabilité :**

La norme NF X 60\_500 définit la fiabilité comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné [ZWIN, 96].

En terme statistique, la fiabilité est une fonction du temps  $R(t)$  qui représente la probabilité de bon fonctionnement d'un matériel.

$R(t) = P(E \text{ non défaillante sur la durée } [0, t] \text{ en supposant qu'elle n'est pas défaillante à l'instant } t = 0, E \text{ désigne un composant, système ou sous-système.}$

En terme qualité, on définit la fiabilité d'un matériel comme l'aptitude à maintenir la conformité à sa spécification d'origine.

On distingue :

- La fiabilité intrinsèque, qui est propre à un matériel, selon un environnement donné, et ne dépend que de la qualité de ce matériel.
- La fiabilité extrinsèque, qui résulte des conditions d'exploitation, de la qualité de la maintenance .elle est relative à l'intervention humaine [HENG, 98], [BOIT et HAZ, 87].

**2.3.2 Taux de défaillance :**

Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  est un estimateur de la fiabilité (exprimé en pannes par heure).Il est présenté par le rapport

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{Durée d'usage}}$$

Liée au problème de défaillance, la vie des équipements se présente en trois phases :

1. Phase de jeunesse : c'est la période de mise en service et de rodage de l'installation .les défaillances sont dues à des anomalies ou imperfections de montage. $\lambda(t)$  décroît rapidement
2. Phase de maturité : c'est la période de vie utile ou la défaillance est aléatoire .le taux de défaillance est constant ou légèrement croissant, correspond au rendement optimal de l'équipement
3. Phase de vieillesse : c'est la période d'obsolescence, à dégradation accélérée, souvent on trouve une usure mécanique de la fatigue, une érosion ou une corrosion. $\lambda(t)$  croît rapidement [HENG, 98].

Le graphe représentant la variation des taux de défaillances, appelé courbe en baignoire (Fig 2.2)

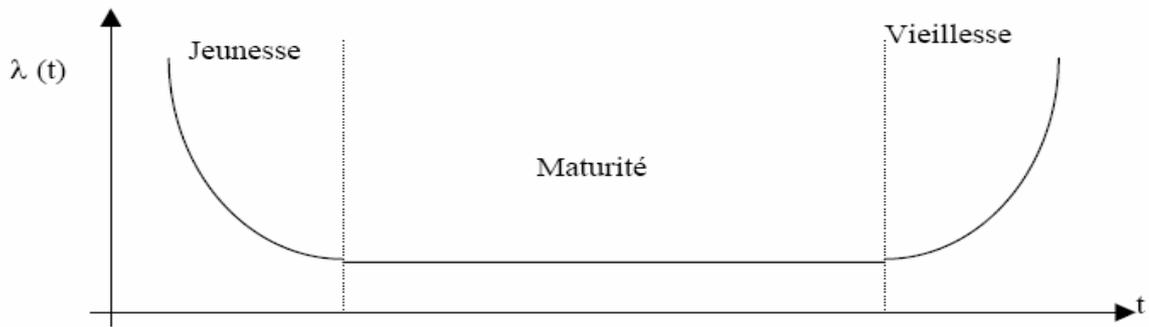


Figure 2.2 : La courbe en baignoire

### 2.3.3 Les lois de la fiabilité :

Il est intéressant de connaître, pour les principaux sous-ensembles ou constituants des équipements, les lois d'évolution de  $\lambda(t)$  dans le temps afin de fixer la politique de maintenance la mieux appropriée [HENG, 02], [BOUC, 98]. Les principales lois de probabilités utilisées en fiabilité sont :

1. Distribution exponentielle : Cette loi est applicable pour la période où le taux de défaillance est constant. Tous les matériels sont concernés durant leur vie utile. La fiabilité ou la possibilité de survivre entre 0 et  $t$  est :

$$R(t) = e^{-\int \lambda(t).dt} = e^{-\lambda(t)}$$

2. loi de Weibull : contrairement au modèle exponentiel, la loi de Weibull de couvre le cas où le taux de défaillance est variable et permet de s'ajuster aux périodes de jeunesse et de vieillesse. La fiabilité est représentée par :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)}{\eta}\right]^\beta}$$

Avec :  $\beta$  : paramètre de forme,

$\gamma$  : paramètre de position ou de correction d'origine des temps ,

$\eta$  : paramètre d'échelle,

$t$  : temps d'utilisation ,ou unité de service rendu.

**2.4 La maintenance :****2.4.1 La notion de la maintenance :**

L'Association Française de Normalisation « AFNOR » définit la maintenance comme 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 [BOUC, 98], [ZWIN, 96].

Dans une entreprise, maintenir, c'est donc effectuer des opérations (dépannage, réparation, graissage, contrôle, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la production avec efficacité et qualité [HENG, 02].

**2.4.2 Les différents types de maintenance :**

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive. Le deuxième fait référence à l'aspect correctif [HÉDI ,01]. Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les définitions de chaque type de maintenance.

**2.4.2.1 Maintenance corrective :**

La Maintenance Corrective est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement : ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement [ZWIN, 96]. La maintenance corrective représenté sous deux formes: la maintenance palliative, maintenance curative.

1. **La maintenance palliative** qui représente les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un système l'accomplissement provisoire d'une fonction requise. Appelée aussi dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'actions à caractère provisoire qui devront être suivies d'action curative [ZWIN, 96].
2. **La maintenance curative** représente les activités de maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un système dans un état spécifié lui permettant ainsi d'accomplir une fonction requise [ZWIN, 96], [BOUC, 98].

**2.4.2.2 Maintenance préventive:**

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. [ZWIN, 96].

Les activités correspondantes sont déclenchées selon :

- Un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usages (maintenance systématique) ;
- Et /ou des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle) [BOUC, 98], [HÉDI ,01]

#### **2.4.2.2.1 Les objectifs visés par la maintenance préventive :**

##### **a. Améliorer la fiabilité de matériel :**

La mise en œuvre de la maintenance préventive nécessite les analyses techniques du comportement du matériel .Cela permet à la fois de pratiquer une maintenance préventive optimal et de supprimer complètement certaines défaillances.

##### **b. Garantir la qualité des produits :**

La surveillance quotidienne est pratiquée pour détecter les symptômes de défaillance et veiller à ce que les paramètres de fonctionnement et de réglage soient respectés, ce qui permet d'éviter les aléas de fonctionnement et d'assurer des produits de qualité avec l'absence des rebuts.

##### **c. Améliorer l'ordonnancement des travaux :**

La collaboration entre le service de maintenance et de production permet de faciliter la tâche de la maintenance .Une bonne coordination prévoit un arrêt selon un planning défini à l'avance et prend en compte les impossibilités en fonction des impératifs de production.

##### **d. Assurer la sécurité humaine :**

La préparation des interventions de maintenance préventive ne consiste pas seulement à respecter le planning .Elle doit tenir compte des critères de sécurité pour éviter les imprévus dangereux.

##### **e. Améliorer la gestion des stocks :**

La maintenance préventive maîtrise les échéances de remplacement des organes ou pièces, ce qui facilite la tache de gestion des stocks.

##### **f. Améliorer le climat de relation humaine :**

Une panne imprévue est souvent génératrice de tension .Le dépannage doit être rapide pour éviter la perte de production et d'assurer une bonne entente entre le service de la maintenance et la production [HENG, 02].

**2.4.2.2.2 Les différents types de maintenance préventive :****a. Maintenance préventive systématique :**

La maintenance préventive systématique est une maintenance effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage [AFNOR], [HÉDI ,01], [BOIT et HAZ, 87]. La périodicité des remplacements est déterminée selon deux méthodes : la première est de type bloc et la seconde, de type âge.

La politique de remplacement de type âge suggère de remplacer l'équipement à la panne ou après  $T$  unités de temps de bon fonctionnement.

La politique de type bloc suggère de remplacer l'équipement après une période prédéterminée de temps  $T$ ,  $2T$ , etc. indépendamment de l'âge et de l'état du composant [HÉDI, 01].

**b. Maintenance préventive conditionnelle :**

La maintenance préventive conditionnelle est une maintenance subordonnée au franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien [AFNOR], [BOUC, 98]. Divers outils comme l'analyse de la vibration et l'analyse d'huile, permettent de détecter les signes d'usure ou de dégradation de l'équipement. Ceci s'effectue en mesurant, à chaque inspection, la valeur d'un paramètre de contrôle tel que l'amplitude de déplacement, de vitesse ou d'accélération des vibrations, le degré d'acidité, ou la teneur de particule solide dans l'huile. L'action ne se déclenche que lorsque le paramètre de contrôle dépasse un seuil déterminé empiriquement, fixé par le constructeur ou par les normes de santé et de sécurité au travail [HÉDI ,01].

**c. Maintenance prévisionnelle :**

La maintenance prédictive (ou prévisionnelle) est une maintenance préventive subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation du bien, permettant de retarder et de planifier les interventions [ZWIN, 96], [HÉDI ,01].

**d. Maintenance proactive :**

La maintenance proactive est une forme avancée de maintenance prévisionnelle consistant à déterminer les causes initiales des défaillances à partir de l'état de défaillance potentielle. Elle requiert une très bonne connaissance des mécanismes de ruine des matériels et des relations de cause à effet entre les symptômes externes et leurs cause matérielles [ZWIN, 96].

La figure (Fig 2.3) résume les différents types de maintenance décrits dans les paragraphes précédents

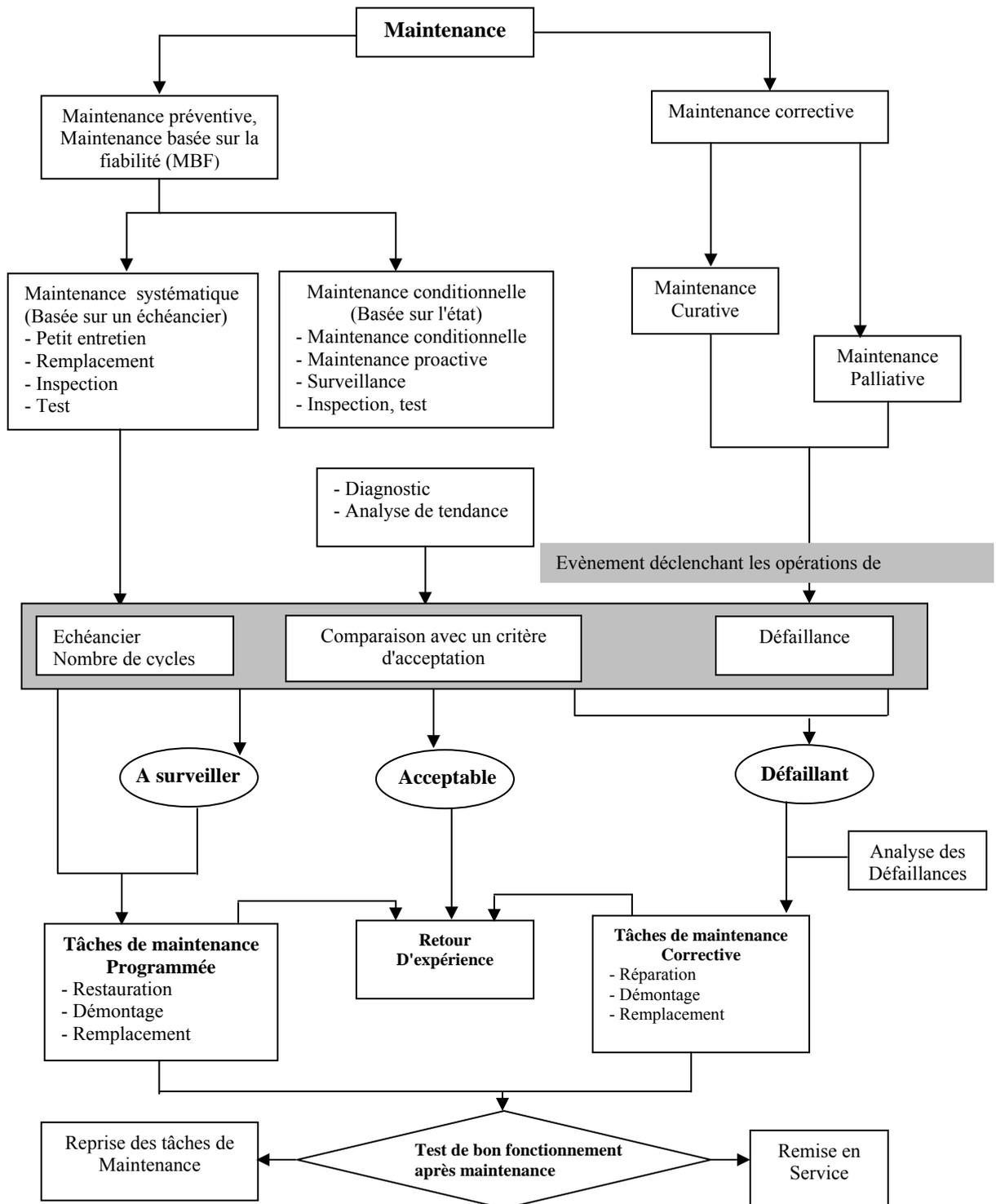


Figure 2.3 Diagramme des différents concepts de maintenance.

**2.5 Le système d'information et de mesure :**

De nombreuses informations ou indicateurs se révèlent nécessaires ou utiles pour la maintenance. Ces informations peuvent provenir de l'extérieur ou l'intérieur de l'entreprise.

**2.5.1 Informations externes sur les équipements de l'entreprise :**

Ce sont les documents remis par les constructeurs et, qui comportent [BOUC, 98] :

1. les documents de présentation des équipements, émis pour information préalable avant décision d'achat sont :
  - les fiches signalétiques,
  - les fiches techniques,
  - le schéma général de principe,
  - les plans d'ensemble.
2. les documents d'exploitation et de maintenance nécessaires à la maintenance et à la gestion de l'équipement, fournis à l'utilisateur lors de la livraison de cet équipement comportant :
  - les schémas fonctionnels,
  - les instructions d'installation,
  - les instructions d'utilisation,
  - le catalogue des pièces détachées de l'équipement,
  - les instructions pour les modifications.

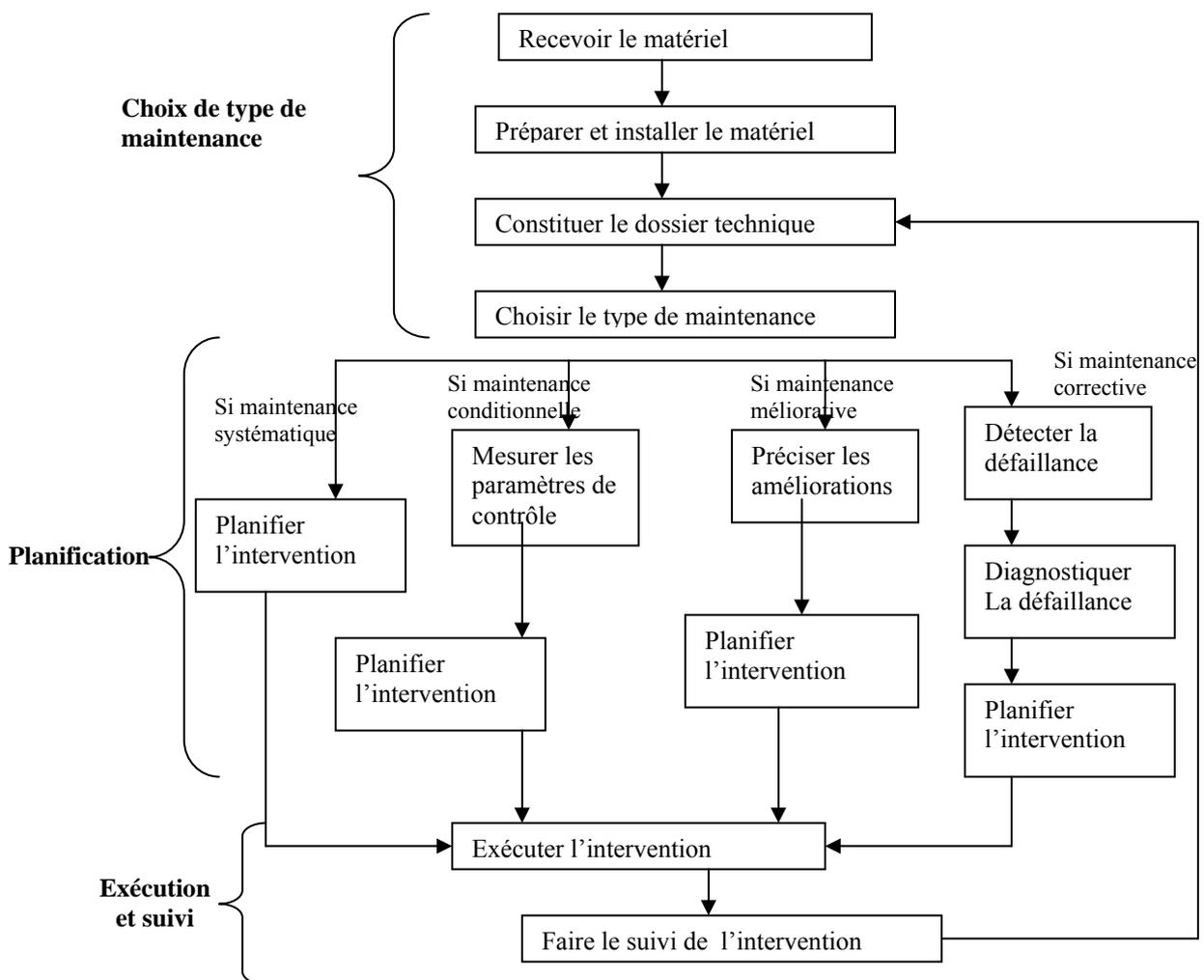
**2.5.2 Informations internes utiles pour la maintenance :**

Ces informations sont relatives à la documentation liée aux équipements et aux différents historiques.

1. documentation relative aux équipements : il s'agit de complément éventuel documents fournis par le constructeur pour faciliter les opérations de maintenance, établis par l'utilisateurs.
2. historiques des incidents, pannes et interventions : la constitution d'une banque de données relevant en particulier les incidents, interventions effectuées, causes, difficultés rencontrées s'avère particulièrement utile pour effectuer des études d'amélioration de la disponibilité d'équipements.

**2.6 Le système de gestion de la maintenance :**

Le cadre de référence du système de gestion de la maintenance comporte quatre étapes aussi importantes les unes que les autres (Fig 2.4). La première étape concerne la réception du matériel et la documentation. La deuxième est relative au choix du type de maintenance à effectuer en fonction des paramètres choisis. A partir de ce dernier, nous précisons les étapes du processus de maintenance telles que la planification des interventions, les procédures de détection des défaillances, l'exécution et le suivi de l'intervention. La dernière étape concerne la réalisation et le suivi de l'opération de maintenance [HÉDI ,01].



**Figure 2.4 :** Le système de gestion de la maintenance

## **2.7 La Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) :**

La gestion des différentes ressources du service de maintenance est l'un des aspects les plus importants qui font son efficacité. Cette gestion est aujourd'hui réalisée presque systématiquement de manière informatique. Le système informatique des entreprises est souvent lié à l'histoire de leur informatisation [MARM, 07]. Cette automatisation donne naissance au concept de la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur (G.M.A.O.).

Une G.M.A.O. se doit de prendre en charge, d'une part, l'ensemble des données et des méthodes liées à une organisation de maintenance, puis d'en tirer les indicateurs stratégiques nécessaires à la prise des bonnes décisions. D'autre part, elle se doit de répondre aux besoins quotidiens des hommes de la maintenance, c'est à dire permettre de réaliser des interventions sur des équipements avec le maximum d'efficacité.

### **2.7.1 Les différents modules de la GMAO :**

Une G.M.A.O. est constituée de différents modules dont les plus important sont :

- 1.** Le module « **Gestion des équipements** » qui permet la codification et la description des équipements, machines et installations. Ces derniers seront décomposés en plusieurs niveaux d'ensembles et de sous-ensembles. Un dossier technique par équipement doit être établi. Ces dossiers techniques doivent comprendre les plans de l'équipement, l'historique des réparations ainsi que les procédures et gammes de maintenance de ce dernier;
- 2.** Le module « **Demande d'intervention** » permet de saisir et de référencer les demandes d'intervention provenant des utilisateurs de matériel extérieurs à la maintenance ou déclenchées par l'occurrence d'un événement planifié dans un module de maintenance préventive (date de visite, relevé de compteur, incident capté par un superviseur).
- 3.** Le module « **Gestion des travaux** » qui a pour fonction de traiter les demandes d'intervention qui arrivent dans un portefeuille de travaux à préparer. Il s'agit de réserver les pièces de rechange, les divers matériels et l'outillage, de coordonner et de planifier, d'affecter les personnels selon les compétences requises et d'adapter les plannings aux charges. Ce module permet l'édition d'Ordres de Travail (OT) ou de Bons de Travaux (BT). Ces modules ont la possibilité d'accéder à des outils de gestion de projet pour aider la planification des gros travaux.
- 4.** Le module « **Gestion de la maintenance préventive** » permet d'établir un planning de maintenance préventive par ligne de production et par équipement, dont le déclenchement se fera sur la base d'un mode de déclenchement particulier.

5. Le module « **Retour d'expérience** » permet d'alimenter les historiques par la liste des causes et des modes de défaillances.

6. Le module « **Contrôle des budgets et des coûts** » permet d'établir des prévisions à partir des dépenses prévues pour les équipements ainsi que de connaître les coûts et suivre leur évolution par rapport au budget prévu.

## **2.8 Les nouvelles approches de la maintenance :**

### **2.8.1 La Maintenance Productive Total (TPM) :**

La méthode japonaise TPM (Maintenance Productive Total) est une méthode spécifique de maintenance qui vise à réduire les coûts de fabrication. Ses débuts datent des 70, mais elle n'a commencée vraiment à se développer qu'au début des années 80 sous l'égide de groupe JMA (Japan Management Association) [BOUC, 98].

La signification de la **TPM** s'explique ainsi :

**Maintenance** : maintenir en bon état (réparer, nettoyer, graisser et accepter d'y consacrer le temps nécessaire)

**Productive** : Essayer d'assurer tout en produisant ou en pénalisant le moins possible la production

**Total** : le terme "Total" de TPM a trois significations :

- Le rendement global des installations
- Un système global de réalisation
- Une participation de tout le personnel.

L'objectif de la TPM est que les équipements soient tels qu'ils ne tombent pas en panne, qu'ils soient faciles à inspecter, à réparer, à utiliser et qu'ils fonctionnent en toute sécurité. La TPM peut se résumer par sa volonté d'aboutir à la création d'une structure d'entreprise qui permette la recherche du rendement maximum du système de production, en évitant donc toutes pertes, afin d'obtenir zéro accident, zéro défaut, zéro panne sur la durée de vie du système de production [DUPU, 05].

Pour réaliser cet objectif, il est nécessaire de s'appuyer sur les huit piliers suivants :

1. éliminer systématiquement les causes de pertes pour améliorer le rendement des équipements;
2. mettre en place un système de maintenance autonome ;

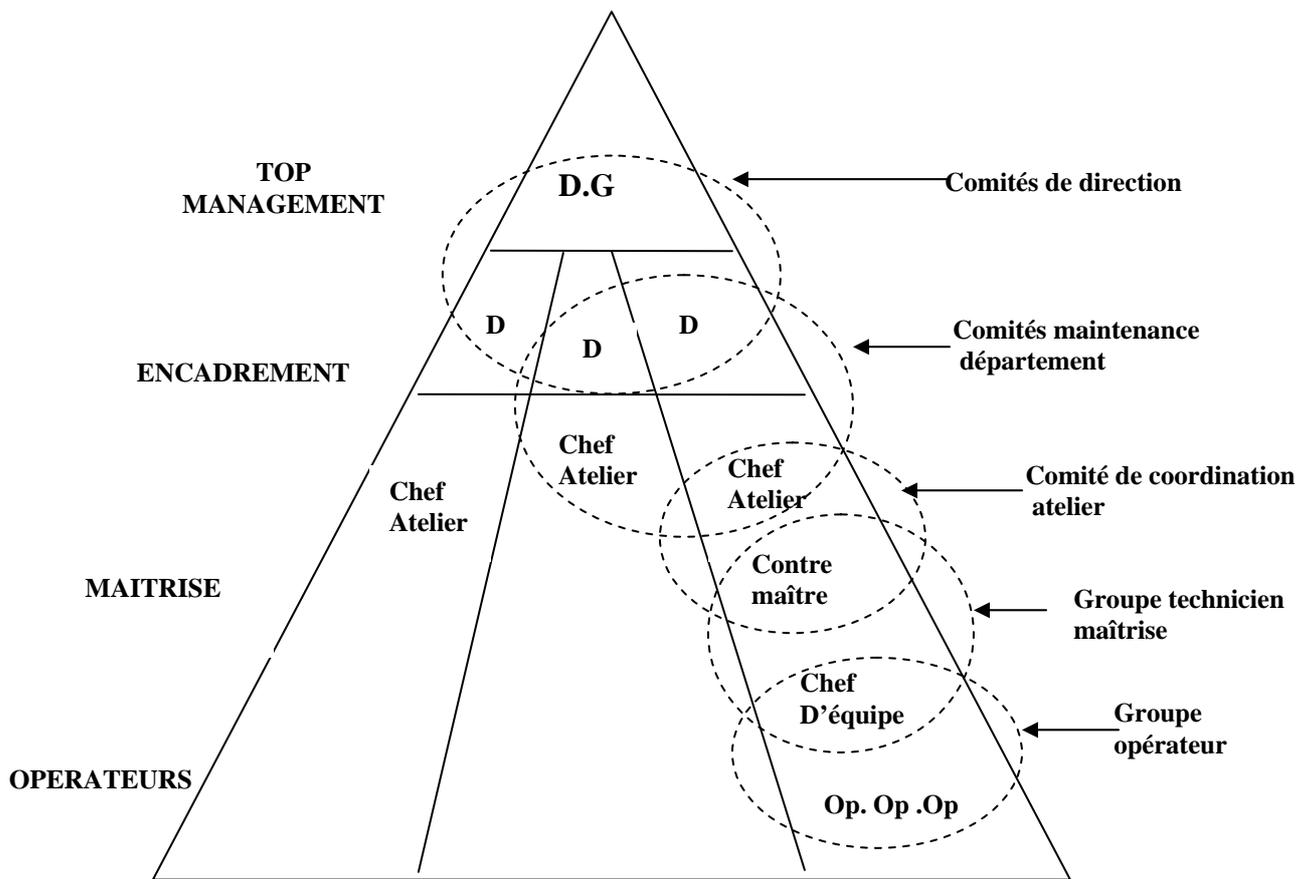
3. mettre en place un système de maintenance planifiée ;
4. former et entraîner aux techniques de production et de maintenance ;
5. mettre en place un système de conception et démarrage de nouveaux équipements ;
6. mettre en place un système de maintenance de la qualité des produits ;
7. mettre en place un système d'amélioration du rendement administratif ;
8. mettre en place un système de pilotage de la sécurité et de l'environnement.

Ces huit piliers vont permettre de réduire les six grands types de pertes qui réduisent le rendement des équipements [ZWIN, 96], [BOUC, 98], [DUPU, 05] :

1. pertes dues aux pannes ;
2. pertes dues aux changements de série et aux réglages ;
3. pertes dues à la marche à vide et au micro\_ arrêts ;
4. pertes dues au ralentissement et à la sous vitesse ;
5. pertes dues aux défauts et aux retouches des produits ;
6. pertes dues aux redémarrages et au rendement matière.

L'implantation du concept de la T.P.M doit s'effectuer progressivement, tel qu'exposé par [BOUC, 98]. Il propose une période de deux à trois ans aux membres de l'usine (incluant travailleurs et administrateurs) pour adopter cette philosophie.

La figure (Fig 2.5) schématise la structure de production de la T P M est ces divers comités et groupe de travail.



**Figure 2.5 :** Structure de la promotion de la T P M

### 2.8.2 La maintenance basée sur la fiabilité (MBF) :

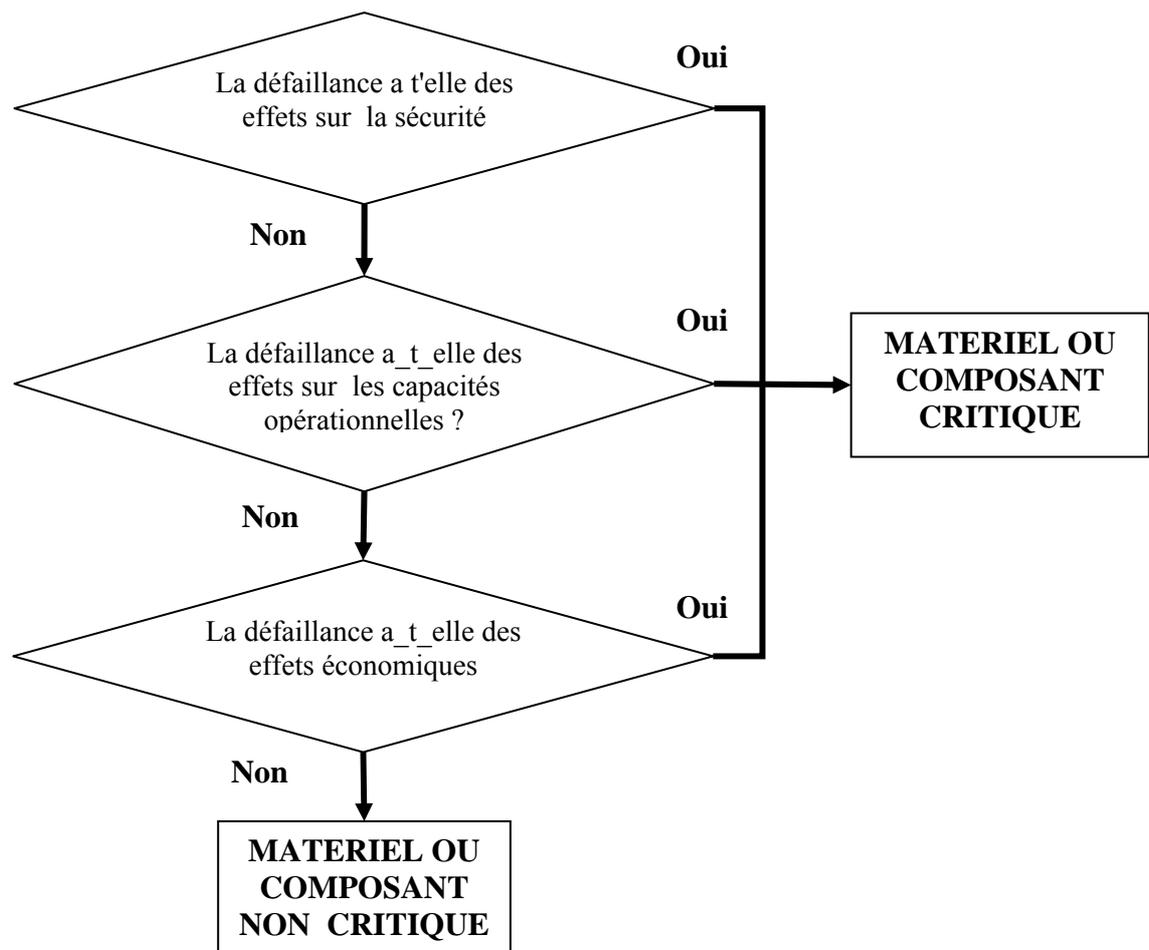
La maintenance basée sur la fiabilité ou RCM (Reliability Centred Maintenance) a vu le jour dans l'industrie aéronautique au cours des années 60. À la fin des années 50, le coût des activités de maintenance dans cette industrie était devenu exorbitant et a justifié une recherche spéciale sur l'efficacité de ces activités [HÉDI ,01].

La MBF correspond à une politique de maintenance, qui identifie d'abord les matériels critiques dont les conséquences des défaillances fonctionnelles sont importantes pour les objectifs de l'entreprise (sécurité, disponibilité, coûts, maintenabilité, etc.) [ZWIN, 96].

[HÉDI , 01] et [MOUB ,97], définit la maintenance basée sur la fiabilité comme un processus qui détermine les besoins en maintenance du composant dans son contexte opérationnel. La définition d'un programme MBF se résume en deux étapes principales :

- L'identification des matériels critiques
- La sélection des tâches de maintenance

**1. Recherche des matériels critiques :** la recherche des matériels critiques d'une installation industrielle repose sur la détermination du cheminement et des conséquences de leurs modes de défaillances fonctionnelles sur les fonctions principales assurées par l'équipement. La figure (Fig 2.6) schématise quelques critères de sélection des matériels critiques [ZWIN, 96].



**Figure 2.6 :** Exemple de critères de sélection des matériels critiques

Les outils les plus utilisés dans cette phase sont l'analyse fonctionnelle, les AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets) fonctionnelles ou matérielles et les AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs Criticité).

**2. Sélection des tâches de maintenance :** Pour les matériels critiques, le contenu du programme de maintenance se compose de deux groupes de tâches.

- Un groupe de tâches de maintenance préventive prévue pour être exécuté à des intervalles spécifiques. Leurs objectifs sont d'identifier et de prévenir la dégradation des

niveaux intrinsèques de sécurité et de fiabilité, en employant un ou plusieurs des moyens suivants :

- Lubrification et entretien,
  - Surveillance et fonctionnement,
  - Vérification opérationnelle,
  - Mise au rebut,
  - Contrôle et vérification fonctionnelle
- Le groupe de tâches de maintenance non programmées qui ont leurs origines dans :
- Les rapports traitant des défauts
  - L'analyse des données

L'objectif de ce groupe est de remettre le matériel dans un état acceptable [ZWIN, 96].

### **2.8.3 La Télémaintenance et la E-maintenance :**

Avec les évolutions récentes des équipements industriels, la maintenance manipule de plus en plus d'informations. Ces informations sont nécessaires à la réalisation des opérations de maintenance et sont de différentes natures :

- vecteurs d'état renseignant sur le processus à contrôler,
- informations issues de la connaissance d'experts,
- informations sur le contexte du processus à maintenir,

Pour que ces informations soient correctement reçues par les personnes concernées, la communication est indispensable. Grâce aux technologies de l'information et de la communication (TIC), le problème de communication est résolu et en plus les TIC accélèrent l'accès aux données, informations et connaissances nécessaires aux activités de maintenance. Ces concepts donnent naissance à une maintenance évoluée basée sur les outils offerts par les TIC : la télémaintenance et la E\_maintenance.

#### **2.8.3.1 La Télémaintenance :**

La télémaintenance (en anglais : remote maintenance) représente la maintenance d'une unité fonctionnelle, assurée par télécommunication directe entre cette unité et un centre spécialisé [RACO, 06].

Elle est basée sur le principe suivant : les capteurs, mesurant des grandeurs intimement liées à l'état de la machine, sont reliés à une centrale de surveillance qui enregistre toutes les alarmes et les mesures [HÉDI ,01].

La télémaintenance s'impose progressivement pour toutes les machines ou les chaînes de production pilotées par un microprocesseur : celui-ci concentre en effet toutes les informations provenant des multiples capteurs nécessaires au contrôle du processus et il peut être facilement interrogé à distance. Il est également possible depuis le point de contrôle de modifier les paramètres de réglage ainsi que les programmes qui le pilotent [RACO, 06].

#### **2.8.3.1.1 Domaines d'application :**

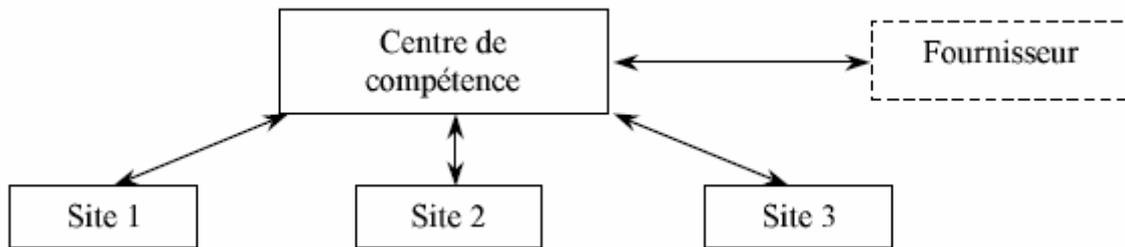
Les domaines d'application de la télémaintenance peuvent être très variés :

- pour l'armée : la télémaintenance de l'équipement électronique des soldats, assistance technique et coopérative à distance, transfert des connaissances. Les communications se font via Internet, réseau de satellites
- dans le domaine médical : télé diagnostique des patients, télémaintenance des matériels, télésurveillance du patient. Ceci permet d'économiser de coûteuses formations des techniciens biomédicaux ou d'avoir rapidement un avis éclairé en cas de doute sur son propre diagnostic.
- Dans l'industries : la télémaintenance s'applique à des systèmes (machines, automates...), reliés par réseaux de télécommunications à des centres de maintenance. En cas de panne ou de défaillance de ces systèmes, le centre de maintenance est automatiquement averti et peut déclencher certaines opérations à distance [SAIN, 03].

#### **2.8.3.1.2 Systèmes de télémaintenance :**

Tous les systèmes de télémaintenance possèdent des points communs dans leur organisation. Un système de télémaintenance est toujours constitué d'au moins deux parties distinctes (Fig 2.7), [IVAN et al, 03] :

- Le centre expert de maintenance, appelé aussi le centre de compétence;
- Les sites à maintenir.



**Figure 2.7.** Schéma d'interaction entre les différents composants d'un système de télémaintenance.

Le système de télémaintenance proposé par [SAIN, 03], et [HÉDI ,01] est constitué de quatre types de ressources :

- les ressources humaines,
- les ressources matérielles,
- les pièces de rechange,
- le système informatique.

Il existe deux grandes catégories d'actions dans les systèmes de télémaintenance :

1. l'aide en ligne (sans déplacement de ressources) quand le problème n'est pas très grave et peut être corrigé par un opérateur assisté à distance
2. l'action, qui demande l'intervention d'un technicien de maintenance [IVAN et al ,03].

### **2.8.3.1.3 Les étapes d'un système de télémaintenance :**

Nous résumons toutes les tâches constituant un système de télémaintenance dans les points suivants :

1. Contrôle et supervision (tester les capteurs),
2. Consulter la liste du personnel habilité,
3. Sélection du personnel,
4. En cas d'anomalie, avertir le serveur central,
5. Alerte au personnel de maintenance local et distant,
6. Intervention de l'équipe de maintenance pour régler ou réparer le capteur ou l'appareillage,

7. Le message SMS reçu par l'équipe de maintenance, des consignes peuvent être envoyées uniquement par cette simple liaison SMS,
8. L'équipe de maintenance peut également répondre par : téléphone, Internet, mobile,
9. L'opérateur de maintenance présent sur site peut faire un dépannage en local [MELL et al, 05].

#### **2.8.3.1.4 Processus de la télémaintenance :**

La télémaintenance permet d'une part, le suivi et l'enregistrement des données sur chaque machine pour des fins de comparaison et d'autre part, la détection d'aléas de fonctionnement. L'agent de surveillance qui constate une évolution d'une dégradation ou l'apparition d'un défaut, a la responsabilité de mettre hors service, de consigner la partie lésée de l'installation et d'alerter les agents d'intervention [HÉDI, 01].

Cependant le processus de Télémaintenance, peut être divisé en trois processus complémentaires dont nous citons le dépannage en local, le dépannage à distance et l'intervention physique nécessaire [MELL et al,05].

#### **2.8.3.2 La E-maintenance :**

Depuis l'émergence des nouvelles technologies et de la communication (NTIC), les concepts de la Télémaintenance ont évolué pour aboutir à la E-maintenance.

La E-maintenance est un concept lié au principe de web services, de coopération et de partage des connaissances. Elle intègre le principe de base de la Télémaintenance en lui associant une dimension forte, constituée par la coopération au niveau des informations mais aussi des hommes, des services (ingénierie, exploitation, maintenance, sûreté, achats, comptabilité, ...) et des sociétés (client / fournisseur, inter fournisseurs, inter clients, ...) [RACO, 06], [MAHI et al, 06].

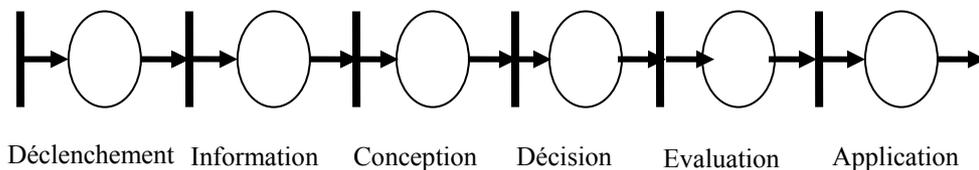
### 2.8.3.2.1 Système de la E\_maintenance :

Un système de E-maintenance est composé de deux parties principales qui sont en interaction : le ou les centres expert(s) et le ou les sites à maintenir (Fig 2.9). Les experts intervenants reçoivent des demandes d'intervention et adoptent un objectif commun qui est « la résolution d'un problème de maintenance – diagnostic d'une panne par exemple » vis-à-vis duquel ils vont prendre des décisions et par suite des actions [CHEL et al, 06].

Pour cela, ils perçoivent, analysent, décident et agissent. Tout cela en communiquant et dans le cadre d'un processus de coopération.

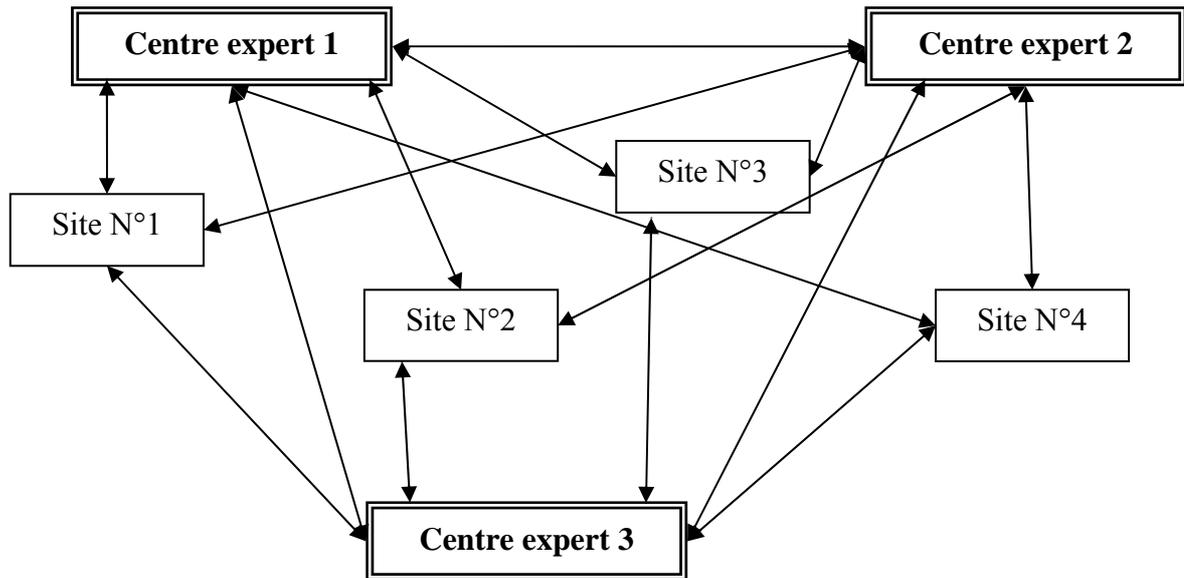
Un membre coopérant (expert) est assimilé à un centre de décision représenté par le réseau de Trentesaux de la manière suivante [QUEU et al, 03]:

Ce modèle représente six phases comme indique la figure (Fig 2.8) comme suit :



**Figure 2. 8** Modèle d'un centre de décision

- *Phase de détection ou de déclenchement* : dans cette phase l'individu reçoit une requête l'incitant à intervenir et à coopérer. Il se rend compte du problème au cours de cette phase.
- *Phase d'information ou de renseignement*: c'est la phase durant laquelle l'individu cherche dans ses propres connaissances ou demande des informations à d'autres individus ou centres d'informations concernant le problème posé et le système concerné.
- *Phase de conception* : Phase durant laquelle l'individu conçoit une ou plusieurs solutions tout en tenant compte des différentes contraintes.
- *Phase de décision*: Pendant cette phase l'individu produit une liste de solutions possibles pour l'étape suivante.
- *Phase d'évaluation*: Dans cette phase, l'individu procède à l'évaluation des différentes solutions et effectue son choix.
- *Phase d'application* : Phase durant laquelle l'individu transmet, applique ou fait appliquer la solution choisie.



**Figure 2.9:** Interactions entre les composants d'un système de E\_maintenance.

#### 2.8.3.2.2 Processus de la E\_maintenance :

En situation de panne, une intervention de télémaintenance comme indique la figure (Fig 2.10) s'effectue en deux étapes, à savoir [MAHI et al, 06] :

**Première étape :** recherche automatique de personnes

Un outil de E-maintenance coopératif qui permet à des personnels de maintenance extérieurs au lieu de la panne de participer à la résolution du problème. Les clients peuvent solliciter le personnel de maintenance ou l'expert (local ou distant) par une liaison établie par le serveur (envoi d'une alarme) avec le personnel préenregistré et le mieux habilité à intervenir (en fonction de ses compétences, de ses droits, des outils dont il dispose, ...)

**Deuxième étape :** processus de dépannage

Un outil de dépannage proposé est un système expert de diagnostic des pannes des dispositifs appartenant aux installations industrielles des clients. Ce dépannage peut se faire en local, ou à distance à partir d'un poste fixe sur Internet en établissant une connexion initiée par le personnel de maintenance qui a reçu l'alerte et qui permettra la transmission de données informatiques et l'échange de données dans un contexte client serveur. Le système expert va poser une série de questions à l'utilisateur afin d'essayer de détecter la cause de la panne et proposer une solution possible [MAHI et al, 06], [CHEL et al, 06].

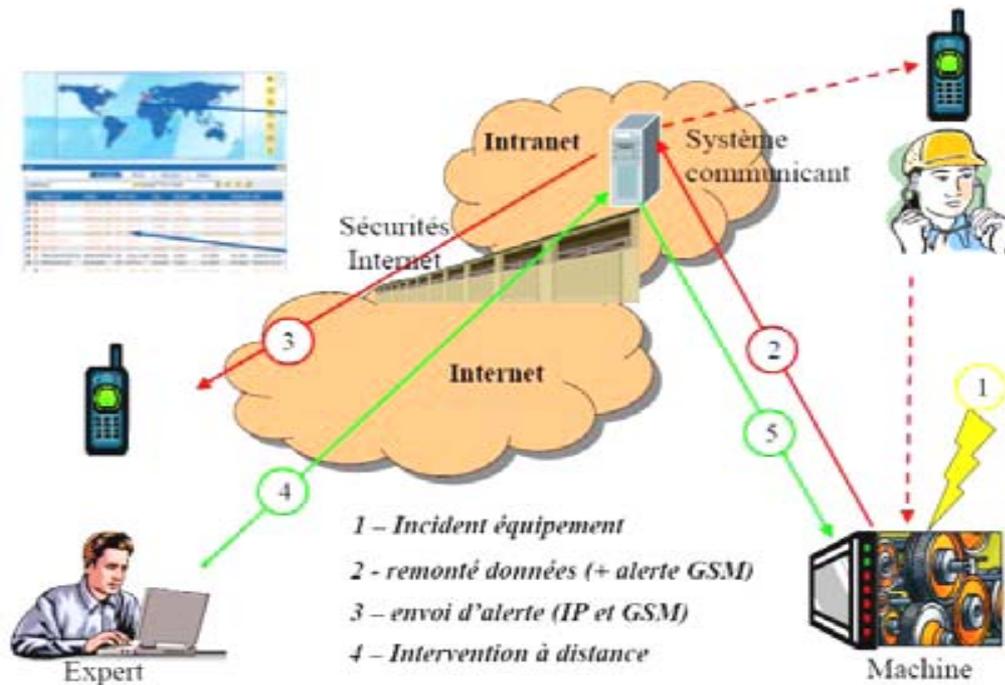


Figure 2.10 : Fonctionnement de la E\_maintenance

### 2.8.3.3 La maintenance distribuée :

#### 2.8.3.3.1 Concept de la maintenance distribuée :

La maintenance distribuée est définie comme une approche de mise en oeuvre de la maintenance basée sur l'analyse des activités et des ressources selon une approche réseau. L'architecture du système résultant comprend un ensemble de processeurs (humains, matériels et informationnels), internes ou externes à l'entreprise, qualifiés pour réaliser un ensemble de processus [MARM, 07].

D'après [HÉDI, 01], cette définition utilise une terminologie (processus, processeurs). Selon [LEFR,98], un processus est un ensemble d'opérations ou d'actions, reliées selon certaines contraintes de précédence, qui utilisent des intrants, réalisées par des ressources, initiées par des stimuli, de façon à créer des extrants qui ont de la valeur pour le client. [VERN, 99], quant à lui, définit un processus comme une séquence, partiellement ordonnée, d'étapes (sous processus ou activités), déclenchée par un événement pour atteindre un but fixé. L'activité est une étape élémentaire nécessitant du temps et des ressources pour l'exécution de chacune de ses opérations fonctionnelles. Le processeur est un ensemble de ressources nécessaires à la réalisation du processus, il comprend les ressources humaines, les ressources matérielles, et le système d'information.

**2.8.3.3.2 Avantages de la maintenance distribuée :**

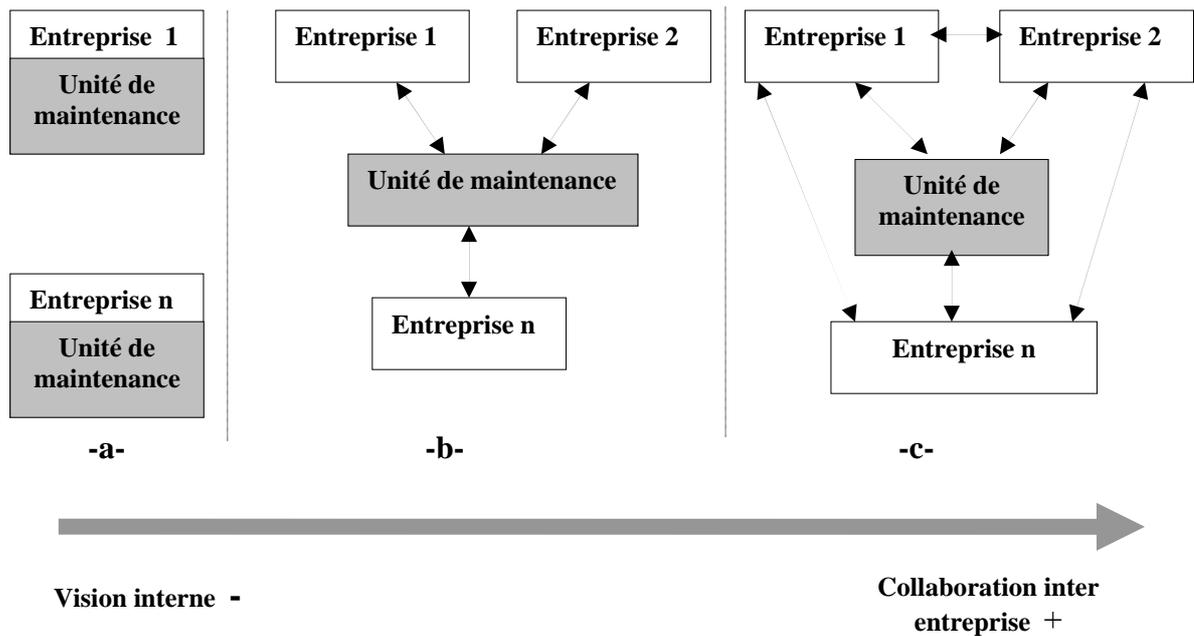
Plusieurs avantages peuvent être tirés de l'implantation du concept de la maintenance distribuée dans une entreprise manufacturière. En appliquant ce concept, l'entreprise orchestre, d'une manière plus intelligente, les actions du système de maintenance, réalise le processus de maintenance rapidement et efficacement, profite d'un système d'information adapté aux besoins et d'un suivi rigoureux des opérations. Ce qui lui permet, d'une part, d'avoir une architecture cohérente et efficace du système de maintenance et d'autre part de maîtriser l'outil de production. En outre, la maintenance distribuée permet de diminuer les arrêts aléatoires, de maîtriser la chaîne logistique, de gérer intelligemment les ressources humaines et matérielles et de profiter à la fois d'une économie d'échelle, d'une expertise externe et de la flexibilité.

**2.8.3.3.3 Système de la maintenance distribuée :**

La maintenance distribuée supporte différentes structures ou visions de l'entreprise comme la vision réseau qui n'existait pas auparavant. En effet, l'entreprise peut faire partie d'un réseau d'entreprises qui se partagent une unité de maintenance. La figure (Fig 2.11) montre la création d'une unité de maintenance leader à partir des unités de maintenance des entreprises manufacturières.

L'unité de maintenance permet d'assurer la productivité de l'entreprise qui possède plusieurs sites ou unités d'exploitation en minimisant le nombre de ressources, et par conséquent garantir son profit global. Ce gain est obtenu en réalisant un compromis entre la disponibilité et l'efficacité des équipements à améliorer, le coût global de possession des équipements à réduire et les coûts des activités de maintenance à optimiser.

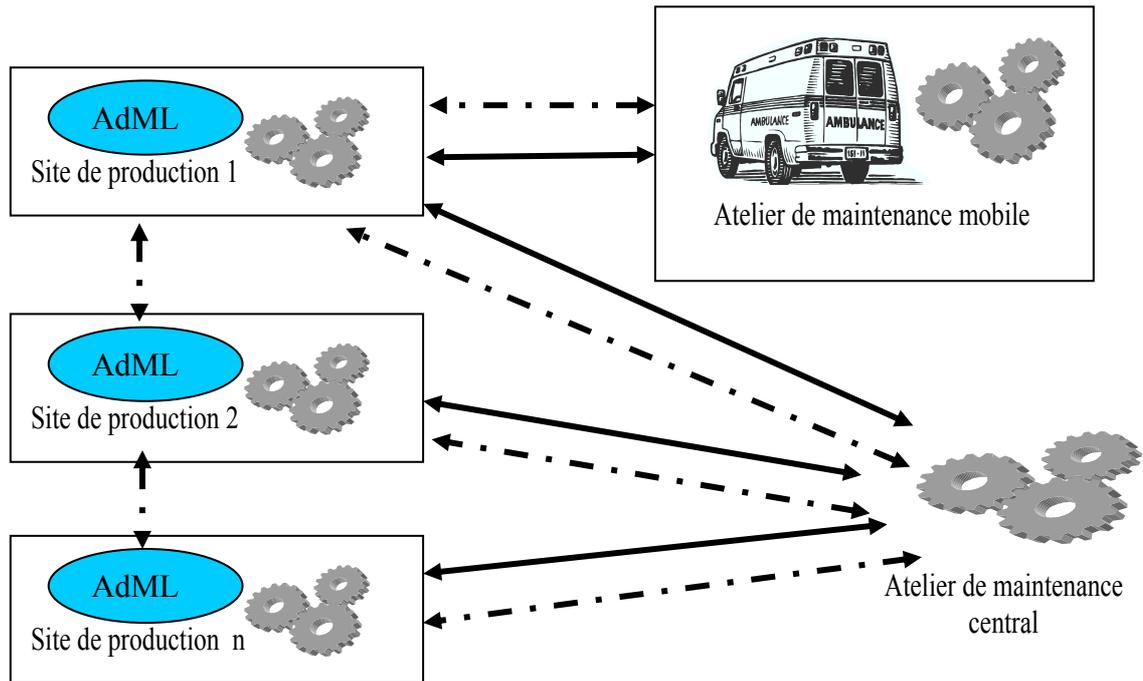
Par analogie au figure (Fig 2.11.b), [SIME et al, 06], ont proposé une maintenance centralisée qui permet d'assurer la cohérence de l'ensemble des activités diversifiées, éparpillées entre les sites de production et l'atelier central comme indique la figure( Fig 2.12). Cette approche est inspirée de l'approche d'une maintenance intégrée et montre l'existence d'ateliers de maintenance dans les sites de production AdML (Atelier de Maintenance Local), d'un AdM central et d'un AdM mobile. Ces AdMs ne correspondent pas aux mêmes niveaux de maintenance. Actuellement, dans une logique de TPM, on a trois niveaux de maintenance.



**Figure 2.11:** intensité croissante du lien entre l'unité de maintenance et l'entreprise

Une fois cette unité de maintenance leader installée et que les liens entre l'unité de maintenance et les entreprises commencent à prendre forme, d'autres liens entre les différents membres du réseau seront établis (Fig 2.11.c). En effet, si pour un processus de maintenance déterminé, l'unité de maintenance juge que la ressource humaine existant dans l'entreprise X est partiellement inexploitée et est qualifiée à réaliser un processus de maintenance dans l'entreprise Y, alors elle l'affecte à cette tâche.

De même, si l'unité de maintenance a besoin pour la réalisation d'un processus de maintenance dans une entreprise W, d'une ressource matérielle existant et partiellement inexploitée dans l'entreprise T, alors l'affectation sera faite [HÉDI, 01].



**Figure 2.12:** Illustration de schéma global de (Atelier central, atelier mobile et site de production)

## 2.9 Conclusion:

La recherche de l'accroissement des performances des unités de production, de plus en plus variés et complexes, conduit à transférer sur la fonction maintenance la responsabilité de garantir la disponibilité de ces systèmes. La maintenance est l'une des composantes qui influence les performances de l'entreprise.

Le développement des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), facilite la mise en place de plusieurs stratégies de maintenance : télémaintenance, E-maintenance, maintenance distribuée, etc. Celles-ci ont tendance à externaliser la fonction maintenance pour mieux se concentrer sur leur activité principale.

De nos jours, la maintenance permet non seulement l'identification réactive des éléments défaillants, mais aussi la prévision des pannes. Les services de maintenance réalisent principalement deux types de tâches : les tâches de maintenance corrective et de maintenance préventive. Ces tâches ont pour principale différence que les tâches préventives sont connues pour un horizon déterminé alors que l'arrivée des tâches correctives n'est pas prévue.

L'affectation des tâches ainsi que l'organisation dans le temps de l'activité des ressources humaines du service de maintenance permet au service de maintenance de gagner en efficacité. Cette problématique, rencontrée par les services de maintenance, concerne l'affectation et l'ordonnement des tâches de maintenance aux ressources humaines. Nous la détaillerons dans le chapitre suivant.

---

# CHAPITRE III

## *Ordonnancement des activités de la Maintenance*

---

### **3.1 Introduction :**

L'ordonnancement est un champ d'investigation qui a connu un essor important ces dernières années, tant par les nombreux problèmes identifiés que par l'utilisation et le développement de nombreuses techniques de résolution. Les problèmes de l'ordonnancement se rencontrent souvent dans le milieu industriel. Il s'agit de répartir un ensemble de travaux sur des machines ou ateliers de production en respectant au mieux un ensemble de contraintes (technologiques, temporelles etc.), et en cherche à optimiser un ou plusieurs objectifs (cadence de production, délai, coûts, etc.),

Cependant, les machines subissent régulièrement des interventions de maintenance afin d'éviter des dysfonctionnements ce qui ne les empêche pas de tomber en panne et entraîner un arrêt machine. Les arrêts accidentels des machines sont considérés comme une source de perturbation et de perte de productivité et engendrent un coût supérieur à celui d'un arrêt prévu.

La fonction maintenance est donc directement impliquée dans le rendement de l'atelier au même titre que la production. En effet une politique de maintenance des machines de l'atelier est nécessaire pour planifier les interventions régulières (maintenance préventive) sur les machines et interventions aléatoires (maintenance corrective). Ces interventions sont exécutées par des ressources polyvalentes disponibles en quantités limitées. Ceci constitue un problème complexe à résoudre.

Ce chapitre commence donc par une présentation des notions de base d'ordonnancement et aux problèmes d'ordonnancement. Dans la seconde partie, nous présenterons quelques méthodes dédiées aux problèmes d'ordonnancement des activités de la maintenance, étudié dans la littérature, et les utilisées lors de la construction des solutions d'ordonnancement, qui seront utilisées dans le chapitre IV.

### **3.2 Définition de l'ordonnancement :**

L'ordonnancement est une discipline scientifique étudiée depuis les années 1950 (S. Johnson, 1954; J. Jackson, 1955) qui « 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 » [LOPE et ROUB, 01], [DUPU, 05].

Par abus de langage, le terme "ordonnancement" est utilisé pour désigner la solution d'un problème d'ordonnancement. La solution d'un problème d'ordonnancement présente pour chaque tâche du problème les dates du début de leur exécution et les ressources auxquelles elles seront affectées. Un problème d'ordonnancement peut être traité en fonction d'un ou plusieurs objectifs ou critères de performance (durée des tâches, somme des retards, équilibrage de la charge,...) [MARM, 07].

L'ordonnancement est la programmation dans le temps de l'exécution d'une série de tâches (ou activités, opérations) sur un ensemble de ressources physiques (humaines et techniques), en cherchant à optimiser certains critères, financiers ou technologiques, et en respectant les contraintes de fabrication et d'organisation [ESQU et LOPE, 99], [LOPE et ROUB, 01].

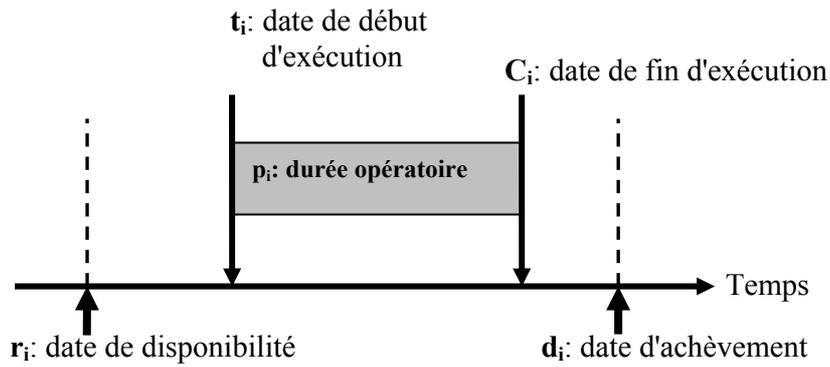
### **3.2.1 Les tâches :**

Une tâche  $i$  est une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début  $t_i$  ou de fin  $C_i$ , dont la réalisation est caractérisée par une durée  $P_i$  (on a  $C_i = t_i + P_i$ ) et par l'intensité  $a_i^k$  avec laquelle elle consomme certains moyens  $k$ , ou ressources. Pour simplifier, on supposera que pour chaque ressource requise, cette intensité est constante durant l'exécution de la tâche [ESQU et LOPE, 99], [LOPE et ROUB, 01]. La figure (Fig 3.1) schématise ces caractéristiques.

### **3.2.2 Notations:**

L'ordonnancement consiste donc à organiser dans le temps la réalisation de tâches sur des ressources appelées machines. Par convention, une tâche est numérotée par  $i$ . Les notations en référence à une tâche  $i$ , que nous utilisons dans ce travail, sont celles que l'on retrouve couramment dans la littérature. La présentation de celles-ci est nécessaire pour la compréhension de la suite:

- $p_i$  : durée opératoire de la tâche  $i$  (*processing time*)
- $r_i$  : date de disponibilité de la tâche  $i$  (*release date*). Elle correspond à la date avant laquelle la tâche ne peut pas commencer,
- $d_i$  : date d'achèvement souhaitée de la tâche  $i$  (*due date*),



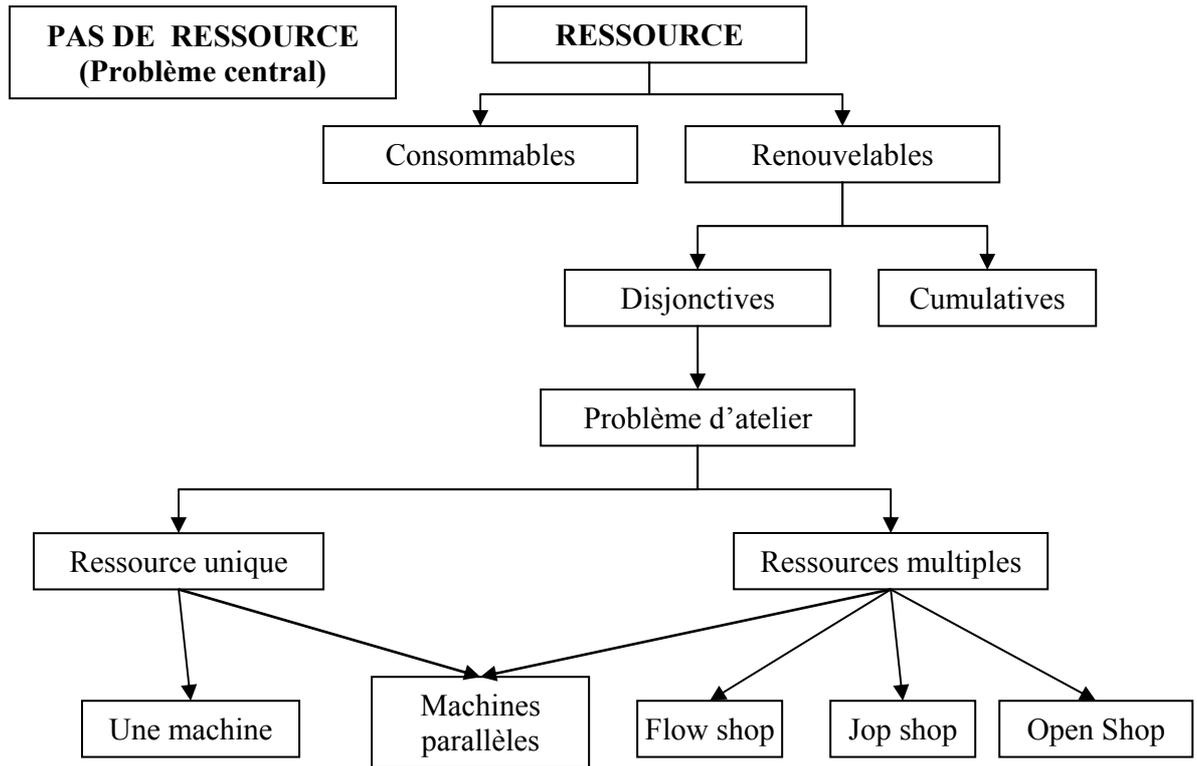
**Figure 3.1:** caractéristique d'une tâche

Mais aussi à des variables qui sont les suivantes :

- $t_j$  ( $i = 1 \dots n$ ) : date de début de traitement de la tâche  $i$  (aussi appelée date de planification),
- $C_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) : date de fin d'exécution de la tâche  $i$  (*completion time*),
- $T_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) : retard de la tâche  $i$  (*tardiness*),  $T_i = \max \{0, C_i - d_i\}$ ,
- $U_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) : Booléen indiquant de retard de la tâche  $i$ ,  $U_i = 0$  si  $C_i < d_i$ ,  $U_i = 1$  sinon.

### 3.2.3 Les ressources :

Une ressource  $k$  est un moyen technique ou humain requise pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée, sa capacité  $A_k$  (supposée constante). Plusieurs types de ressources sont à distinguer [ESQU et LOPE, 99], [LOPE et ROUB, 01] comme l'indique la figure (Fig 3.2) :



**Figure 3.2** : typologie par les ressources des problèmes d'ordonnancement [ESQU et LOPE, 99]

Une ressource peut être renouvelable, comme c'est le cas pour les hommes, les machines, l'outillage,...., c'est à dire qu'elle peut être utilisée et qu'une fois la tâche terminée, elle est à nouveau disponible. Mais elle peut aussi ne pas l'être, on parle alors de ressource consommable telle que la matière première, les produits d'entretien ou encore les budgets.

Une ressource est de plus doublement contrainte si son utilisation instantanée et sa consommation globale sont limitées. Si une ressource ne peut exécuter qu'une seule tâche à la fois elle est dite disjonctive (ou non partageable) comme c'est le cas pour une machine outil ou un robot manipulateur. Dans le cas où une ressource pourrait être utilisée dans le traitement de plusieurs tâches simultanément, comme dans le cas où plusieurs ressources soit utilisées pour la même tâche, on parle de ressource cumulative (ou partageable) [LOPE et ROUB, 01].

### 3.3 Représentation :

La façon la plus courante et la plus simple de représenter un ordonnancement est d'utiliser un diagramme de Gantt, c'est ce que nous allons décrire dans la partie suivante.

Le diagramme de Gantt est un outil qui a été proposé en 1917 et qui permet de représenter la planification de tâches nécessaires à la réalisation d'ordonnancement. Pour un

atelier, celui-ci sera composé de plusieurs lignes horizontales, représentant chacune un équipement ou une machine. L'axe horizontal représente le temps. Les tâches seront quant à elles représentées par des barres d'une longueur proportionnelle à leur durée et seront positionnées sur la ligne correspondant à l'équipement sur lequel elles se dérouleront. On observera donc sur le diagramme l'occupation des machines, l'enchaînement des tâches sur celles-ci ainsi que les dates de début et de fin de chaque opération. L'exemple donné sur la figure (Fig 3.3) représente des tâches affectées non pas à des équipements mais à des ressources humaines. Cela correspond à ce que l'on pourrait observer dans le cadre d'un atelier de maintenance où cinq tâches sont affectées à la ressource (Equipe). Les dates de début et de fin des différentes tâches sont donc lisibles sur l'axe des abscisses.

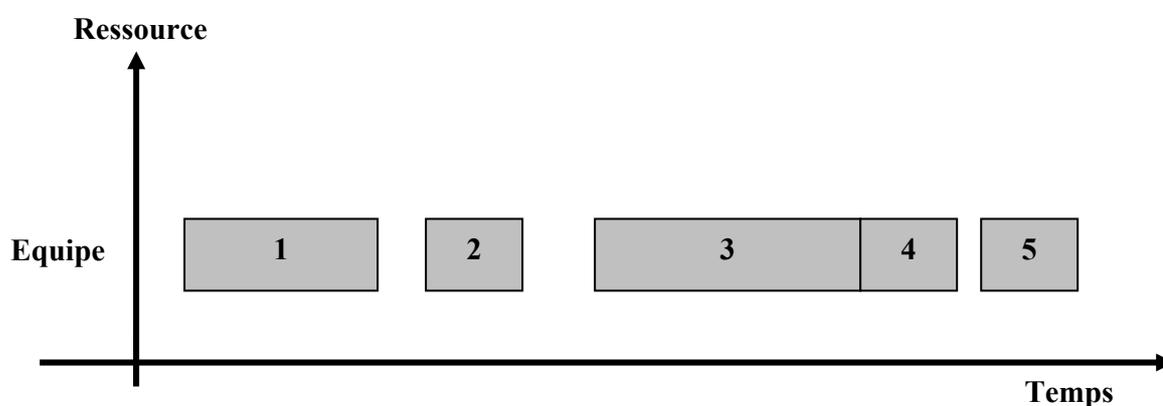


Figure 3.3: Exemple de diagramme de Gantt

### 3.4 Les contraintes :

Une contrainte exprime des restrictions sur les valeurs que peuvent prendre conjointement une ou plusieurs variables de décision (variables des décisions sur le temps et variable d'affectation des ressources) [ESQU et LOPE, 99].

On peut distinguer deux grandes catégories de contraintes : temporelles, et de ressources. Le premier type concerne les délais de fabrication imposés, issues généralement d'impératifs de gestion et relatives aux dates limites des tâches et au respect de positionnement entre tâches par exemple les gammes de fabrication des produits dans un atelier.

Le deuxième type de contraintes concerne la limitation de la quantité de ressources de chaque type. Ces contraintes distinguent les différents types de ressources, qui peuvent être disjonctives (elles n'exécutent qu'une seule tâche à la fois), ou cumulatives (elles peuvent exécuter plusieurs tâches en parallèle) [ESQU et LOPE, 99], [LOPE et ROUB, 01].

### 3.5 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 [LETO, 01]. D'une manière générale, on distingue plusieurs classes d'objectifs concernant un ordonnancement:

- 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 [ESQU et LOPE, 99], [LOPE et ROUB, 01].

### 3.6 Typologie des problèmes d'ordonnancement :

« Le problème d'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 » [LOPE et ROUB, 01].

Les différents problèmes que l'on rencontre en ordonnancement dépendent principalement des machines et de l'enchaînement des opérations. La notation qui permet d'identifier de manière synthétique et précise le type de problème abordé [ESQU et LOPE, 99] est décrit par le triplet  $\alpha|\beta|\gamma$  où :

- $\alpha = \alpha_1\alpha_2$  décrit les caractéristiques des machines ;  $\alpha_1$  représente le type (par exemple : 1, P, F, J, respectivement pour une machine, machines parallèles, flow shop ,job shop)et  $\alpha_2$  est le nombre des machines ;
- $\beta$  est l'ensemble des contraintes

- $\gamma$  désigne le (ou les) critère(s) à optimiser. Implicitement, le premier type de problème rencontré est alors le problème à une machine

### 3.6.1 Les problèmes à une machine

Ce type de problème se caractérise par le fait que l'on ne dispose que d'une ressource pour traiter un ensemble de tâches. Cette ressource ne peut effectuer le traitement que d'une tâche à un instant donné. Chaque tâche n'est, quant à elle, composée que d'une opération. Ce type de problème consiste à déterminer la séquence optimale de passage de  $n$  tâches sur une machine afin d'obtenir des résultats au regard d'un critère donné. Parmi les problèmes rencontrés dans un environnement à une machine, on peut citer les problèmes de minimisation du retard maximum, du nombre de tâches en retard, de la somme des retards,.. [MARM, 07].

### 3.6.2 Les problèmes à machines parallèles :

Ce type de problème consiste à ordonnancer un ensemble de tâches, sur un ensemble de ressources en parallèle. On distingue cependant trois sous-classes de problèmes

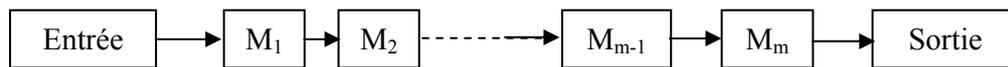
- Machines identiques ( $P$ ) : il y a  $m$  machines identiques en parallèle. Une tâche  $j$  requiert une opération unique qui peut être réalisée sur n'importe laquelle des  $m$  machines. Le temps d'exécution est, dans ce cas, le même quelque soit la machine.
- Machines uniformes ( $Q$ ) : ce type de problème est toujours basé sur  $m$  machines en parallèle. Une tâche  $j$  requiert toujours une opération unique qui peut être réalisée sur n'importe laquelle des  $m$  machines. Cependant, la durée  $p_{ij}$  de la tâche  $j$  sur la machine  $i$  sera différente suivant la machine employée. Les machines sont cependant identiques d'une tâche à une autre et ne dépendent pas de la tâche traitée.
- Machines indépendantes ( $R$ ) : cet environnement est une généralisation du précédent. Il y a  $m$  machines différentes en parallèle. La durée  $p_{ij}$  de la tâche  $j$  sur la machine  $i$  sera différente suivant la machine employée. Les machines sont, de plus, différentes d'une tâche à une autre. Une machine pourra donc être la plus efficace pour le traitement d'une tâche donnée, cependant pour le traitement d'une autre tâche elle ne sera pas forcément la plus rapide.

### 3.6.3 Les problèmes d'atelier multi machines :

Les ateliers considéré ici sont composés d'un ensemble de  $m$  machines. Dans ces ateliers doivent être réalisé des travaux (aussi appelé job). Chacun de ces travaux peut être décomposé en tâches. Ce sont les opérations réalisées successivement sur les différentes machines. Chaque machine a une spécialité, et ne peut donc, à elle seule, réaliser l'ensemble

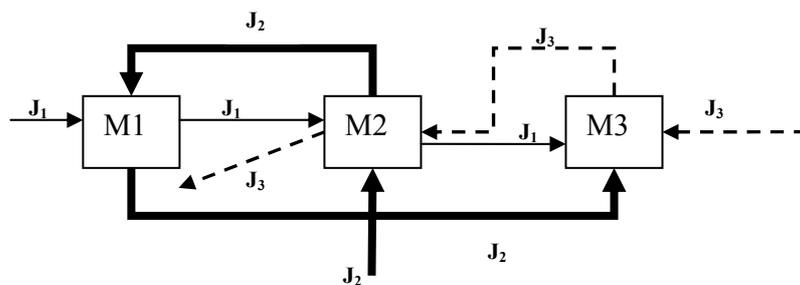
des opérations. En fonction des modes de passage sur les différentes machines, il sera possible d'identifier trois types d'ateliers :

- **Flow Shop ( $F$ )** : dans ce problème d'ordonnancement d'atelier qui correspond à un atelier à cheminement unique,  $n$  tâches utilisent les  $m$  machines qui le composent. Chaque tâche passe tour à tour sur chaque machine dans le même ordre. La figure (Fig 3.4 ) illustre un Flow shop à  $m$  machines



**Figure 3.4:** Flow shop à  $m$  machines

- **Job Shop ( $J$ )** : les  $n$  tâches utilisent les  $m$  machines qui composent l'atelier. Cependant, dans cet atelier, le cheminement est multiple et il est donc propre à chaque type de job. La figure (Fig 3.5) illustre un job shop à trois machines et trois travaux.



**Figure 3.5:** Job shop à 3 machines et 3 travaux

- **Open Shop ( $O$ )** : ce type d'atelier est à cheminement libre. L'ordre des opérations n'est pas fixé, à priori.

### 3.7 Les différentes approches de résolution de problèmes d'ordonnancement:

Le choix d'une méthode de résolution dépend toujours à une certaine problématique que l'on peut tenter de caractériser à travers quatre questions-clés : l'existence d'un modèle d'optimisation, l'exactitude des solutions, le mode de résolution (automatique /interactive) et le coût de la méthode [ESQU et LOPE, 99].

Une méthode optimisant un critère donné est exacte si elle garantit que la solution obtenue est optimale. Sinon, si l'on cherche à obtenir une bonne solution, la méthode est dite heuristique (par abus de langage une méthode heuristique est dite heuristique). Si l'objectif consiste simplement à respecter un ensemble de contraintes, la méthode sera dite exacte ou "saine" dans le cas où effectivement toutes les contraintes sont respectées. En fin, une méthode est

dite complète si, quelque soit le problème abordé, on peut prouver en un temps raisonnable que le problème admet ou non des solutions [LOPE et ROUB, 01]. On peut distinguer deux grandes familles parmi les approches de résolution d'ordonnancement comme indique la figure (Fig 3.6) [LETO, 01], [MARM, 07].

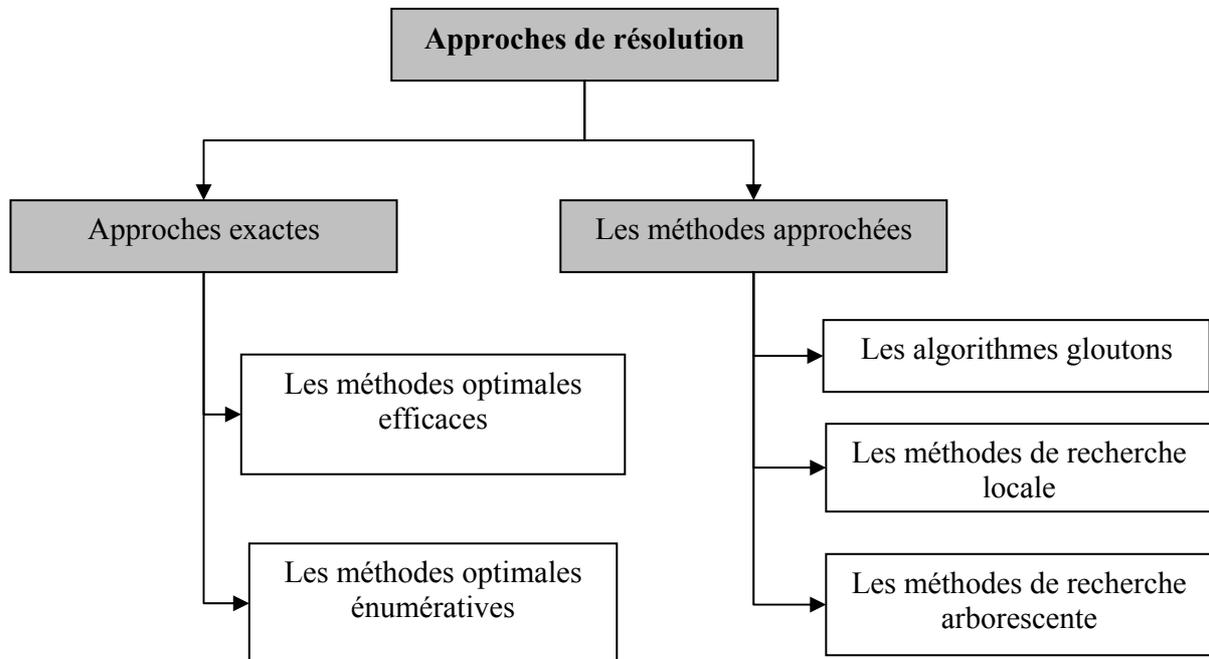


Figure 3.6 : Les différentes approches de résolution de problèmes d'ordonnancement

### 3.7.1 Les approches exactes

Parmi les approches exactes, on peut distinguer les méthodes optimales efficaces et les méthodes énumératives.

#### 3.7.1.1 les méthodes optimales efficaces :

Ces méthodes garantissent, pour un problème et un critère donné, la détermination d'une solution optimale en un temps polynomial (fonction du nombre de tâches et de ressources). Ces méthodes n'existent cependant que pour des classes réduites de problèmes d'ordonnancement. Parmi les plus connues, nous pouvons citer les règles suivantes :

- **SPT** (*Shortest Processing Time*) pour le problème  $1 \parallel \sum C_j$ . La règle SPT consiste à trier les tâches suivant leur  $p_j$  croissant.
- **WSPT** (*Weighted Shortest Processing Time*) qui est optimale pour le problème  $1 \parallel \sum w_j C_j$ . Cette règle consiste à trier les tâches par rapport à leur  $p_j/w_j$  croissant.

- Ainsi que la règle **EDD** (*Earliest Due Date*) pour le problème  $1|d_j|L_{\max}$ . Dans cette règle, les tâches sont triées par leur  $d_j$  croissant.

### 3.7.1.2 Les méthodes optimales énumératives

Parmi les méthodes de résolutions énumératives, il est possible de distinguer les procédures par séparation et évaluation et les techniques de programmation mathématique telles que la programmation linéaire ou la programmation dynamique.

Les procédures par séparation et évaluation (*PSE ou branch and bound*) explorent par énumération l'ensemble des solutions [LOPE et ROUB, 01]. Cependant, l'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération des classes de mauvaises solutions. Un bon algorithme par séparation et évaluation, énumère donc seulement les solutions potentiellement intéressantes.

La programmation linéaire permet de modéliser les problèmes d'optimisation dans lesquels critères et contraintes sont des fonctions linéaires des variables. Les deux types d'algorithmes les plus importants pour traiter un programme linéaire à variables continues sont la méthode du Simplexe et la méthode des points intérieurs. S'il est nécessaire d'utiliser des variables discrètes dans la modélisation du problème, on parle alors de programmation linéaire en nombres entiers (PLNE). L'inconvénient majeur réside dans le nombre important de variables et de contraintes nécessaires. Par ailleurs, il n'existe pas d'algorithme polynomial pour la résolution de tel problème [MARM, 07].

La programmation dynamique, inventée par Bellmann [BELL, 74], selon [LOPE et ROUB, 01] permet de déduire la solution optimale d'un problème à partir d'une solution optimale d'un sous problème. Il est cependant nécessaire que le critère présente des propriétés particulières telle qu'une forme additive. Bien que la taille des problèmes que l'on peut aborder avec cette méthode soit limitée il est possible d'appliquer des résultats de dominance et de construire des algorithmes pseudo polynomiaux.

### 3.7.2 Les méthodes approchées :

Ces approches, aussi appelées heuristiques, permettent de fournir des solutions d'excellente qualité en un temps raisonnable. Elles sont généralement utilisées quand les méthodes optimales ne permettent pas de résoudre le problème en un temps acceptable. Ces méthodes sont généralement classées en trois types.

1. Les algorithmes gloutons permettent de construire progressivement une solution. Dans la construction de solutions, les décisions sont prises grâce à des règles de priorités simples (SPT, EDD, ...). Elles ne sont alors jamais remises en cause.
2. Les méthodes de recherche locale qui partent d'une solution initiale et explorent un voisinage pour améliorer la solution. Lors du déroulement des ces méthodes, il est parfois possible que des solutions de moins bonne qualité soient acceptées afin d'en obtenir de meilleures par la suite. Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode tabou, le recuit simulé ou encore les algorithmes génétiques. La méthode tabou est une méthode itérative générale d'optimisation combinatoire qui se montre très performante sur un grand nombre de problème et particulièrement sur des problème d'ordonnancement [TRAN, 01], [VINC, 03], [MARM, 07]. La méthode de recuit simulé, quant à elle, a été appliquée à des problèmes d'optimisation combinatoire pour la première fois par [KIRK et al, 83]. Partant d'une configuration aléatoire, elle simule numériquement une opération de recuit thermique. Les algorithmes génétiques quant à eux, sont des méthodes évolutives basées sur les principes de sélection et d'évolution naturelle [LOPE et ROUB, 01].
3. Et les méthodes de recherche arborescente tronquée qui sont proches des PSE (présentées précédemment) à la différence que l'arbre de recherche est volontairement réduit, même si cela peut faire passer à côté de solutions optimales, dans le but de gagner du temps de calcul.

### **3.8 Ordonnancement de la maintenance :**

Dans une entreprise industrielle, plusieurs services sont directement intéressés par l'ordonnancement: la production, les ventes, la maintenance, la gestion des approvisionnements et encore la gestion des ressources humaines.

L'ordonnancement est une activité que tout le monde pratique et bien souvent sans s'en rendre compte. Faire couler le café le matin pendant que l'on prend une douche est un exemple très simple mais qui met en évidence que l'organisation dans le temps des tâches permet de gagner du temps. Ce temps gagné peut, en revanche, s'avérer très précieux puisque pour une entreprise il peut représenter de la productivité et donc de l'argent [MARM, 07]. Nous présentons, dans la section suivante, les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance quelques notions d'ordonnancement concernant les activités d'ordonnancement de la maintenance.

### 3.8.1 Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance:

Les objectifs de l'ordonnancement de la maintenance peuvent être décomposés de manière hiérarchique en distinguant les objectifs internes à la maintenance et des objectifs externes comme indique la figure (Fig 3.7). Les objectifs internes concernent le fonctionnement propre du service de maintenance et les objectifs externes sont imposés par d'autres services (principalement la production). Ils peuvent se retrouver en conflit de par leur nature. Leur satisfaction impose généralement aux ressources de maintenance d'intervenir sur les machines à des dates bien précises qui ne correspondent pas nécessairement à une optimisation de leur utilisation. [BENB, 05].

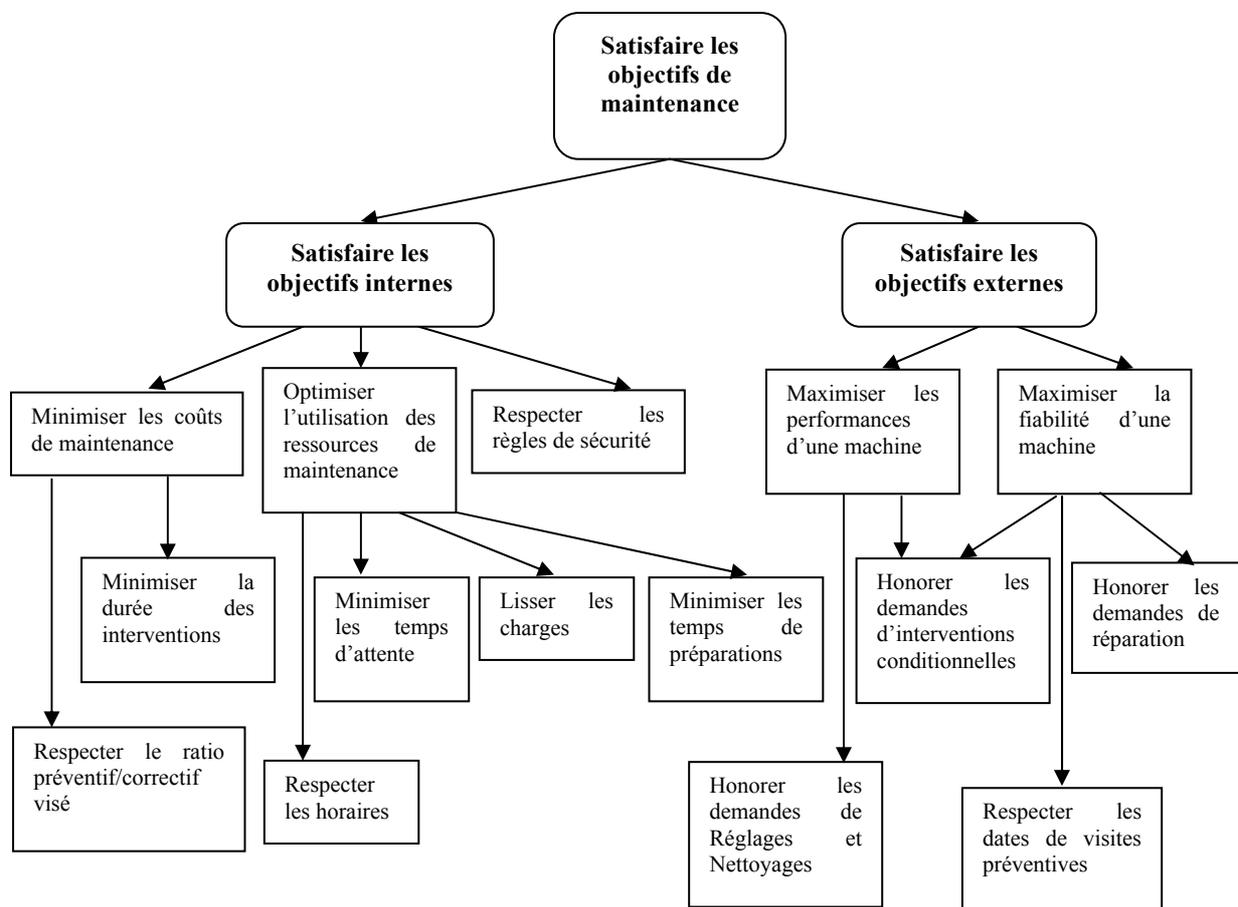


Figure 3.7 : Structure hiérarchique des objectifs de l'ordonnancement de la maintenance

***Les objectifs internes sont relatifs :***

- aux coûts de maintenance (respect du ratio préventif/correctif déterminé lors de la définition de la stratégie de maintenance ou encore la minimisation de la durée des interventions),
- à l'optimisation de l'utilisation des ressources de maintenance (tels que le respect des horaires des équipes, la minimisation des temps d'attente, le lissage des charges ou le regroupement des tâches de préparation afin d'en optimiser la durée),
- aux règles de sécurité (protection des intervenants pour les travaux dangereux).

***Quant aux objectifs externes, ils sont relatifs :***

- aux performances des machines (honorer les demandes de réglages et de nettoyage et respecter les demandes d'interventions conditionnelles),
- à la fiabilité d'une machine (honorer les demandes de réparation et d'interventions conditionnelles, respecter les dates d'interventions préventives)

**3.8.2 Ordonnancement et affectation des activités de maintenance :**

Le service de maintenance gère les interventions de maintenance pour un parc d'équipements pour lesquels des objectifs de productivité ont été préalablement définis. Ceux-ci se traduisent le plus souvent par des engagements sur des niveaux de disponibilité pour ces équipements. Ce service est composé de ressources humaines qui vont devoir traiter différents types de tâches de maintenance. Pour un horizon considéré, l'ensemble des tâches de maintenance préventive est connu, alors que les tâches de maintenance corrective ne sont connues que lorsque leur diagnostic est terminé. Chacune d'entre elles doit être prise en compte, affectée à une ressource et ordonnancée pour être traitée à une date déterminée.

**3.8.3 Modélisation de l'ordonnancement de la maintenance :**

Nous décrivons ici les notations nécessaires pour l'explication du modèle. Nous commençons donc par modéliser les tâches traitées dans le problème et quelques définitions préliminaires.

**3.8.3.1 Tâches :**

Chaque tâche de maintenance est caractérisée par sa durée, sa date de début au plus tôt et sa date de fin au plus tard. Pour chaque tâche  $j$  nous utilisons les notations suivantes :

- $p_j$  : durée de base de la tâche  $j$ ,

- $r_j$  : date de disponibilité (release date) de la tâche j. Elle dépend de données relatives à l'équipement sur laquelle elle aura lieu,
- $d_j$  : due-date de la tâche j. Cette valeur est calculée à partir des engagements. Le coût d'une tâche de maintenance est représenté sur la figure (Fig 3.8)

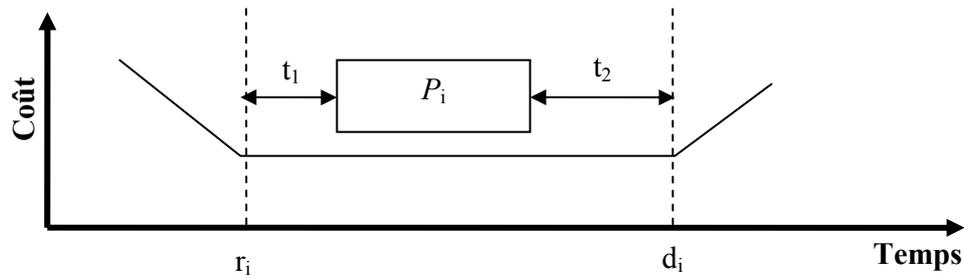
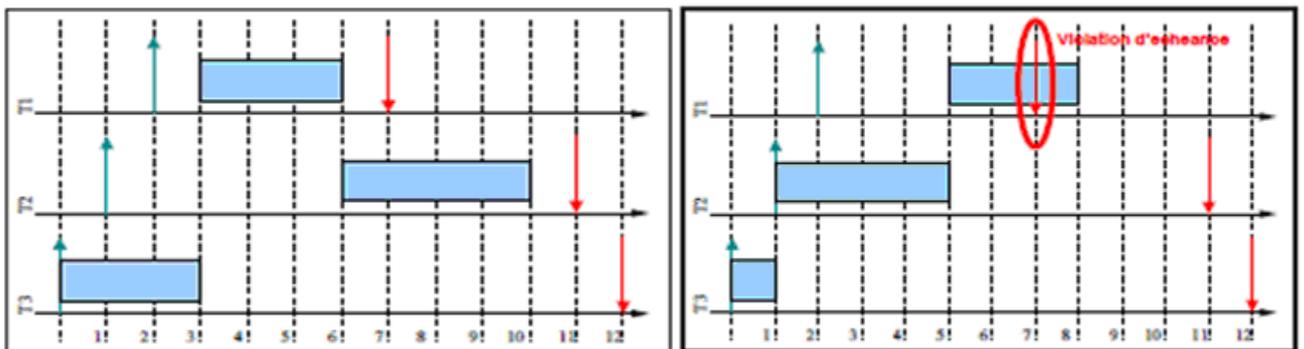


Figure 3.8 : Modélisation du coût d'une tâche de maintenance.

La période de temps entre  $r_i$  et  $d_i$  est appelée « fenêtre d'optimalité » de la tâche pendant laquelle le coût d'exécution de la tâche est minimal. Si on se place devant la stratégie de maintenance préventive systématique, L'explication de la courbe est double. D'un coté, si on intervient avant la date  $r_i$ , le coût de la maintenance augmente. Cela signifie que l'on réalise trop souvent les tâches de maintenance préventive. De l'autre coté, si on dépasse la date de fin au plus tard, le risque que l'équipement concerné tombe en panne augmente, ce qui nécessite des tâches de maintenance corrective. Cette dernière engendre des coûts supplémentaires liés à l'arrêt de la production. Figure (Fig 3.9 (a) et (b))



(a) : Ordonnancement faisable

(b) : Dépassement de l'échéance

Figure 3.9 : Ordonnancement de la tâche de maintenance dans l'intervalle temporelle

**3.8.3.2 Les ressources humaines :**

Les ressources du service de maintenance sont principalement le personnel qualifié pour les différentes interventions. Cependant celui-ci a aussi besoin d'outillage et, pour les réparations, des pièces de rechange ainsi que les consommables d'entretien (huile, graisse,...).

Le service de maintenance est composé de  $m$  ressources humaines (équipes) présentes et disponibles en permanence. Dans notre cas d'étude les ressources sont organisés comme suit:

- Au niveau de chaque entreprise nous avons une équipe permanente qui assure la maintenance préventive et corrective,
- Une équipe volante assure les mêmes tâches dans le cas où l'équipe permanente n'est pas disponible,
- Deux équipes volantes assurent la maintenance préventive conditionnelle.

L'objectif des ressources énumérées ci dessus est d'améliorer la disponibilité des équipements des entreprises.

**3.8.3.3 les variables**

Les variables de notre problème sont les suivantes, pour chaque tâche  $j$  :

- $t_j$  ( $j = 1...n$ ) : date de début planifiée de la tâche  $j$ ,
- $C_j$  ( $j = 1...n$ ) : date d'achèvement de la tâche  $j$ ,
- $x_{ij}$  ( $j = 1...n$  et  $i = 1...m$ ) : booléen indiquant l'affectation de la tâche.  $x_{ij} = 1$  si la tâche  $j$  est affectée à la ressource  $i$ , autrement  $x_{ij} = 0$ ,

**3.8.3.4 Les contraintes :**

Chaque tâche doit être affectée à une seule ressource :

$$\sum_{j=1..n} X_{ij} = 1, \forall i \in \{1, \dots, m\} \quad (3.1)$$

La tâche  $j$  ne peut pas être planifiée sur l'équipement avant que celui-ci ne soit disponible :

$$\forall j, t_j > r_j \quad (3.2)$$

Les ressources sont disjonctives. Cela signifie que les ressources ne peuvent être utilisées que par une tâche à la fois. Tout couple de tâches  $(j_1, j_2)$  utilisant la même ressource est associée la paire de disjonction  $(j_1 < j_2)$  ou  $(j_2 < j_1)$ . Cela se traduit par un séquence ment total des tâches

utilisant la même ressource et par une disjonction entre deux inégalités de potentiel [LOPE et ROUB, 01] :

$$(t_{j1} - t_{j2} \geq p_{j2}) \text{ ou } (t_{j2} - t_{j1} \geq p_{j1}) \quad (3.3)$$

### 3.8.3.5 Objectif :

L'objectif de cette étude est de déterminer une règle d'ordonnancement, qui permet d'optimiser le nombre d'exécution des tâches aléatoires tout en maintenant, les tâches déjà ordonnancées dans leurs intervalles temporels. Le principe de la démarche de résolution consiste en un traitement du problème en deux étapes :

- Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel des tâches connues à priori au début de l'ordonnancement, (naturellement d'affecter le maximum de tâches aux ressources qui sont les plus efficaces)
- Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement des tâches aléatoires

### 3.8.3.6 Critères d'évaluation :

La résolution de problèmes d'ordonnancement se fait, soit en cherchant à atteindre un optimal par rapport à un ou plusieurs critères, soit en recherchant l'admissibilité vis à vis de contraintes. L'approche par optimisation suppose que la solution puisse être évaluée suivant les critères retenus. On cherchera alors, soit à minimiser, soit à maximiser un critère correspondant à une amélioration suivant au moins l'une des branches du triptyque coût, qualité et délais. Ceux-ci peuvent alors être liés au temps, par exemple le temps total d'exécution telle que la minimisation de la durée de l'ordonnancement ( $\min (C_{\max})$ ), la minimisation de la somme des durées des retards ( $\min \Sigma T_j$ ) ou encore la minimisation de nombre de tâches en retard ( $\Sigma L_i$ ).

Ils peuvent aussi être liés aux ressources, on pourra alors s'intéresser au nombre de ressources nécessaires pour réaliser un ensemble de tâche, ou encore s'intéresser à leur charge.

### 3.8.3.7 Définitions :

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à définir, quelques notions essentielles pour la suite .la figure (Fig 3.10) nous montre un ordonnancement  $\Pi$ .

$i$  : indice de la tâche,

$[j]$  : la tâche en position  $j$  ordonnancement,

$r^{\Pi}_i$  : La date d'exécution au plus tôt de la tâche  $i$  dans l'ordonnancement  $\Pi$ ,

$d_j^\Pi$  : La date de fin au plus tard de la tâche j dans l'ordonnancement  $\Pi$ ,

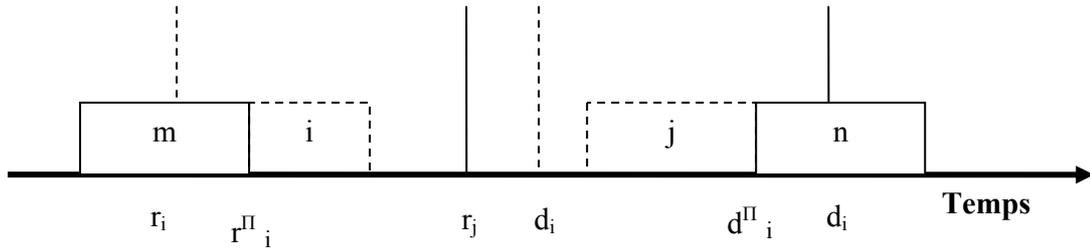


Figure 3.10 : Un ordonnancement  $\Pi$

**a. liberté d'une tâche :**

La liberté d'une tâche dans un ordonnancement  $\Pi$ , est le nombre de dates possibles d'exécution de la tâche dans sa fenêtre optimale. Cette information précise la capacité d'une tâche à se déplacer dans l'ordonnancement  $\Pi$ . la liberté s'exprime par :

$$Lib_i = d_i^\Pi - r_i^\Pi - p_i \quad (3.4)$$

**b. Fenêtre élémentaire:**

La fenêtre élémentaire entre des tâches en position [i] et [i+1] est l'intervalle de l'espace entre ces tâches, comme indique la figure (Fig 3.11).

$$Fe^{[i][i+1]} = [r_{[i]}^\pi + p_{[i]}; d_{[i+1]}^\pi - p_{[i+1]}] \quad (3.5)$$

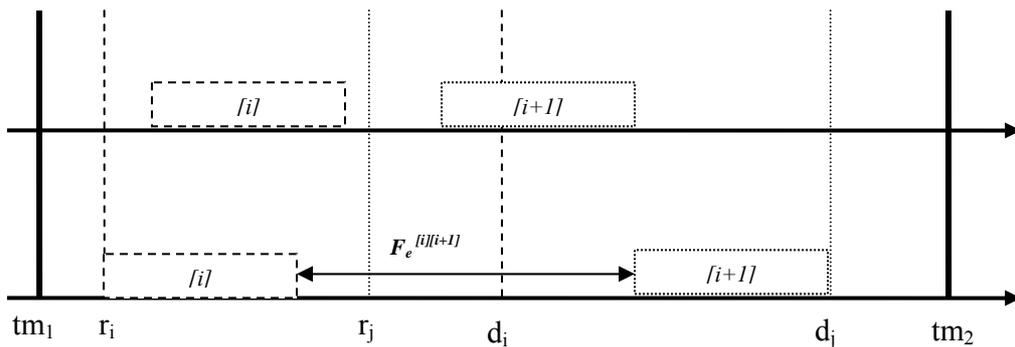


Figure 3.11 : fenêtre élémentaire entre deux tâches

**c. Fenêtre maximale:**

Une fenêtre maximale  $F_m^t$  pour une date  $t$ , est la fenêtre la plus longue parmi les fenêtres élémentaires, contenant la date  $t$ .

$$F_m^t = \text{Max} (Fe^{[i][i+1]}) \quad \forall I, i+1 \in \Pi, \quad t \in Fe^{[i][i+1]} \quad (3.6)$$

### 3.8.4 Ordonnancement statique et dynamique :

En fonction de l'horizon sur lequel l'ordonnancement des tâches sera réalisé, les méthodologies employées seront différentes. L'ordonnancement pourra être réalisé de manière statique ou dynamique. Nous présenterons donc ici ces notions d'ordonnancement statique et dynamique [MARM, 07].

Un algorithme d'ordonnancement est dit statique lorsque l'ordonnancement est prévisible avant la mise en fonctionnement du système, il faut pour cela connaître les tâches a priori. Étant donné que pour une approche statique, il faut connaître à priori l'ensemble des tâches et leurs caractéristiques, cette approche ne peut s'appliquer que pour l'ordonnancement de tâches connues pour une période ainsi que des tâches périodiques telles que les tâches de maintenance préventive. Cette approche est hautement prédictible mais n'est pas flexible : un changement sur une des tâches ou une de ses caractéristiques entraîne la reconstruction complète de l'ordonnancement [MARM, 07], [HALA, 09].

Un algorithme d'ordonnancement est dit dynamique lorsque l'ordonnancement est créé au fur et à mesure de l'arrivée d'événements dont on peut ne rien connaître a priori. Un ordonnancement statique est donc plus fiable et moins flexible qu'un ordonnancement dynamique. La détection d'une panne entraîne une nouvelle tâche. En fonction de son importance, un nouvel ordonnancement comprenant cette nouvelle tâche peut être réalisé directement. Cela correspond à l'insertion d'une tâche de maintenance corrective, dont on ne connaît les caractéristiques qu'après l'apparition, dans un ordonnancement existant et connu. L'insertion peut alors se faire par le biais d'un ordonnancement statique. L'ensemble des tâches seront alors "désaffectées" et un nouvel ordonnancement indépendant du précédent, et comprenant la nouvelle tâche, sera réalisé. Mais les remises en cause potentielles des affectations ainsi que le temps mis pour le calcul du nouvel ordonnancement peut conduire à préférer une insertion dynamique [HALA, 09].

### 3.9 Etat de l'art : ordonnancement et affectation des activités de maintenance

La majeure partie de la littérature dédiée aux problèmes d'ordonnancement se place dans le contexte où les ressources nécessaires à l'exécution des tâches sont disponibles en permanence. Cette hypothèse n'est pourtant pas fidèle à la réalité des entreprises. En effet, les différentes ressources qu'elles soient humaines ou matérielles peuvent, pour diverses raisons, être indisponibles. Les indisponibilités des ressources peuvent être dues à une opération de maintenance sur les machines de l'atelier ou à des emplois du temps du personnel.

Le problème que nous traitons consiste à affecter et à ordonnancer des tâches de maintenance préventives et correctives à un ensemble de ressources humaines identiques. L'approche de résolution doit tenir compte des dates de disponibilité des équipements sur lesquels auront lieu les tâches.

### 3.9.1 Problèmes à une machine :

Dans la littérature, il est possible de trouver des approches traitant de problème dans des contextes similaires comme la production. [KOUÏ et al, 03] ont développés une approche heuristique pour l'ordonnancement temps réel d'une machine dans un contexte perturbé. Cette étude a pour but d'ordonnancer dans les délais, les commandes aléatoires au fur et à mesure de leurs apparitions, tout en veillant à respecter l'exécution des commandes prévues en début de l'ordonnancement. Le critère à optimiser étant le nombre de réussites de placement des commandes aléatoire en fin de l'ordonnancement. Le système est présenté par la figure (Fig 3. 12).

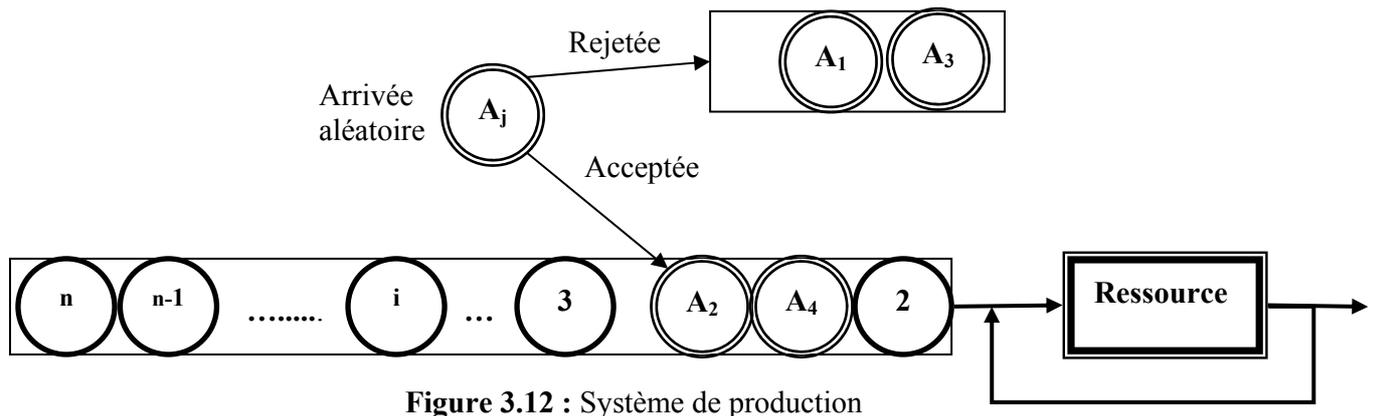


Figure 3.12 : Système de production

Le principe de la démarche de résolution proposée, consiste en un traitement du problème en deux étapes :

- Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel des tâches connues à priori au début de l'ordonnancement pour construire une séquence admissible des tâches qui servira de base pour l'ordonnancement en temps réel (Algorithme 3.1).
- Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement en temps réel des tâches aléatoire, l'approche proposée permet de définir une position d'insertion dès l'arrivée de la tâche aléatoire, dans le cas où elle est acceptée pour l'exécution par la ressource.

a- Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel :

**Etape 0.**  $E := T, L := \Phi, n := N$   
**Etape 1.** Procédure de remplissage des marges pour minimiser  
 Le retard maximal  $L_{max}$  de la séquence  $E$  avec  $L_{max} := \max(0, C_n - d_n)$ ,  
**Etape 2.** **Si**  $L_{max} = 0$  **Alors**  
 Aller à Etape 3  
**Sinon**  
 Procédure d'élimination de la tâche la plus défavorable,  $T_h$  la tâche à  
 éliminée,  $E := E - \{T_h\}, L := L + \{T_h\}, n := n - 1$ ,  
 Aller à Etape 1 **Finsi**  
**Etape 3.** L'ensemble  $E$  est la solution finale.  $L$  représente l'ensemble des tâches  
 rejetées

**Algorithme 3.1 :** Algorithme de maximisation du nombre de tâche sans retards

Partant de la séquence des tâches  $E = \{T_1, \dots, T_N\}$ , l'approche débute par un le tri de  $E$  par selon l'ordre EDD (Earliest Due Date) suivi par procédure de remplissage de marges libres entre les tâches, afin de minimiser le retard maximal. Puis en procède à l'élimination d'une tâche la plus défavorable par une deuxième procédure dont le but de maximiser le nombre de tâches sans retard. Le processus est alors répété jusqu'à l'obtention d'une séquence dérivée avec un retard maximal nul (Algorithme 3.1).

**Etape 1.** Poser  $i := 1, j := i + 1$  Aller à Etape 2  
**Etape 2. Tant que**  $(i < n)$  **Faire**  
     **Si**  $t_{T_i} - C_{T(i-1)} > 0$  **Alors**  
         Aller à Etape 3  
     **Sinon**  $i := i + 1$   
**Fin Tant que** Aller à Etape 4  
**Etape 3.**  
**Tant que**  $(j \leq n)$  **Faire**  
     **Si**  $\max(C_{T(i-1)}, r_{T_i}) + P_{T_j} \leq T_{lim}(i, j)$  **Alors**  
         Placer  $T_j$  avant  $T_i$  faire la mise à jour des dates d'exécution,  
          $j := j + 1$  Aller à Etape 4  
     **Sinon**  $j := j + 1$   
**Fin Tant que**  $i := i + 1, j := j + 1$ , Aller à Etape 2  
**Etape 4. Fin**

**Algorithme 3.2 :** Procédure de remplissage des marges

La procédure de remplissage des marges consiste, en un remplissage des marges libres entre deux tâches successives afin de minimiser le retard maximal. Partant de la séquence  $E$ , il est clair que la présence des marges libres entre les tâches influe sur le retard maximal. L'idée serait alors d'insérer au mieux des tâches dans les marges libres de manière à minimiser le retard maximal.

En se référant à l'algorithme (Algorithme 3.1), le principe de l'heuristique consiste à déplacer une tâche  $T_i \in S$  pour l'insérer dans la marge libre  $M$ .  $T_i$  est alors choisie de manière à :

- Avoir la plus petite date de disponibilité
- $T_i$  placée dans  $M$  n'augmente pas le retard des tâches dans  $S$  déjà en retard et ne retarde pas les tâches sans retard.

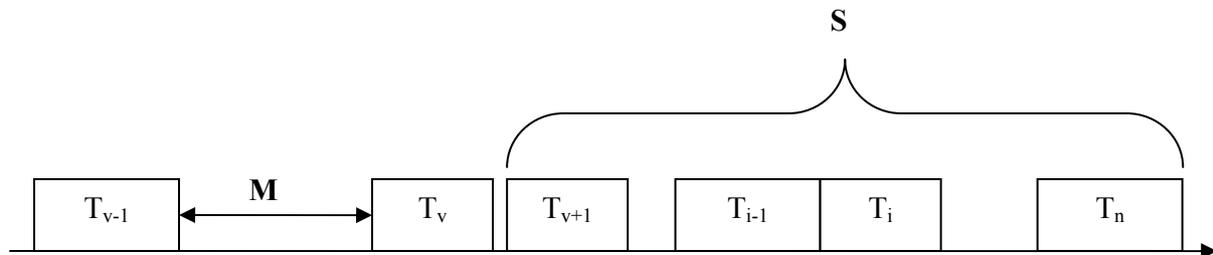


Figure 3.13 : Sélection d'une tâche à insérer dans la marge

Le but de la procédure d'élimination de la tâche la plus défavorable, est d'éliminer une tâche  $T_i$  prédécesseur à  $T_h$  (qu'on nomme la plus défavorable) qui permet d'avoir par conséquent, le temps de fin d'exécution de la tâche de rang  $h-1$  minimal.

Finalement on aura la séquence admissible, définissant l'ordre de passage des tâches programmables sur la machine (ressource), la séquence notée par :

$E = \{TP_1, TP_2, \dots, TP_n\}$  cette séquence est la solution du problème d'ordonnancement prévisionnel. Partant de cette séquence et en appliquant les relations (3.7) et (3.8) nous déduisons le nouvel intervalle qui est défini par la marge  $[ta_i, tb_i]$  dans lequel la tâche  $TP_i$  peut commencer à être exécutée.

Ordonnancement admissible au plus tôt :

$$\begin{aligned} ta_i &= r_i \quad \text{pour } i=1 \\ ta_i &= \text{Max}(ta_{i-1} + p_{i-1}, r_i) \quad \text{pour } i=2, \dots, n \end{aligned} \quad (3.7)$$

Ordonnancement admissible au plus tard :

$$\begin{aligned}
 tb_i &= d_n - p_n && \text{pour } i=n \\
 tb_i &= \text{Min} (d_i - p_i, tb_{i+1} - p_i) && \text{pour } i=n-1, \dots, 1
 \end{aligned}
 \quad (3.8)$$

$E$  : séquence de tâches,  $h$  : rang de la première tâche en retard dans  $E$

$v$  : une valeur très grande

**Etape 1** poser  $i := 1$ ,  $min := v$ ,  $ind := 1$ ,

**Etape 2.** - Supprimer temporairement la tâche  $T_i$

- Mise à jour des dates de début et de fin d'exécution des tâches dans  $E - \{T_i\}$

- Aller à Etape 4

**Etape 3.** Appliquer Procédure de remplissage des marges Aller à Etape 4

**Etape 4.** Si  $C_{T(h-1)} < min$  Alors

$min := C_{T(h-1)}$

**Sinon** Aller à Etape 5

**Etape 5.** -Restaurer la séquence initiale  $E$

-Mise à jour des dates de début et de fin d'exécution des tâches,  $i := i+1$

**Si** ( $i > h$ ) **Alors**

Aller à Etape 6

**Sinon** Aller à Etape 2

**Etape 6** **Fin**

**Algorithme 3.3** : Procédure d'élimination de la tâche la plus défavorable

b- Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement des tâches aléatoire :

L'approche de résolution consiste à appliquer la procédure heuristique de minimisation du retard maximal pour l'ensemble  $V = S \cup \{A_j\}$ . dans le cas où  $L_{max}$  est nul pour l'ensemble  $V = S \cup \{A_j\}$ . alors  $A_j$  est acceptée. Dans le contraire, une tentative d'insertion consiste à parcourir l'ensemble des espaces libres dans  $V$  pour insérer  $A_j$  dans une marge libre tout en respectant son délai. Les étapes de l'algorithme de résolution sont données par l'algorithme (Algorithme 3.4)

$E$  : séquence de tâches  $t_{\text{now}}$  : instant d'arrivée de la tâche  $A_j$

**Etape 1**

- localiser dans  $E$  l'ensemble  $S$  des tâches (aléatoires et programmables) en attente à l'instant  $t_{\text{now}}$
- Poser  $V = S \cup \{A_j\}$

**Etape 2.** Appliquer l'algorithme de minimisation du retard maximal pour l'ensemble  $V$ 

**Si**  $L_{\text{max}} = 0$  **Alors**

$A_j$  est acceptée,  $E = V$  Aller à Etape 4

**Sinon** Aller à Etape 3

**Etape 3.** **Si** position d'insertion pour  $A_j$  dans  $S$  existe **Alors**

$A_j$  est acceptée dans la position trouvée,  $E = V$  Aller à Etape 4

**Sinon**  $A_j$  rejetée Aller à Etape 4

**Etape 4.** Fin**Algorithme 3.4** : Procédure d'insertion d'une tâche aléatoire

[DURO et al, 04] ont développé une approche, qui consiste à insérer une tâche dans un ordonnancement en temps réel, avec possibilité de réordonnancer ultérieurement les tâches déjà ordonnancées si nécessaire.

La tâche aléatoire  $A$  qui apparaît à l'instant noté 0 est définie par :

- son délai  $D$  qui ne peut être violé,
- son temps d'exécution noté  $\theta$ .

Un ordonnancement impliquant  $n$  tâches notées  $a_1, \dots, a_n$  est donné comme indique la figure (Fig 3.14). Le temps requis pour exécuter  $a_i$  est appelé  $t_i$  pour  $i = 1; 2, \dots, n$ . Les instants de départ de ces tâches sont notés  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ . Avec  $\mu_i + t_i \leq \mu_{i+1}$  pour  $i = 1, 2, \dots, n-1$  car la ressource n'exécute au plus qu'une seule tâche à la fois. Les délais des tâches sont notés  $d_1; d_2, \dots, d_n$ . Dans ce qui suit nous présentons quelques définitions et relations fondamentales utilisés avec cette approche.

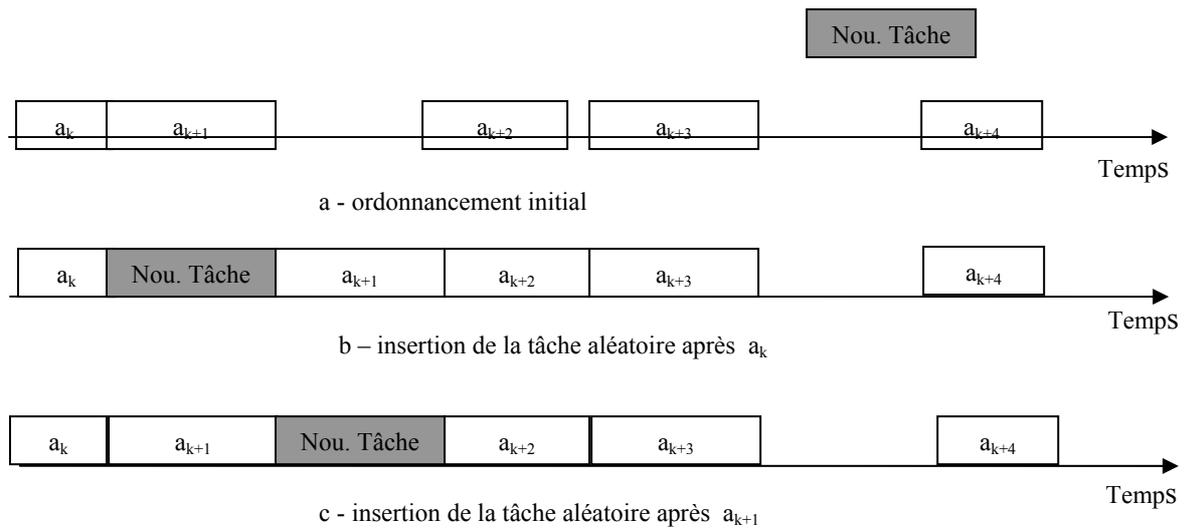


Figure 3.14 : Exemple illustratif

$$\Delta_i = \mu_{i+1} - (\mu_i + t_i) \text{ pour } i=1, 2, \dots, n-1 \quad 3.9$$

$\Delta_i$  est l'intervalle de temps qui démarre à la fin de la tâche  $a_i$  et finit au début de  $a_{i+1}$ .

$$f_i = [d_i - (\mu_i + t_i)]^+ \text{ pour } i=1, 2, \dots, n-1 \quad 3.10$$

$f_i$  représente la flexibilité de la tâche  $a_i$ , c'est-à-dire la quantité de temps telle que  $a_i$  puisse être retardée sans augmenter la somme  $C_n$  des retards des tâches, qui est :

$$C_n = \sum_{i=1}^n (\mu_i + t_i - d_i)^+ \quad 3.11$$

Supposons que la tâche aléatoire  $A$  de durée  $\theta$  débute son exécution à la fin de la tâche,  $a_k$  c'est-à-dire à l'instant  $\mu_k + t_k$ . Alors, si  $\theta \leq \Delta_k$ , la tâche  $A$  peut être insérée entre  $a_k$  et  $a_{k+1}$  sans perturber  $a_{k+1}$ . Si  $\Delta_k < \theta \leq \Delta_k + \Delta_{k+1}$ , alors nous devons reporter  $a_{k+1}$  dont l'instant de début devient  $\mu_{k+1} + (\theta - \Delta_k)$ , mais  $a_{k+1}$  est l'unique tâche à être perturbée. De même si

$\Delta_k + \Delta_{k+1} < \theta \leq \Delta_k + \Delta_{k+1} + \Delta_{k+2}$ , à la fois  $a_{k+1}$ ,  $a_{k+2}$  seront déplacées : l'instant de début de  $a_{k+1}$  devient  $\mu_{k+1} + (\theta - \Delta_k)$  tant que celui de  $a_{k+2}$  devient  $\mu_{k+2} + (\theta - \Delta_k - \Delta_{k+1})$  et ainsi de suite, pour résumer :

Si  $\sum_{s=0}^{n_k} \Delta_{k+s} < \theta \leq \sum_{s=0}^{n_{k+1}} \Delta_{k+s}$  Alors:

- les tâches  $a_{k+s}$  pour  $s = 1, 2, \dots, n_k$  sont les seules tâches à être reportées si  $A$  débute lorsque  $a_k$  finit.
- les instants de départ des tâches deviennent  $a_{k+s}$

$$\mu_{k+1} + (\theta - \sum_{i=0}^{s-1} \Delta_{k+i}) \text{ pour } s = 1, 2, \dots, n_k$$

3.12

Si  $\theta \leq \Delta_k$  alors la tâche  $A$  peut être insérée après  $a_k$  et son exécution terminée avant que  $a_{k+1}$  ne débute. En ce cas, l'ordonnancement initial n'est pas perturbé. Si  $\theta > \Delta_k$  la tâche  $a_{k+1}$  est retardée  $\theta - \Delta_k$ . Alors, si  $\theta - \Delta_k \leq f_{k+1}$ , le délai de  $a_{k+1}$  n'est pas violé, et l'accroissement de  $C_n$  est égal à zéro. Autrement, l'accroissement de  $C_n$  est égal à  $\theta - \Delta_k - f_{k+1}$ .

L'augmentation du  $C_n$  résultant du report de  $a_{k+1}$  sur l'axe du temps est :

$$R_{k+1} = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta \leq \Delta_k \\ (\theta - \Delta_k - f_{k+1})^+ & \text{si } \theta > \Delta_k \end{cases} \quad 3.13$$

Par la même méthode l'augmentation du  $C_n$  résultant du report de  $a_{k+2}$  sur l'axe du temps est :

$$R_{k+2} = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta \leq \sum_{l=k}^{k+1} \Delta_l \\ (\theta - \sum_{l=k}^{k+1} \Delta_l - f_{k+2})^+ & \text{si } \theta > \sum_{l=k}^{k+1} \Delta_l \end{cases} \quad 3.14$$

En résumé, cette approche a pour but de déterminer les tâches de l'ordonnancement initiales après lesquelles il est intéressant de considérer l'insertion de la tâche aléatoire (tâches suivies par un temps inutilisé, et telles que  $A$  ne viole pas son délai).

Soit 0 l'instant auquel la tâche aléatoire  $A$  apparaît, et soient  $a_1, \dots, a_Q$  les tâches déjà ordonnancées, où  $Q$  est le plus grand entier tel que  $\mu_Q + t_Q + \theta \leq D$

1. Supposons qu'il existe au moins un  $k \in \{1, 2, \dots, Q\}$  tel que  $\Delta_k > 0$  et soit

$W_Q = \{k/k \in \{1, 2, \dots, Q\} \text{ et } \Delta_k > 0\}$ . Alors, l'emplacement optimal de  $A$  est situé juste après une des tâches  $a_k$ ,  $k \in W_Q$ . En d'autres termes, il est inutile de tester les emplacements situés après les tâches  $a_k$  telles que  $\Delta_k = 0$ , excepté peut être après  $a_Q$ .

2. Si  $W_Q = \Phi$ , commencer A lorsque  $a_Q$  finit est optimal.

### 3.9.2 Problèmes à machines parallèles :

Le problème à machines parallèles se caractérise, par le fait que plusieurs machines sont possibles pour l'exécution d'un travail qui n'en nécessite qu'une. D'un point de vue théorique, ce problème est une généralisation du problème à une machine et un cas particulier de problème d'atelier multi machines. La résolution passe par le traitement de décision d'affectation et s'effectue généralement en deux étapes :

- décider sur quelle machine s'effectuer chaque opération,
- Déterminer la séquence d'opérations sur chaque machine [LOPE et ROUB, 01].

Cette partie est consacrée pour les problèmes des machines parallèles, et les méthodes existantes. Bien sur, étant donnée le nombre de travaux réalisés dans ce domaine, nous avons choisi les méthodes qui nous aident selon notre cas d'étude.

Certains auteurs traitent des problèmes d'ordonnancement dynamique des tâches de maintenance [IVAN et al, 03], dans un ordonnancement existant comme indique la figure (Fig 3.15).

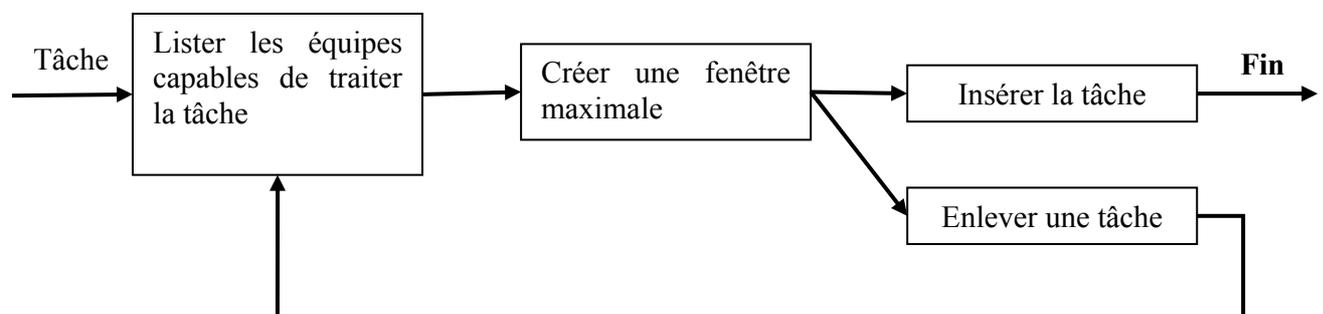
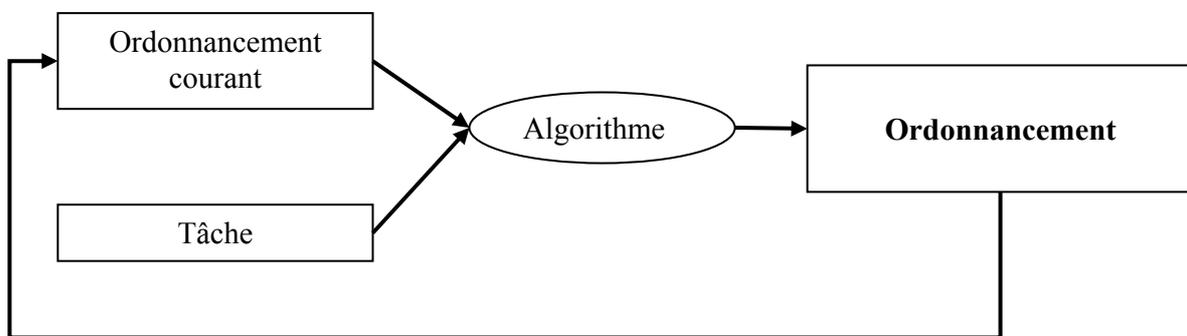


Figure 3.15 : Algorithme de [IVAN et al, 03]

Le principe de l'algorithme est le suivant : nous avons une tâche à insérer avec sa fenêtre d'optimalité  $[r_i, d_i]$ . Pour chaque équipe, qui possède de niveau de compétence nécessaire, on crée une fenêtre maximale entre  $r_i$  et  $d_i$ . Ensuite on regarde si la tâche peut être insérée dans une fenêtre maximale (s'il y a plusieurs possibilité, on l'insère dans la plus petite fenêtre). Si la tâche ne peut pas être insérée dans aucune fenêtre, chercher une tâche critique avec la plus grande valeur de liberté. S'il n'y a pas de tâches critiques, qui peuvent être

insérées sans créer le retard supplémentaire ou s'il y a une boucle (les mêmes tâches, qui s'échangent), alors choisir parmi toutes les solutions, la solution avec le moindre coût.

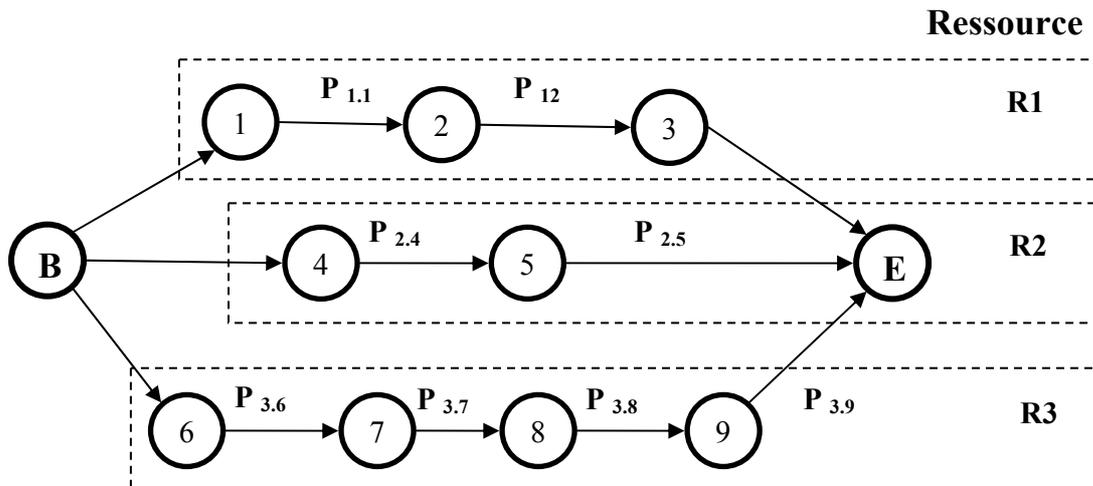
L'approche développée par MARMIER [MARM, 07] dont l'algorithme est schématisé par la figure (Fig 3.16). L'ordonnancement courant peut être modélisé sous la forme d'un graphe potentiel tâche, afin de permettre de connaître, pour chacune des tâches qui le composent, celles qui la précèdent et celles qui lui succèdent. Le graphe permet de représenter la structure et les connexions qui existent dans l'organisation des tâches. La modélisation de ce problème à l'aide de la théorie des graphes permet de structurer le problème afin de pouvoir utiliser des outils informatiques existants (un algorithme par exemple) ayant déjà fait leur preuve dans la résolution de certains problèmes.



**Figure 3.16** : Algorithme de [MARM, 07]

Le graphe de l'ordonnancement courant (Fig 3.17) est composé de noeuds, qui représentent les tâches, et d'arcs, qui sont les contraintes temporelles potentielles entre les tâches (contraintes de précédence). Les tâches sont placées entre une tâche fictive de début **B** (Begin) et une tâche fictive de fin **E** (End). La valuation des arcs correspond à la durée des tâches indiquée par  $P_{i,j}$  sachant que  $i$  indique la ressource et  $j$  indique la tâche. Les tâches sont triées par un algorithme fréquemment utilisé dans la littérature appelé algorithme ECT : Earliest Completion Time et il s'agit d'un algorithme de liste (Tâches rangées par ordre décroissant de leur durée maximale  $P_{i,j}$ ). C'est à dire que les données sont triées dans un ordre puis sont traitées dans cet ordre.

Le choix de l'affectation d'une ressource à une tâche s'effectue en fonction du niveau de compétence de celle-ci, dans la compétence requise pour effectuer le traitement de la tâche.



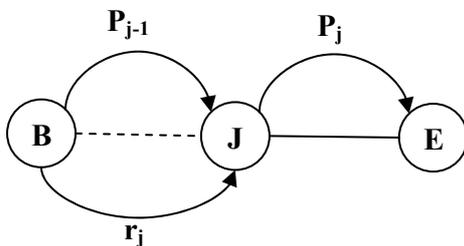
**Figure 3.17 :** Graphe utilisé dans le problème d'ordonnancement

La notion de dynamique signifie que l'ordonnancement peut être modifié. Pour chaque tâche  $j$  nous aurons donc la possibilité de faire varier sa date de début entre les dates de début au plus tôt et au plus tard (Fig 3.18) :

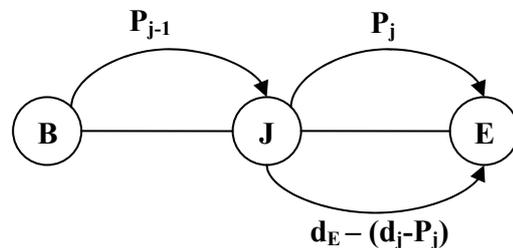
- $ES_j$  ( $j = 1...n$ ) : la date de début au plus tôt de la tâche  $j$  (Earliest Starting date),
- $LS_j$  ( $j = 1...n$ ) : la date de début au plus tard de la tâche  $j$  (Latest Starting date).

Les dates de début au plus tôt et au plus tard correspondent aux extrémités d'une période dans laquelle le début du traitement de la tâche peut être planifié afin qu'elle ne se termine pas en retard, qu'elle ne viole pas la contrainte de sa date de disponibilité mais aussi qu'elle ne provoque pas de retard sur un successeur.

Graphe utilisé pour le calcul des dates de début au plus tôt :



Graphe utilisé pour le calcul des dates de début au plus tard :



**Figure 3.18 :** Graphe de calcul des dates de début au plus tard et au plus tôt

L'insertion dynamique de tâches s'effectue, dans l'ordonnancement d'une ressource  $i$ , dans l'espace disponible entre  $ES_j + P_{i,j}$  et  $LS_{succ(j)}$  de deux tâches successives ( $j$  et son

successeur  $\text{succ}(j)$  et  $j$  tel que  $X_{ij} = 1$ ) de l'ordonnancement courant. Nous obtenons alors le temps disponible entre les deux tâches tel que  $F_{j,\text{succ}(j)} = LS_{\text{succ}(j)} - (ES_j + P_{i,j})$ . On parle alors de fenêtre d'insertion, comme indique la figure (Fig 3.19).

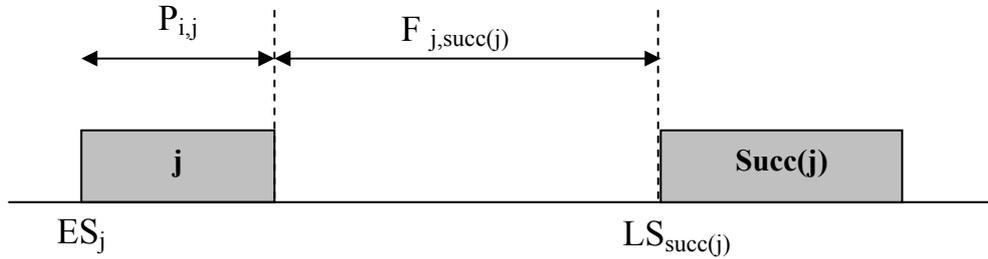


Figure 3.19 : fenêtre d'insertion

$W_j$  : pondération de la tâche  $j$ . Elle est prévue pour différencier les tâches en fonction de leur importance

$T_j$  ( $j = 1 \dots n$ ) : retard de la tâche  $j$  (tardiness),  $T_j = \max \{0, C_j - d_j\}$ ,

Notre objectif est donc de minimiser la somme pondérée des retards (ou somme des pénalités).

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n W_j T_j \quad (3.15)$$

La modélisation de l'ordonnancement courant étant faite, nous pouvons nous intéresser à l'heuristique d'insertion dynamique. Soit  $i$  une ressource et  $S$  l'ordonnancement composé de  $n$  tâches de cette ressource. Soit  $k$  une tâche devant être insérée dynamiquement dans  $S$ . Le fait que son insertion n'entraîne pas de retard dans les tâches de l'ordonnancement se vérifie par l'équation (3.16).

$$\sum_{j=1}^n w_j T_j + w_k T_k = \sum w_j T_j \quad (3.16)$$

L'égalité présentée dans l'équation (3.16), se vérifie si la fenêtre d'insertion choisie entre deux tâches  $j$  et  $\text{succ}(j)$  vérifie :

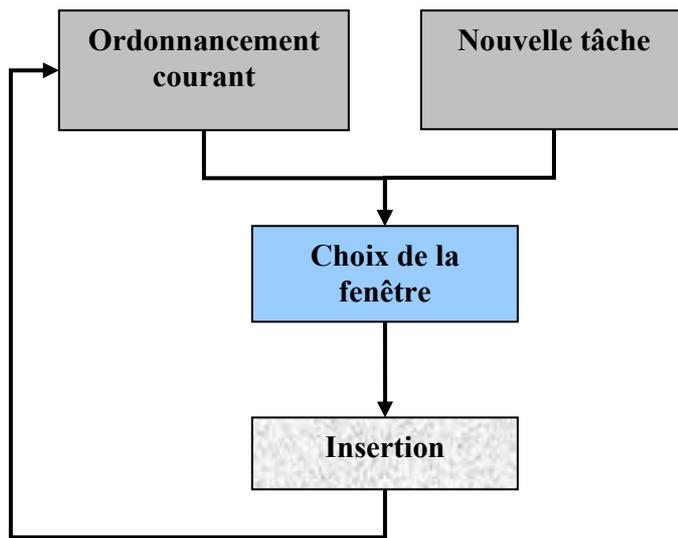
$$F_{j, \text{succ}(j)} \geq P_{ik} \quad (3.17)$$

Et :

$$LS_{\text{succ}(j)} - P_{ik} \geq r_k \quad (3.18)$$

Et pour ne pas générer de retard sur la nouvelle tâche :

$$ES_j + P_{ij} + P_{ik} \leq d_k \quad (3.19)$$



**Figure 3.20** : Méthode d'insertion dynamique de tâches

L'approche décrite sur la figure (Fig 3.20) permet de rechercher de telles fenêtres d'insertion. La première étape de cette approche consiste à lister, pour un ordonnancement  $S$ , l'ensemble des fenêtres  $F \in S$ , satisfaisant les trois conditions des équations (3.17), (3.18) et (3.19). Pour équilibrer la charge entre les ressources et privilégier en même temps les ressources qui minimisent  $P_{ik}$ , la ressource choisie sera alors celle qui minimisera l'écart type de la charge des ressources.

Dans le cas de la recherche d'un ordonnancement d'un ensemble des tâches, sur un ensemble des machines parallèles identiques minimisant la somme des dates de fin d'exécution des tâches. La généralisation de l'algorithme SPT (Shortest Processing Time), développé pour le problème  $1//\Sigma C_i$  est optimal. Cet algorithme de liste classe les tâches par ordre croissant de leur durée d'exécution et les affectées, dans cet ordre à la première machine libre [HALA, 09].

Selon [HALA, 09], [WIES et al, 96], étudient le problème d'ordonnancement des tâches minimisant le temps total d'exécution restreint à deux machines. Les tâches sont indexées selon des indices consécutifs. Les opérations indexées selon les indices impaires sont exécutées sur une seule machine et les autres indexées par les indices paires sur l'autre machine.

[BOUG et al, 07] ont traité l'un des problèmes de l'ordonnancement temps réel, sur deux ressources identiques en parallèles en minimisant la durée total d'ordonnancement et le nombre de tâches aléatoires. L'approche de résolution proposée est de construire, une file

d'attente pour chaque ressource par la même idée proposée par [WIES et al, 96] et [MOKO, 04], la file d'attente constitue le programme prévisionnel. La règle de l'ordonnancement choisie consiste à affecter les tâches aux ressources en respectant l'ordre de leurs dates de disponibilités et leurs délais, et une fois la répartition des tâches programmables achevée, on déduit la plus grande durée d'ordonnancement notée  $BS = C_{\max}$ . Le tableau (Tableau 3.1) indique les caractéristiques des tâches programmables.

<b>i</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>r<sub>i</sub></b>	0	1	3	5	6	7	9	10	14	16	19	20	25	28	30	33	38	41	44	49
<b>p<sub>i</sub></b>	2	3	4	6	3	5	3	2	6	4	3	5	2	3	4	4	5	6	3	2
<b>d<sub>i</sub></b>	6	8	32	20	19	25	20	30	28	35	37	38	43	50	45	43	46	49	55	58

**Tableau 3.1** : caractéristiques des tâches programmables

L'ordonnancement des tâches par ressources est donné par les tableaux : Tableau 3.2 et Tableau 3.3 et la borne supérieure  $BS = C_{\max} = 51$ .

<b>i</b>	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
<b>r<sub>i</sub></b>	0	3	6	9	14	19	25	30	38	44
<b>p<sub>i</sub></b>	2	4	3	3	6	3	2	4	5	3
<b>d<sub>i</sub></b>	6	32	19	20	28	37	43	45	46	55

**Tableau 3.2:** Tâches prévisionnel pour la première ressource

<b>i</b>	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<b>r<sub>i</sub></b>	1	5	7	10	16	20	28	33	41	49
<b>p<sub>i</sub></b>	3	6	5	2	4	5	3	4	6	2
<b>d<sub>i</sub></b>	8	20	25	30	35	38	50	43	49	58

**Tableau 3.3:** Tâches prévisionnel pour la deuxième ressource

Pour l'ordonnancement dynamique, le principe est d'utiliser le programme prévisionnel et d'y insérer les tâches aléatoires parmi les tâches programmables tout en optimisant le critère considéré qui est le Makespan et le nombre de tâches aléatoires. Pour se faire une procédure de calcul de la borne supérieure (BS), est donnée par l'algorithme (Algorithme 3.5)

**Etape 1 :** Ranger les tâches dans l'ordre croissant des dates de leur disponibilité,  
**Etape 2 :** affecter les tâche aux ressources dans l'ordre croissant des dates de leur disponibilité en respectant les délais  
**Etape 3 :** considérer  $BS = C_{\max}$   
**Etape 4 :** **Si** sur chaque ressource, en intégrant les tâches aléatoires, la borne est respectée **Alors**  
Continuer à affecter les tâches imprévues aux ressources,  
**Sinon**  
**Si** BS n'est respectée **Alors**  
Augmentant la valeur de BS en considérant le nouveau  $C_{\max}$   
**Sinon**  
Aller à l'étape 4  
**Fsi**  
**Fsi**

**Algorithme 3.5 :** Procédure de calcul de la borne supérieur BS

**3.10 Conclusion :**

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre, les notions de base de l'ordonnancement et les problèmes d'ordonnancement. Notre problème est composé de deux sous problèmes consistant à affecter et ordonnancer les tâches préventives, d'une part, et les tâches correctives, d'autre part. Les ressources sur lesquelles les tâches sont affectées et ordonnancées sont identiques.

Dans la seconde partie, nous avons présenté un état de l'art sur les différents travaux réalisés dans ce domaine, dont le but d'identifier des problèmes d'ordonnancement de référence desquels dérive notre cas.

L'objectif de ce chapitre était de produire des algorithmes permettant d'ordonnancer des tâches prévisionnelles et d'insérer une ou plusieurs tâches aléatoires dans un ordonnancement existant, sous la contrainte de temps de disponibilité.

---

# CHAPITRE IV

*Etude de cas : Application à l'entreprise  
SME(Société de la Maintenance de l'Est)*

---

#### 4. Etude de cas: application à l'entreprise SME (Société de Maintenance de l'Est)

##### 4.1. Introduction

Ce chapitre présente une application des notions étudiées dans les chapitres précédents. La plate forme de cette application est la société de maintenance de l'Est (SME) Constantine. Après une bref représentation de la société et les différents services pour notre application, nous présentons par la suite un outil développé et dédié au problème traité, permettant l'implémentation de méthodes proposée, afin de résoudre les problèmes de conflit et de répondre aux demandes des clients en temps restreint.

##### 4.2. Présentation générale de l'ERCE

La production des ciments en Algérie est assurée par quatre (4) groupes régionaux. (ERCC- ERCE - ERCO- EL-ASNAM).L'Entreprise Régionale des Ciments de l'Est par abréviation **ERCE** est le groupement régional des filiales de production et de commercialisation pour la région EST. L'ERCE comprend 8 filiales :

<b>SCAEK:</b>	Société des ciments Ain - EL Kébira
<b>SCME :</b>	Société commerciale
<b>SCHB :</b>	Société des ciments Hamma Bouziane
<b>SCHS :</b>	Société des ciments Hadjar - Soud
<b>SCIMAT :</b>	Société des ciments Ain - Touta
<b>SCT :</b>	Société des ciments Tebessa
<b>SPDE :</b>	Société des produits dérivés Est
<b>SME :</b>	Société de maintenance Est

##### 4.3. Présentation de La société de maintenance de l'Est (SME)

Filiale du groupe ERCE, la SME créé depuis 1990 est active dans les domaines de la fabrication, de la réparation et du montage des équipements des cimenteries. Le siège de la filiale SME est situé à HAMMA-Bouziane à 30 Km à l'Est de CONSTANTINE, comme indique la figure (Fig.4.1).

La société de maintenance de l'Est est opérationnelle depuis 1992, en plus des activités qu'elle assure au sein du groupe ERCE ,la SME assure aussi les travaux de sous\_traitance pour des tiers dans les domaines suivants :

- Fabrications Mécaniques et chaudronnerie
- Maintenance industrielle
- Maintenance Engins et matériels roulants
- Maintenance conditionnelle
- Etudes et archivage de plans

Infrastructure:

La SME occupe une superficie de  $55644\text{m}^2$  dont  $7600\text{m}^2$  couverte, ( Ateliers :  $4500\text{m}^2$  , Administration :  $1500\text{m}^2$  ).

L'effectif de la société est de 160.

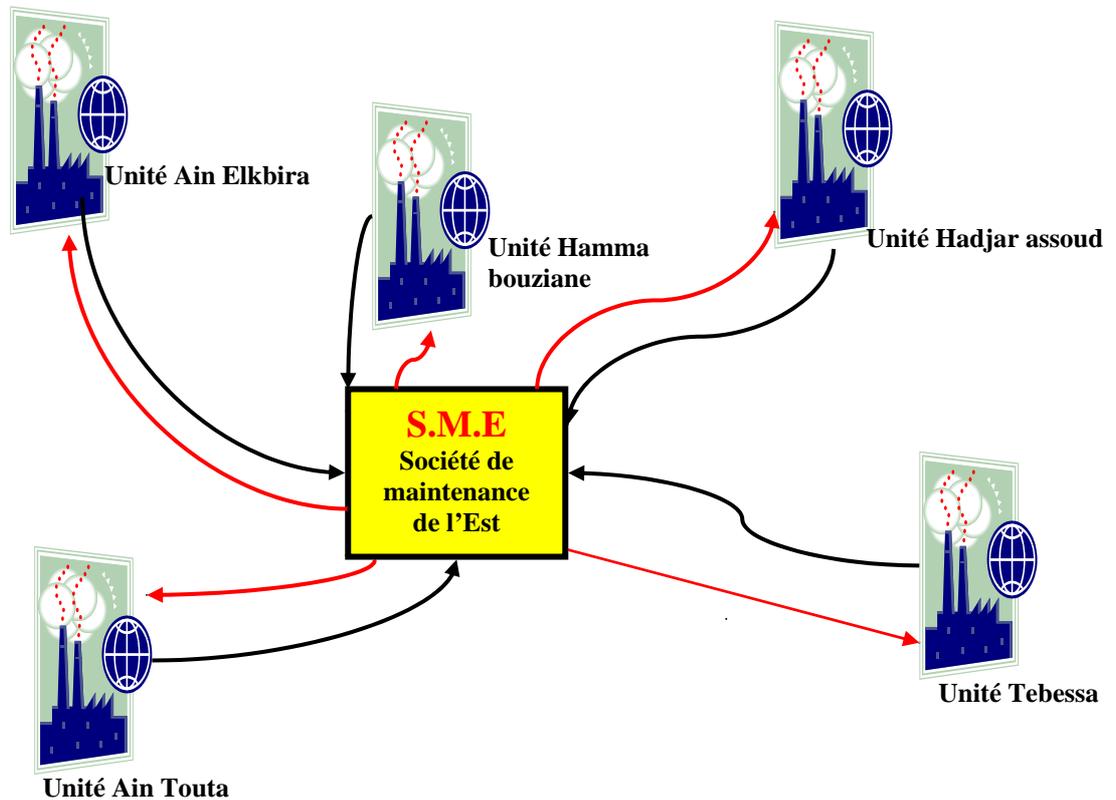


Figure 4.1 : schéma de notre cas d'étude

**4.4. Mission de la société de SME :**

La société SME a pour mission d'assurer :

- \_ Etudes et engineering
- \_ Maintenance Industrielle Interne (maintenance équipement SME)
- \_ Maintenance externe (maintenance tiers) : intervention au niveau des cimenteries avec des équipes spécialisées pour effectuer des opérations de maintenance des équipements et installations.
- \_ Fabrications de pièces de rechanges, organes et équipements industriels entrant dans le process des cimenteries
- \_ Etude et réalisation de filtres a manches
- \_ Numérisation et archivage de documents :
  - Numérisation et vectorisation des plans
  - Gestion et exploitation des documents
- \_ Maintenance conditionnelle (prestation d'analyses vibratoires) :
  - Surveillance vibratoire des équipements
  - Equilibrage
  - Alignement d'arbre
  - Contrôle par ultrasons

**4.5. Organisation de l'entreprise :**

L'entreprise comprend:

- \_ Service fabrications mécaniques,
- \_ Département Maintenance comprend :
  - Service maintenance industrielle externe,
  - Service technique,
  - Section parc roulant,
- \_ Service méthode et sous traitance,

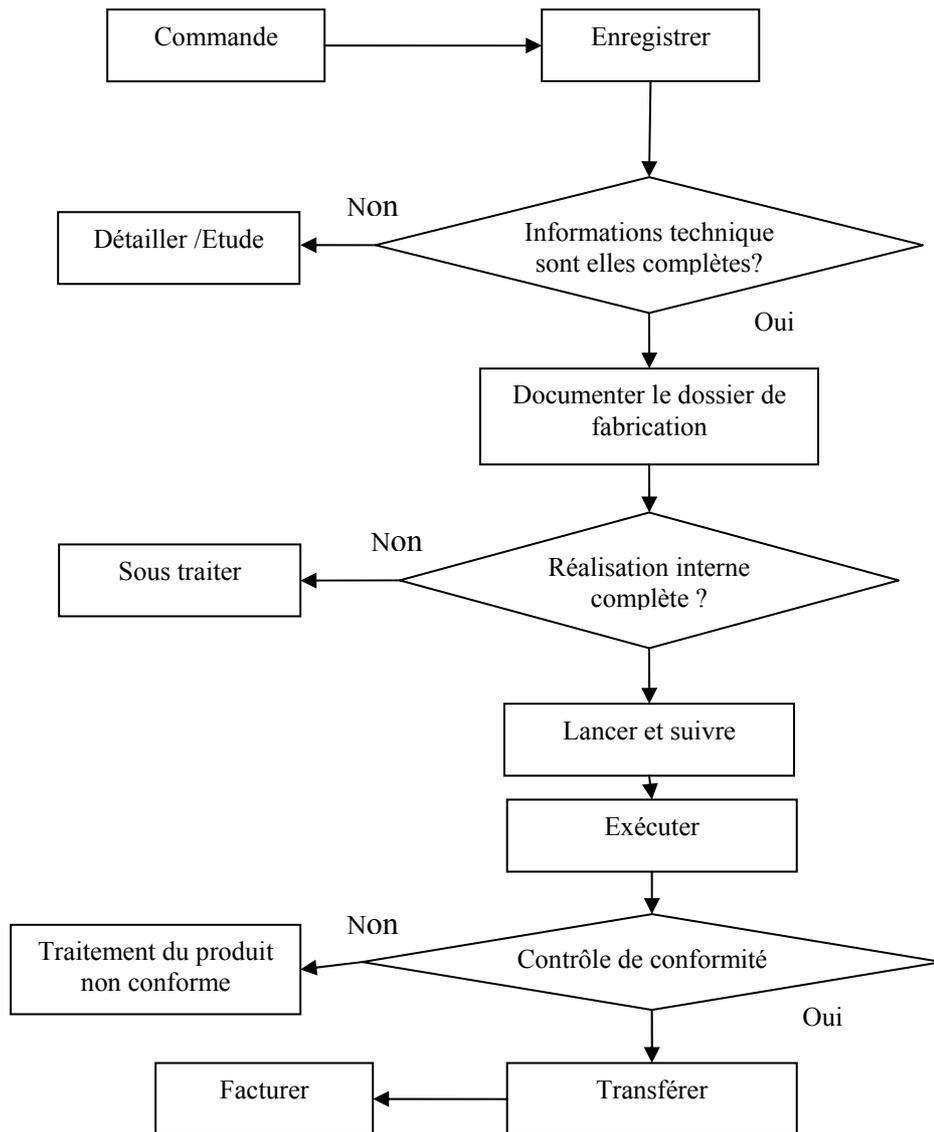
- \_ Service maintenance conditionnelle,
- \_ Service des technologies de l'information et des communications,
- \_ Service Approvisionnement.

#### **4.5.1 Service fabrications mécaniques**

Les structures de fabrication mécanique sont chargées du design et de la fabrication d'organes mécaniques ou de chaudronnerie pour des clients externes ou internes (département maintenance ou autres service SME).

La fabrication mécanique est une activité de production qui nécessite normalement un logiciel spécifique. A cet effet les commandes de fabrication seront traitées comme ordre de travail (OT). Les devis seront obtenus dès la préparation de l'intervention sur la base des coûts et des consommations matière prévisionnelles. Les prix de revient réels seront obtenus à la clôture de l'ordre de travail (OT).

La définition des gammes d'interventions détaillées est nécessaire. L'organigramme (Fig. 4.2) illustre la circulation des documents entre le service de fabrications mécanique et autres services.



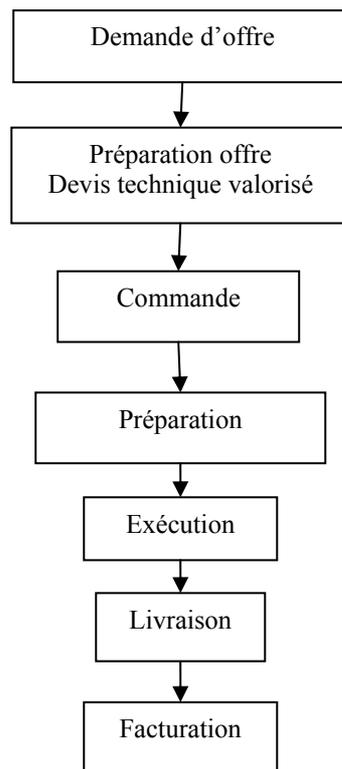
**Figure 4.2 :** Déroulement d’une activité du service de fabrication mécanique

#### 4.5.2. Département Maintenance

##### 4.5.2.1 Service maintenance industrielle externe

La préparation des travaux de maintenance tiers est assurée par le service technique. L’exécution des travaux est assurée par le service de maintenance extérieure. Il dispose d’un effectif de maintenance permanent basé au niveau de l’unité SME, et des équipes temporaires.

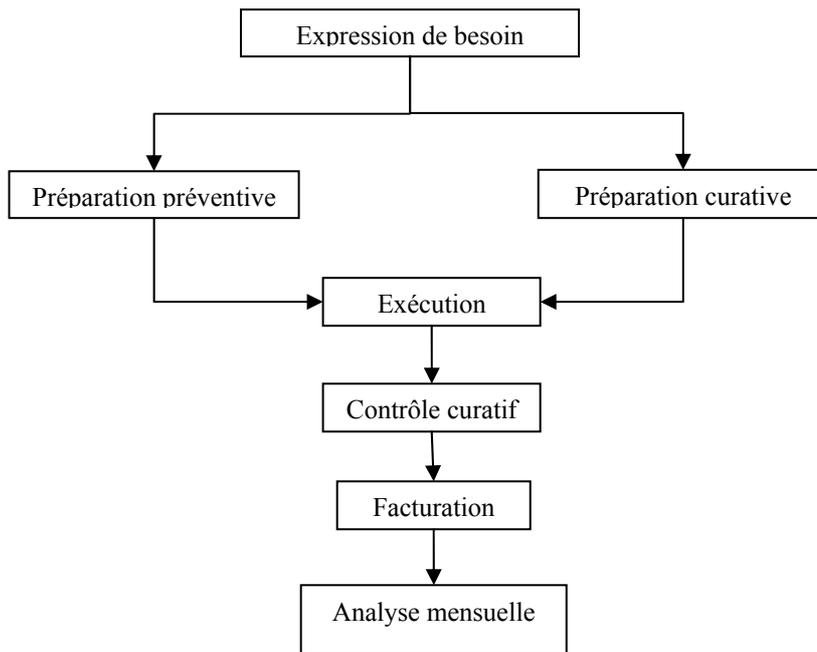
Les équipes constituées d’un personnel temporaires sont pilotées par un chef de projet. Le personnel des équipes résidentes est affecté à des travaux sous traités à SME selon la procédure décrite ci-dessous(Fig. 4.3) , ou mis à disposition des services de maintenance du client.



**Figure 4.3 :** les différentes étapes de la maintenance externe

#### 4.5.2.2 Service technique

Le service technique est responsable de la maintenance des équipements SME, mais n'assure pas la réalisation (Fig.4.4). Il gère les dossiers techniques des équipements assure le lancement, le suivi des travaux de maintenance qui sont exécutés par le service maintenance extérieure.



**Figure 4.4 :** les activités d'une maintenance interne

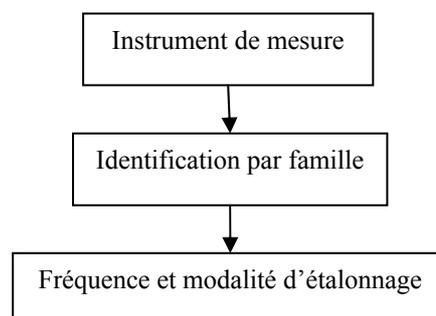
#### 4.5.2.3 Section parc roulant

La section Parc roulant est chargée de la maintenance du parc roulant et engins pour les clients externes et pour SME. La procédure de maintenance est identique à celle utilisée pour les équipements SME.

#### 4.5.3 Service méthode et sous-traitance

Le service méthode et sous-traitance est chargé de l'étalonnage des instruments et outillage, des contrôles de conformité et de la sous traitance.

1. **Etalonnage:** des étalonnages périodiques sont réalisés sur les instruments et divers outillage (Fig. 4.5).

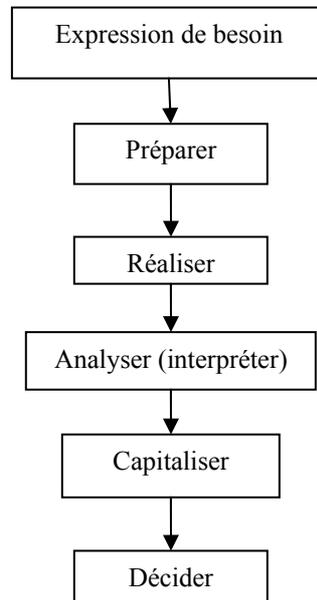


**Figure 4.5 :** Les étapes d'une opération d'étalonnage

2. **Sous traitance:** Sous traitance en tant que donneur d'ordres pour la confection des gabarits ou des pièces mécaniques spécifique.

#### 4.5.4 Service maintenance conditionnelle

La maintenance conditionnelle, consiste à effectuer des analyses vibratoires sur les machines clients est une mission du service ‘ ‘ maintenance conditionnelle’ ’ (Fig. 4.6). Ce service opérationnel est rattaché à une direction centrale de la filiale SME.



**Figure 4.6 :** Maintenance conditionnelle

L'étape expression de besoin permet d'établir une convention et un planning d'intervention avec le client, la phase préparation permet de:

- Identification de l'équipement,
- Recueil de caractéristiques cinématiques, plans et catalogue machine,
- Information sur l'historique des machines,
- Calcul cinématique,
- Création de la base de donnée (logiciel DIVA),
- Définition des ateliers,
- Codification et définition des machines (identification des seuils selon des Normes ISO 10816),
- Configuration des paramètres des points de mesures,
- Création de la ronde de mesures,
- Vérification de l'appareil de mesure Movilog2,
- Chargement de la ronde dans l'appareil de mesures Movilog2,
- Check List et constat de mesures.

Les opérations concernant la réalisation sont:

- Check List de vérification visuelle de la machine,
- Nettoyage des points de mesures et collage des pastilles,
- Prise de mesures,
- Analyse ponctuelle sur le collecteur de données Movilog2,
- Constat de mesures à remettre au client avec recommandation avant rapport final.

Pour la phase analyse et interprétation :

- Déchargement de la ronde de mesures sur micro- ordinateur (logiciel DIVA),
- Analyse spectrale,
- Configuration des paramètres soft si nécessaire pour une analyse profonde,
- Interprétation de l'état vibratoire.

Une fois, la phase analyse et interprétation est achevée, un rapport avec recommandation et mesures à prendre, sera établi.

#### **4.5.5 Service des technologies de l'information et des communications**

Ce service est chargé de l'administration et de l'exploitation de l'informatique, de la numérisation des plans et de la mise en œuvre de la gestion électronique des documents pour tous les sites ERCE.

#### **4.5.6 Service Approvisionnement**

Le service approvisionnement assure les fonctions achat et la gestion des stocks.

#### **4.6 Principaux équipements de la société :**

Les équipements de l'entreprise SME (voir Tableau 4.1) sont constitués principalement de:

- Machines outils
- Matériel de manutention et levage
- Matériel de transport

<i>Catégories</i>	<i>Caractéristiques techniques</i>
Scies	Capacité de coupe jusqu'à 600 mm
Équipement de perçage	Diamètre maxi 50 mm
Équipements de tournage	Entre pointe max : 6500 mm Diamètre : 1250 mm
Équipement de fraisage <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aléseuses</li> <li>• Mortaiseuses</li> </ul>	Dimensions : 800x800mm Course utile : 450mm
Équipement de chaudronnerie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cisailage : 14mm</li> <li>• Pliage : 12mm</li> <li>• Roulage : 30mm</li> <li>• Cintrage : 80x80</li> </ul>
Oxycoupage CNC	Épaisseur : 300mm
Découpage Plasma	Épaisseur : 100mm
Manutention	Grues : 300tonnes Chariots élévateurs : 7tonnes
Outillages spécifiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perceuses magnétiques</li> <li>• Aléseuses portatives</li> <li>• Casse écrous</li> <li>• Emporte pièces</li> <li>• Appareil de montage de roulements par inductions</li> <li>• équipement de soudure four</li> <li>• Vérins 600tonnes</li> </ul>
Deux appareils de mesure <b>Movilog2</b> pour la maintenance conditionnelle	

**Tableau 4.1 :** Catégories et caractéristiques des équipements de production de SME

#### 4.7 Projets réalisés

Les projets réalisés par l'entreprise SME sont:

- Fabrication et montage de la tour de conditionnement Cimenterie Hamma Bouziana
- Fabrication et montage filtres à manches Cimenterie Ain El Kebira
- Réalisation filtres à manches unité amante Bordj BouaririDj et plâtrière Ghardaia
- Réalisation et montage des doseurs Cimenterie Hadjar Soud et Hamma Bouziana
- Montage et bandages et galets four plâtrière fleuris ERCO
- Mécanisation de l'unité de production de plâtre de Djemila
- Changements bandages, viroles et maintenance des fours des cimenteries de l'Est

## 4.8 Le processus de fabrication des ciments

Le processus de fabrication du ciment se compose de trois parties essentielles comme indique le schéma (Fig. 4.7).

### 4.8.1 Carrière:

- **Abattage** : les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment, essentiellement le calcaire et l'argile, sont extraites de la carrière par abattage.
- **Transport** : les matières premières sont transférées dans un dumper
- **Concassage et transport** : les matières premières, après concassage, sont transportées à l'usine par un tapis roulant où elles sont stockées et homogénéisées.

### 4.8.2 Broyage cru et cuisson:

- **Broyage cru** : un broyage très fin permet d'obtenir une farine crue.
- **Cuisson** : la farine crue est préchauffée puis passe au four : une flamme atteignant 2000 °C porte la matière à 1500 °C, avant qu'elle ne soit brutalement refroidie par soufflage d'air. Après cuisson de la farine, on obtient le clinker, matière de base nécessaire à la fabrication de tout ciment.

### 4.8.3 Stockage, Conditionnement, Expédition:

- **Broyage** : le clinker et le gypse sont broyés très finement pour obtenir un « ciment pur ». Des constituants secondaires sont également additionnés afin d'obtenir des ciments composés
- **Stockage, Conditionnement, Expédition** : les ciments stockés dans des silos sont expédiés en vrac ou en sacs vers leurs lieux de consommation.

L'objectif de cette partie, est de présenter les différentes interventions externes effectuées par l'entreprise SME aux niveaux des cimenteries de l'Est.

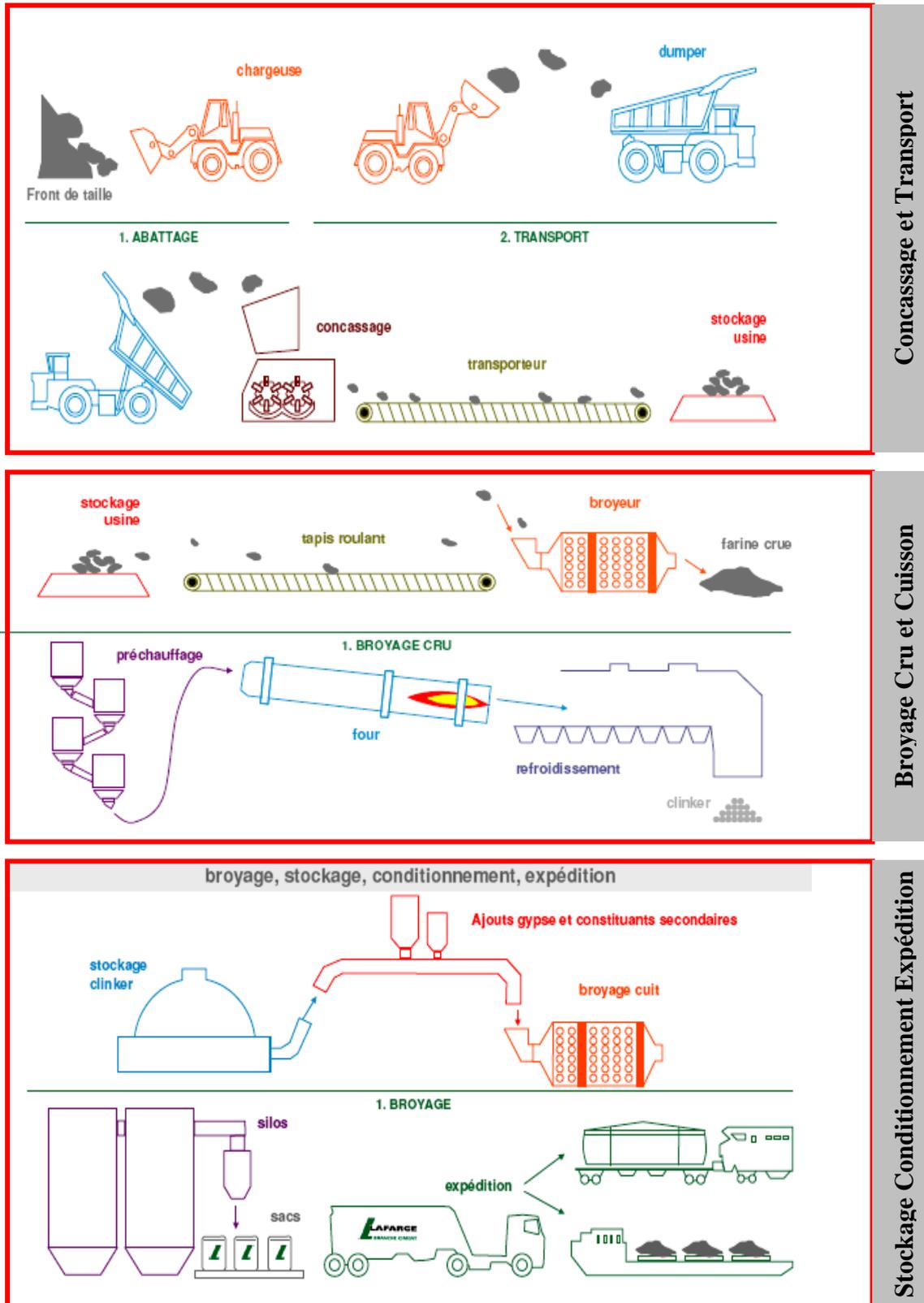


Figure 4.7: Processus de fabrication des ciments

#### 4.9 Les interventions externes (Maintenance préventive)

Les principales interventions externes (maintenance préventive) des techniciens de la SME au niveau des cimenteries sont :

N°	Désignation
1	Electrofiltre
2	Tour de conditionnement
3	Filtre silo Homogénéisation
4	Filtre tirage séparateur X 406
5	Filtre tirage broyeur ciment X 407
6	Filtres ensacheuse
7	Filtre vrac camion
8	Filtre ciment N ° 1
9	Filtre ciment N ° 2
10	Filtre ciment N ° 3
11	Filtre ciment N ° 4
12	Réseau air comprimé
13	Circuit eau des différentes Postes

**Tableau 4.2:** Les différentes interventions externes

Le détail des travaux de maintenance à effectuer sur chaque système est énuméré sur les tableaux suivants :

##### 1. ELECTROFILTRE:

DESIGNATION	NATURE DES TRAVEAUX
<b>Pompe a vis pneumatique</b>	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Changement kit de joint clapet
	Changement kit de joint pompe
	Contrôle pièces d'usure
<b>Sas</b>	Contrôle et graissage roulement
	Vidange du moto réducteur
	Changement roulements

<b>Chaîne traînante</b>	Contrôle et graissage des roulements
	Changement des maillons usés
	Changement roulement tambour commande
	Changement roulement tambour côté opposé
	Changement roulement tambour de tension
	Vidange et remplissage moto réducteur
<b>ELECTROFILTRE</b> (Partie intérieure)	Contrôle des électrodes émissives/réceptrices
	Changement des tiges de fixation usées
	Contrôle et réglage des marteaux de frappe
	Nettoyage des isolateurs

**Tableau 4.3:** Les différents éléments à contrôler pour « Electrofiltre »

## 2. Tour de conditionnement:

DESIGNATION	NATURE DES TRAVEAUX
Tour de conditionnement	<b>VisJ1U11-1:</b>
	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Contrôle et graissage des coussinets
	confection d'une porte de visite sous le clapet
	Vidange et remplissage moto réducteur
	<b>Double clapet J 1 K13:</b>
	Changement roulements
	Changement de la came du clapet
	Vidange et remplissage moto réducteur
	<b>Chaîne traînante J1 P12:</b>
	Contrôle et graissage des roulements
	Changement des maillons usés
	Vidange et remplissage moto réducteur
	Changement roulement tambour commande
	Changement roulement tambour côté opposé
	Changement roulement tambour de tension
	<b>Pompe à eau 01K16:</b>
	Nettoyage des filtres à boue+lances injection eau
	Entretien flotteur mécanique bache à eau

**Tableau 4.4 :** Les différents éléments à contrôler pour « Tour de conditionnement »

**3. Filtre silo homogénéisation :**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Nettoyage de la totalité manches
	Entretien du système de frappage
	Réparation conduite de dépoussiérage
Ventilateur	Vidange et remplissage du coupleur hydraulique
	Contrôle et Graissage des roulements
	Changement roulements
	Nettoyage de la turbine
	Entretien vannes
	Changement des courroies
Vis filtre	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Vidange moto réducteurs
Sas filtre	Graissage des paliers
	Vidange moto réducteurs

**Tableau 4.5 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre silo Homogénéisation»**4. Filtre tirage séparateur X 406:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Nettoyage de la totalité des manches
	Entretien système de frappage
	Réparation conduite de dépoussiérage
Ventilateur	Changement roulements
	Nettoyage de la turbine
	Contrôle et graissage des roulements
	vidange et remplissage du coupleur
	Entretien de la vanne DAPOT
Vis 1 et 2	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Vidange des moto réducteurs
Sas 1 et 2	Graissage des paliers
	Vidange des moto réducteurs

**Tableau 4.6 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre tirage séparateur X 406»**5. Filtre tirage broyeur ciment X 407:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Nettoyage de la totalité des manches
	Entretien système de frappage
	Réparation conduite de dépoussiérage
Ventilateur	Changement roulements
	Nettoyage de la turbine
	Contrôle et graissage des roulements

	vidange et remplissage du coupleur
	Entretien de la vanne DAPOT
Vis 1 et 2	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Vidange des moto réducteurs
Sas 1 et 2	Graissage des paliers
	Vidange des moto réducteurs

**Tableau 4.7 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre tirage broyeur ciment X407»

#### 6. Filtre ensacheuse 2:

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Nettoyage de la totalité des manches
	Entretien du système de frappage
	Réparation des conduites dépoussiérage usées
Ventilateur	Nettoyage de turbine
	Vidange coupleur hydraulique
	Changement des courroies
	Changement roulements
	Entretien vannes
	Changement joint de compensation
Vis	Contrôle et graissage des roulements
	Changement roulements
	Vidange moto réducteurs
Sas	Graissage des paliers
	Vidange moto réducteurs

**Tableau 4.8 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre ensacheuse 2»

#### 7. Filtre vrac camion :

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Nettoyage de la totalité des manches
	Entretien du système de frappage
	Réparation des conduites usées
Ventilateur	Nettoyage de turbine
	Changements des courroies
	Changement roulements
	Entretien vannes
	Réparation joint de compensation
Sas	Graissage des paliers
	Vidange moto réductrice

**Tableau 4.9:** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre vrac camion»

**8. Filtre ciment N ° 1:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Changement manches
	Nettoyage conduit de dépoussiérage
	Nettoyage corps du filtre
	Etanchéité portes de manches
	Entretien du système de frappe : réservoirs, soupapes, rampes d'air et flexibles
	Changement goulotte sous sas du filtre
	Ventilateur
Equilibrage de la turbine	
Entretien vannes (nettoyage et graissage palier)	
Réparation joints de compensations refoul/aspirat	
Chassis et fixation ventilateur	
Nettoyage alentour ventilateur	
Sas	Vidange et remplissage moto réducteur
	graissage roulement
Clapets	Entretien et nettoyage clapets double sur silos

**Tableau 4.10** : Les différents éléments à contrôler pour « Filtre ciment N ° 1 »**9. Filtre ciment N ° 2:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Changement manches
	Nettoyage conduite de dépoussiérage
	Nettoyage corps du filtre
	Etanchéité portes de manches
	Entretien du système de frappe :
	Nettoyage grilles du filtre
Ventilateur	Nettoyage de la turbine
	Entretien vannes (nettoyage et graissage palier)
	Réparation joints de compensations refoulement aspiration
	Chassis et fixation ventilateur
	Nettoyage alentour ventilateur
Sas	Vidange et remplissage moto réducteur
	graissage roulement
Clapets	Entretien et nettoyage clapets double sur silos

**Tableau 4.11** : Les différents éléments à contrôler pour « Filtre ciment N ° 2 »

**10. Filtre ciment N ° 3:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Changement manches
	Nettoyage conduite de dépoussiérage
	Nettoyage corps du filtre
	Etanchéité portes de manches
	Entretien du système de frappe : réservoirs, soupapes, rampes d'air et flexibles
	Changement goulotte sous sas du filtre
Ventilateur	Nettoyage de la turbine
	Equilibrage de la turbine
	Entretien vannes (nettoyage et graissage palier)
	Réparation joints de compensations refoulement et aspiration
	Châssis et fixation ventilateur
	Nettoyage alentour ventilateur
Sas	Vidange et remplissage moto réducteur
	graissage roulement
Clapets	Entretien et nettoyage clapets double sur silos

**Tableau 4.12 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre ciment N ° 3»**11. Filtre ciment N ° 4:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Filtre	Changement manches
	Nettoyage conduite de dépoussiérage
	Nettoyage corps du filtre
	Etanchéité portes de manches
	Entretien du système de frappe : réservoirs, soupapes, rampes d'air et flexibles
	Nettoyage grille du filtre
Ventilateur	Nettoyage de la turbine
	Equilibrage de la turbine
	Entretien vannes (nettoyage et graissage palier)
	Réparation joints de compensations refoulement et aspiration
	Châssis et fixation ventilateur
	Nettoyage alentour ventilateur
Sas	Vidange et remplissage moto réducteur
	graissage roulement
Clapets	Entretien et nettoyage clapets double sur silos

**Tableau 4.13 :** Les différents éléments à contrôler pour « Filtre ciment N ° 4»

**12. Réseau air comprimé:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Compresseur basse pression	Installation de 06 vannes DN100 sur le circuit eau compresseurs basse pression

**Tableau 4.14:** L élément à contrôler pour « Réseau air comprimé»**13. Circuit eau des différentes postes:**

DESIGNATION	NATURE DES TRAVAUX
Poste	Démontage et remontage de (06) vannes et six clapets de non retour
	Raccordement de (02) pompes sur le circuit eau DN100 et Installation d'un by-pass

**Tableau 4.15:** L élément à contrôler pour « Circuit eau des différentes postes»**4.10 Les interventions externes (Maintenance conditionnelle)**

Les principales interventions externes (maintenance conditionnelle) des techniciens de la SME au niveau des cimenteries sont :

N°	Désignation
1	Carrière
2	Cru
3	Cuisson
4	Ciment
5	Filtration
6	Utilités

**Tableau 4.16:** Les différentes interventions externes (maintenance conditionnelle)

**1. Carrière:**

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
Carrière	Concass-Calcaire-A1 M01I / 1
	Concass-Calcaire-A1 M01 / 2
	Tablier-Métallique-A1J01
	Stacker A1 LI2
	Stacker A1 L22
	Concass-Ajouts-G1M01
	Concass-Ajouts-G1 M02
	Tablier Métallique G1 J01
	Transporteur –A1 J06
	Transporteur –A1 J07
	Transporteur –A1 J04

**Tableau 4.17:** Les différents éléments à contrôler pour « Carrière»**2. Cru:**

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
Cru	Broyeur cru-1- R1 MOI
	Ventilateur cru-1- R1S07
	Broyeur cru-2- R2M01
	Ventilateur cru-2- R2S07
	Séparateur cru-1R1S01
	Séparateur cru-2R2S01
	Elévateur cru-1 R1 J01
	Elévateur cru-2 R2J01
	Transporteur A1UO1
	Transporteur A1UI1
	Pont-Gratteur A1L14
	Pont-Gratteur A1LI5
	Gratteur-Poptique A1L24

**Tableau 4.18:** Les différents éléments à contrôler pour « Cru»**3. Cuisson:**

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
Cuisson	Commande Four 1 WIWOI
	Ventilateur tirage JIJ01
	Ventilateur tirage J1 P01
	Commande Four 2 W2W01
	Ventilateur tirage J2JOI
	Ventilateur tirage J2P01
	Transport Augets W1 U27
	Transport Augets W1 U21

	Transport Augets W1 U22
	Elévateur H1 U07
	Elévateur UIU17

**Tableau 4.19:** Les différents éléments à contrôler pour « Cuisson»

#### 4. Ciment :

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
<b>Ciment</b>	Broyeur ciment –Z1M01
	Ventilateur tirage– Z1S03
	Ventilateur Z1P05
	Séparateur – Z1S01
	Broyeur ciment –Z2M01
	Ventilateur – tirage Z2S03
	Ventilateur Z2P05
	Séparateur –ciment Z2S01
	Elévateur Z1J01
	Elévateur Z2J02

**Tableau 4.20:** Les différents éléments à contrôler pour « Ciment»

#### 5. Filtration :

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
<b>Filtration</b>	Ventilateur Filtre H1P33
	Ventilateur – Z1P33
	Ventilateur – Z2P33
	Ventilateur – A1P14
	Ventilateur – R1P14
	Ventilateur – R2P14

**Tableau 4.21:** Les différents éléments à contrôler pour « Filtration»

## 6. Utilités :

DESIGNATION	ELEMENT A CONTROLER
Utilités	Compresseur –S3U01
	Compresseur –S3U02
	Compresseur –S3U03
	Compresseur –Z1U11
	Compresseur –Z2U11
	Compresseur –Z1U12
	Compresseur –Z2U12
	Compresseur –Z1U13
	Compresseur –Z2U13
	Compresseur –S4L81
	Compresseur –S4L82
	Compresseur –S4L83
	Compresseur –S4L84
	Compresseur –S4P81
	Compresseur –S4P82
	Suppresseur – W1A21
	Suppresseur – W2A21
	Suppresseur – W1A22
	Suppresseur – W2A22

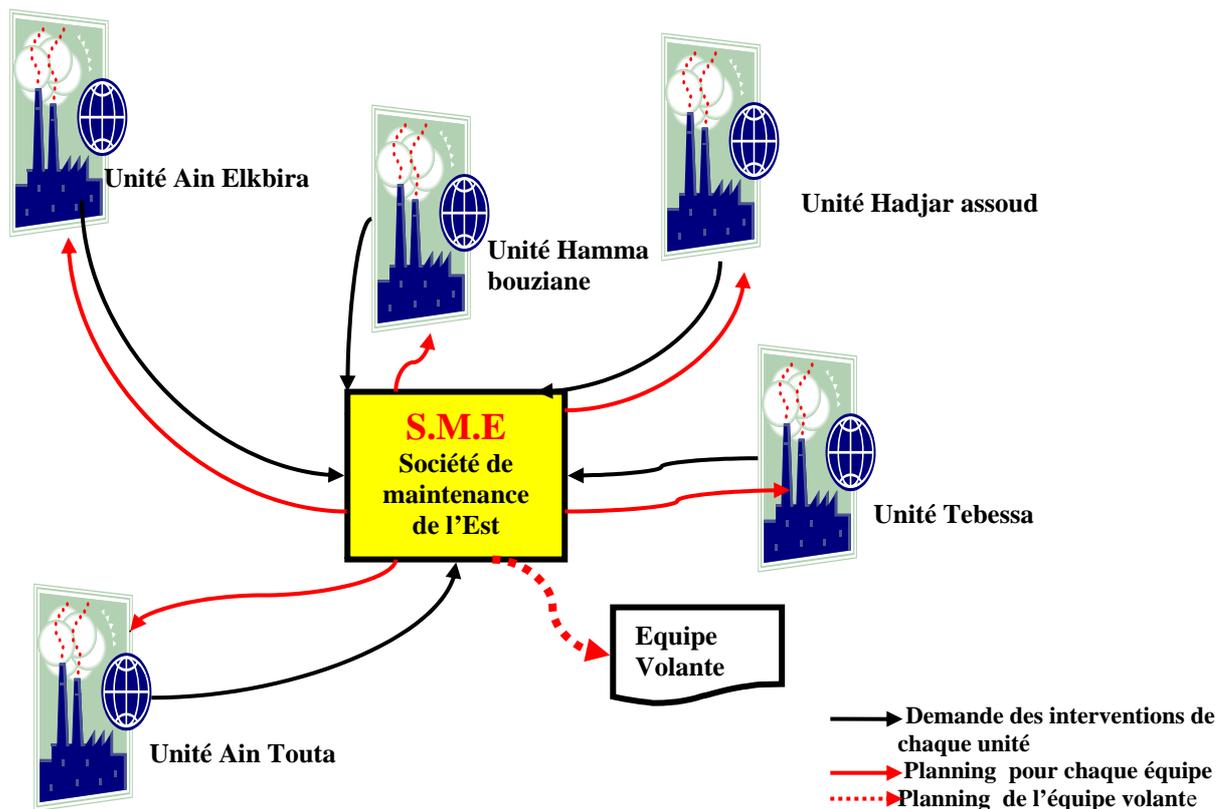
**Tableau 4.22:** Les différents éléments à contrôler pour « utilités»

#### 4.11 Approche pour l'ordonnancement et l'affectation des activités de maintenance

Le problème que nous traitons consiste à affecter et à ordonnancer des tâches de maintenance préventives à un ensemble de ressources humaines identiques (équipes). L'approche de résolution doit tenir compte des dates de disponibilité des équipements sur lesquels auront lieu les tâches (Fig.4.8).

Le principe de la démarche de résolution proposée, consiste en un traitement du problème en deux étapes :

- Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel des tâches connues à priori au début de l'ordonnancement pour construire une séquence admissible des tâches qui servira de base pour l'ordonnancement en temps réel.
- Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement en temps réel des tâches aléatoire, l'approche proposée permet de définir une position d'insertion dès l'arrivée de la tâche aléatoire, dans le cas où elle est acceptée pour l'exécution par la ressource disponible.



**Figure 4.8 :** Ordonnancement prévisionnel des tâches préventives systématiques

#### 4.12 Les données de la maintenance

Dans notre cas, nous considérons que chaque unité de production, doit subir plusieurs interventions de maintenances préventives systématiques et maintenance préventive conditionnelle déterministes dont les périodes sont données d'avance.

Ces tâches de maintenance sont des interventions périodiques prévues toutes les périodes  $[r_i, d_i]$  (Cet intervalle dénote la périodicité optimale de la tâche de maintenance).

Chaque tâche de maintenance préventive est caractérisée par une gamme de maintenance préétablie par le service maintenance ou par le constructeur de l'équipement considéré. On notera par :

- Les notations utilisées dans le chapitre précédent, pour les tâches,
- Pour les ressources nous avons :
  1. une équipe sur chaque unité de production,
  2. Equipe volante,
  3. Deux équipes pour la surveillance vibratoire (maintenance conditionnelle).

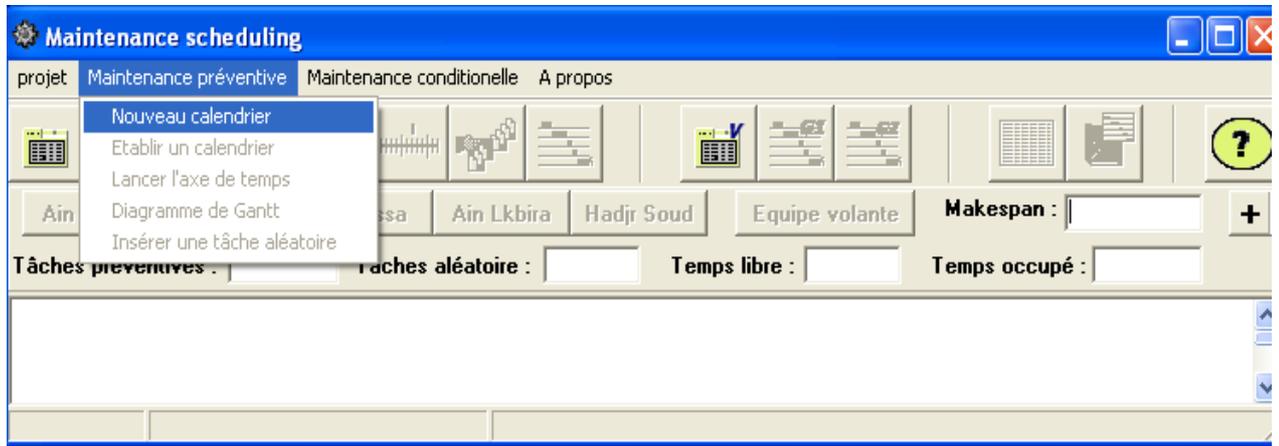
#### 4.13 La fonction objective :

Le but est de proposer une méthode qui fournit un planning pour les tâches de la maintenance préventive systématique et la maintenance préventive conditionnelle. L'objectif de l'optimisation consiste à minimiser le nombre de tâches en retards.

Les contraintes imposées par les clients à leurs fournisseurs s'expriment souvent en terme de délai, ce qui nous fait naturellement tourner vers la minimisation du nombre tâches en retards ( $\sum L_i$ ). Dans le cas où les tâches sont toutes disponibles à l'instant initial, le problème est alors résolu dans la littérature par l'algorithme de Moore [MOOR, 86].le principe consiste à construire progressivement un ordonnancement selon la règle EDD (Earliest Due Date), dès qu'un retard apparaît dans l'ordonnancement partiel, l'opération de plus grande délai déjà placée est reportée en fin de l'ordonnancement par application de l'algorithme de Moore sont alors rejetées [ESQU et LOPE, 99].

#### 4.14 Ordonnancement prévisionnel des tâches (maintenance préventive systématique)

Nous présenterons dans ce qui suit les différentes méthodes et algorithmes. La figure (Fig. 4.9) indique, l'interface d'un outil dédié au problème traité.



**Figure 4.9 :** l'interface graphique

Dans notre cas, nous considérons que chaque unité de production, doit subir plusieurs interventions de maintenances préventives systématiques et maintenance préventive conditionnelle (surveillance vibratoire) déterministes dont les périodes sont données d'avance. Nous proposons une approche statique du problème qui consiste à affecter et à ordonnancer un ensemble de tâches (non sécables) à un ensemble de ressources humaines (équipe).

##### 4.14.1 Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel :

Nous avons développé une méthode comme indique l'algorithme (algorithme 4.1) . Partant de la séquence des tâches  $E = \{T_1, \dots, T_N\}$ , pour chaque unité de production, l'approche débute par une procédure (Algorithme 4.3 : Procédure Construction\_EDD), elle permet de trier la liste des tâches  $E$  selon l'ordre EDD (Earliest Due Date), suivi par procédure permettant de minimiser les tâches rejetées (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche\_Rejeté). Le résultat de cette approche est de fournir une liste de tâches admissible notée (List\_TAdmiss) pour chaque équipe affectée à l'unité de production. Pour les tâches rejetées de toute unités seront regroupées en liste (List\_Global) et ordonnancer par l'algorithme (algorithme 4.2). La figure (Fig. 4.10) présente la fenêtre de saisis des données de la maintenance, pour chaque unité. La figure (Fig. 4.8) illustre le flux des informations entre la SME et les clients (les différentes cimenteries).

Le principe de l'algorithme pour l'équipe volante, est le suivant : partant des séquences des tâches rejetées par les différentes équipes, la méthode débute par l'appel à la

procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Construction\_EDD), suivi par procédure permettant de minimiser les tâches rejetées (Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté), le résultat de cet algorithme est de fournir une liste de tâches admissible notée (*List\_TVAdmiss*). Pour les tâches rejetées fournies par la procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté), seront (ordonnées) exécutées par l'appel à la sous-traitance.



tâches	durée (P)	r	d
tâche 1	53	192	1418
tâche 2	60	14	167
tâche 3	37	424	592
tâche 4	40	89	235
tâche 5	99	365	720
tâche 6	43	104	229
tâche 7	91	272	385
tâche 8	54	215	403

**Figure 4.10** : Données de la maintenance préventive systématique de H.Bouziane

**Etape 0** : Entrée E : /\*Liste de tâches à ordonnancer \*/ List\_Global :=  $\emptyset$ .

**Etape 1** : Procédure Construction\_EDD (Entrée : E, Sortie List\_TAdmiss, List\_TRejet)

**Etape 2** : Si List\_TRejet =  $\emptyset$  Alors

    Aller à étape 4

    Sinon

        Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté (entrée-sortie : List\_TAdmiss ,List\_TRejet),  
        aller à Etape 3

    FinSi

**Etape 3** : Si List\_TRejet  $\neq \emptyset$  Alors

    List\_Global := List\_Global  $\cup$  List\_TRejet

    Sinon

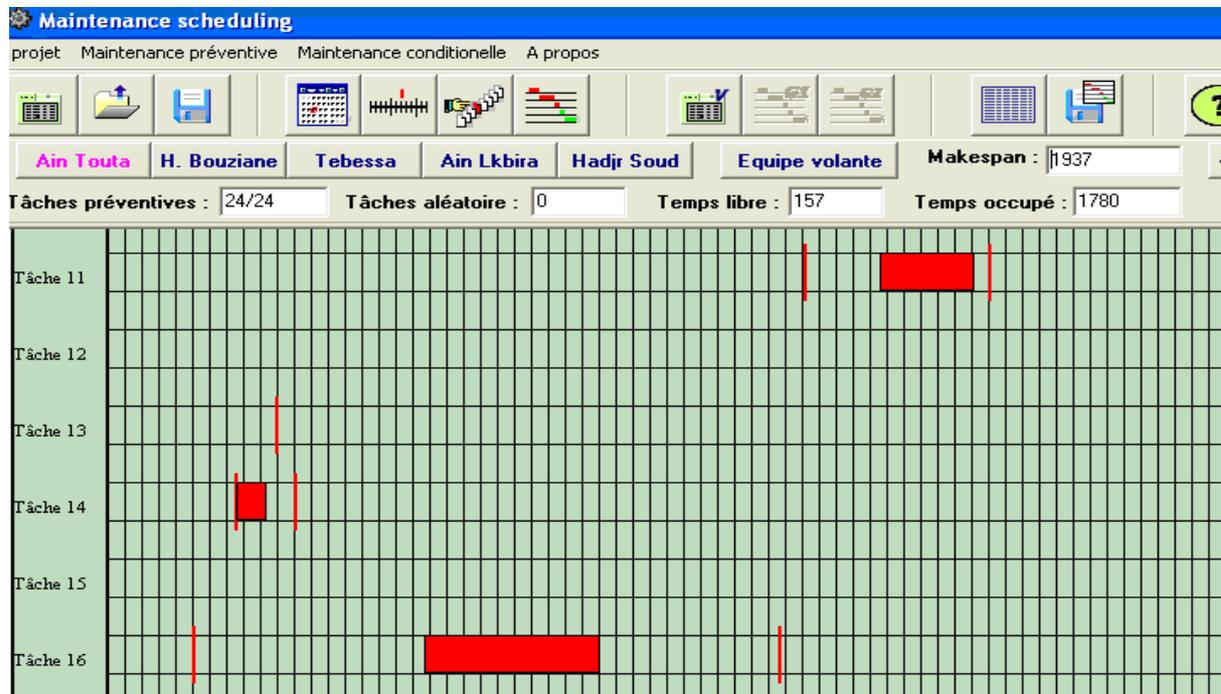
        Aller à étape 4

    FinSi

**Etape 4** : List\_TAdmiss est la solution finale.

**Algorithme 4.1** : Algorithme principal de l'ordonnement prévisionnel par équipe

A titre d'exemple la figure (Fig. 4.10), indique l'ordonnancement des tâches de l'unité de Ain touta, et on remarque que parmi les huit tâches, six sont ordonnancées et deux envoyées (rejetées) à l'équipe volante pour être ordonnancées.

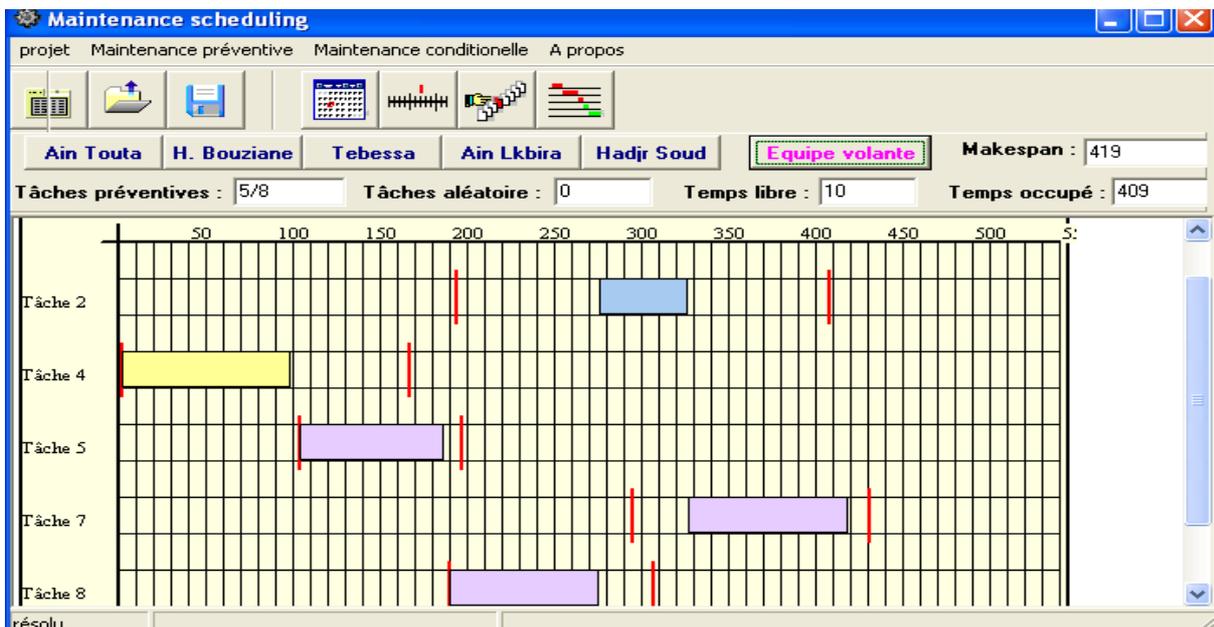


**Figure 4.11:** le Gantt de l'unité de Ain Touda

**Etape 0 :** Entrée *List\_Global* : /\*Liste de tâches à ordonnancer pour l'équipe volante \*/  
**Etape 1 :** Procédure Construction\_EDD (**Entrée :** E, **Sortie** *List\_TVAdmiss*, *List\_TRejet*)  
**Etape 2 :** Si *List\_TRejet* =  $\emptyset$  Alors  
Aller à étape 4  
**Sinon**  
Procédure Minimiser\_Tâche\_Rejeté (entrée-sortie: *List\_TVAdmiss*, *List\_TRejet*),  
aller à Etape 3  
**FinSi**  
**Etape 3 :** Si *List\_TRejet*  $\neq \emptyset$  Alors  
Appel à la sous-traitance  
**Sinon**  
Aller à étape 4  
**FinSi**  
**Etape 4 :** *List\_TVAdmiss* est la solution finale.

**Algorithme 4.2 :** Algorithme principal de l'ordonnancement prévisionnel pour l'équipe volante

La figure (Fig. 4.12), indique que le nombre total de tâches rejetées est de huit, et on remarque que parmi les huit, cinq tâches sont ordonnancées pour être exécutées par l'équipe volante et trois tâches sont rejetées (Appel à la sous-traitance).



**Figure 4.12 :** le Gantt de l'équipe volante

La procédure (Algorithme 4.3 : Construction\_EDD), débute par une liste de tâche triée en ordre croissant de date de fin d'exécution au plus tard, et à partir de cette liste, on aura

comme résultat, deux listes l'une contient les tâches pouvant exécutées dans leurs fenêtre temporelle  $[r_i, d_i]$ , et l'autre les tâches rejetées et qui seront traitées par la procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté).

```

Entrée :  $L = \{\text{Tâches rangées par ordre croissant de leur date } d_i\}$ ,  $n := \text{card}(L)$  ;
Nbr /* nombre de tâches parcourues */ , Nbr :=0 ;
List_TAdmiss :=  $\emptyset$  ; List_TRejet :=  $\emptyset$  ;
I:=1; J:=i+1; List_TAdmiss:= List_TAdmiss U  $\{T_i\}$ ;
Tant que  $i < n$  Faire
  Si  $d_i + p_i \leq d_j$  Alors
    List_TAdmiss:= List_TAdmiss U  $\{T_j\}$ ; Nbr:= Nbr +1;
  Sinon
    /* enlever la tâche de plus grande durée déjà placée*/
    k:= 1; Max:=  $p_k$ ; rang:= k;
    Tant que  $k < \text{Nbr}$  Faire
      Si  $\text{Max} < p_{k+1}$  Alors
        rang:= k+1; Max :=  $p_{k+1}$  ;
      Finsi
      k := k+1 ;
    Fin tant que
    List_TRejet:= List_TRejet U  $\{T_{\text{rang}}\}$ ; Nbr:= Nbr-1;
  Finsi
  i := i+1 ; j :=j+1 ;
Fin tant que

```

#### Algorithme 4.3: Procédure Construction\_EDD

La procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté) commence par le tri de la liste de tâches rejetées (*List\_TRejet*) par ordre croissant de leur date de disponibilité  $r_i$  puis on détermine la séquence de tâches de la liste admissible (*List\_TAdmiss*) dont laquelle on peut insérer la  $i^{\text{ème}}$  tâche de la liste rejetée (*List\_TRejet*). L'opération suivante est consacrée pour le calcul de la fenêtre élémentaire, dont laquelle on peut insérer la  $i^{\text{ème}}$  tâche rejetée, dans le cas où cette tâche ne provoque pas de retard pour les tâches déjà ordonnancées, on l'insère en position trouvée, sinon on l'insère pas et on passe à la tâche suivante.

```

Entrée: List_TAdmiss, List_TRejet, Sortie : List_TAdmiss, List_TRejet
n1:= card (List_TRejet) ; n2 := card (List_TAdmiss) ;
Trier les tâches de List_TRejet en ordre croissant de leur date de disponibilité  $r_i$ 
i:=1 ;
Tant que i < n1 Faire
/* déterminer la séquence de tâches de List_TAdmiss dont laquelle on peut insérer la  $i^{\text{ème}}$ 
Tâche de List_TRejet */
k:=1 ; Trouve : False ;
Tant que k <= n2 et trouve Faire
Si  $r_k + p_k + p_i \leq d_i$  Alors
k:=k+1 ;
Sinon
Q :=k ; trouve := True ;
Finsi
Fin tant que
k :=1 ;
Tant que k < q Faire
/*déterminer la fenêtre élémentaire entre les tâches en position [k] et [k+1] de List_TAdmiss*/
Fe:= [r_k +p_k , d_{k+1} -p_{k+1}];
Si  $r_k \in Fe$  Alors /** appartient
Si tâche i ne provoque pas de retard alors
List_TAdmiss:= List_TAdmiss U {Ti};
List_TRejet:= List_TRejet - {Ti};
k := k+Q+1 ;
Finsi
Sinon
k :=k+1 ;
Finsi
i :=i+1 ;
Fin tant que

```

**Algorithme 4.4 :** Procédure Minimiser\_Tache\_Rejeté**4.14.2 Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement prévisionnel :**

Pour la maintenance corrective (les tâches arrivant aléatoirement), nous avons deux possibilités pour les insérées : soit les insèrent dans le planning de l'équipe affectée à l'entreprise (*List\_TAdmiss*) ou dans le planning de l'équipe volante (*List\_TVAdmiss*). Pour minimiser le coût de la maintenance, on préfère d'affecter la tâche aléatoire à l'équipe sur site, dans le cas où l'insertion de cette tâche n'est pas possible, on opte pour l'équipe volante sinon on fait appel à la sous-traitance.

L'algorithme (Algorithme 4.5) permet la résolution du problème dynamique, dès l'arrivée d'une tâche aléatoire ( $T_{alae}$ ), la procédure (Algorithme 4.3 : Construction\_EDD) est exécutée, dans le cas où la tâche est insérée et ne provoque pas de retard pour les tâches ordonnancées, on arrête l'opération de recherche.

```

Entrée :  $List\_TAdmiss, List\_TVAdmiss, T_{alaet}$ 
/*  $T_{alaet}$  définie par date de disponibilité, durée et date au plus tard */
n1:=card ( $List\_TAdmiss$ ); n2:=card ( $List\_TVAdmiss$ );
Etape0 :  $L := List\_TAdmiss \cup \{T_{alaet}\}$  ;
    Procédure Construction_EDD (Entrée  $L$ , Sortie :  $L, List\_TRejet$ )
    Si  $List\_TRejet = \emptyset$  Alors
         $List\_TAdmiss := L$  ;
         $T_{alaet}$  est acceptée; aller à Etape3 ;
    Sinon
        Procédure Recherche-Pos-Inser (Entrée :  $List\_TAdmiss, T_{alaet}$ , Sortie :  $List\_TAdmiss$ ) ;
    Finsi
Etape1: Si  $n1 < \text{card} (List\_TAdmiss)$  Alors
    /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe sur site */; aller à Etape3 ;
Sinon
     $L := List\_TVAdmiss \cup \{T_{alaet}\}$ 
    Procédure Construction_EDD (Entrée :  $L$ , Sortie :  $L, List\_TRejet$ )
    Si  $List\_TRejet = \emptyset$  Alors
        /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe Volante */
         $T_{alaet}$  est acceptée;  $List\_TVAdmiss := L$  ; aller à Etape3 ;
    Sinon
        Procédure Recherche-Pos-Inser (Entrée :  $List\_TVAdmiss, T_{alaet}$ , Sortie :  $List\_TVAdmiss$ );
        aller à Etape2 ;
    Finsi
Finsi
Etape2: Si  $n2 < \text{card} (List\_TVAdmiss)$  Alors
    /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe volante */
     $T_{alaet}$  est acceptée;  $List\_TVAdmiss := L$  ; aller à Etape3 ;
Sinon
     $T_{alaet}$  est rejetée ; Appel à la sous-traitance ; aller à Etape3 ;
Finsi
Etape3: Fin.

```

**Algorithme 4.5** : Algorithme principal pour la maintenance corrective

Dans le cas contraire, la procédure (Algorithme 4.6 : Recherche-Pos-Inser) consiste à déterminer la position d'insertion de la tâche aléatoire. Dans le cas où la tâche ( $T_{alaet}$ ) n'est pas acceptée, une dernière tentative d'insertion consiste à procéder de la même manière avec l'équipe volante ( $List\_TVAdmiss$ ), finalement si la tâche ( $T_{alaet}$ ) n'est pas acceptée, on fait appel à la sous-traitance.

```

Entrée :  $List\_TAdmiss, List\_TVAdmiss, T_{alaet}$ 
/*  $T_{alaet} : [r_{alaet}, p_{alaet}, d_{alaet}]$  */ ;  $L := \emptyset$  ;
 $n1 := \text{card}(List\_TAdmiss)$  ; Trouve := false ;  $n2 := \text{card}(List\_TVAdmiss)$ 
 $L := List\_TAdmiss \cup \{T_{alaet}\}$  ;
Etape0: Procédure Construction_EDD (Entrée : L, Sortie L,  $List\_TRejet$ )
Si  $List\_TRejet = \emptyset$  Alors
     $T_{alaet}$  est acceptée; aller à Etape1 ;
Sinon
     $L := L - \{T_{alaet}\}$  ;
    /* déterminer la séquence de tâches dans L dont laquelle on peut insérer  $T_{alaet}$   $\{1, \dots, Q\}$  */
     $i := 1$  ;
    Tant que  $i < n$  et Trouve Faire
        Si  $r_i + p_i + p_{aleat} \leq d_{aleat}$  Alors
             $i := i + 1$  ;
        Sinon
             $Q := i - 1$ ; Trouve := True;
        Finsi
    Fin tant que
Si Trouve = True Alors
     $k := 1$  ;
    Tant que  $k < Q$  Faire
        /*déterminer la fenêtre élémentaire entre les tâches en position  $[k]$  et  $[k+1]$  de liste L*/
         $Fe := [r_k + p_k, d_{k+1} - p_{k+1}]$ ;
        Si  $r_{aleat} \in Fe$  Alors
             $L := L \cup \{T_{alaet}\}$  ;
            Procédure Construction_EDD (Entrée : L, Sortie L,  $List\_TRejet$ )
            Si  $List\_TRejet = \emptyset$  Alors
                 $T_{alaet}$  est acceptée; aller à Etape1 ;
            Sinon
                 $L := List\_TVAdmiss \cup \{T_{alaet}\}$  ; aller à Etape0;
            Finsi
        Finsi
     $K := k + 1$  ;
    Fin tant que
Finsi
Etape1 : Fin.

```

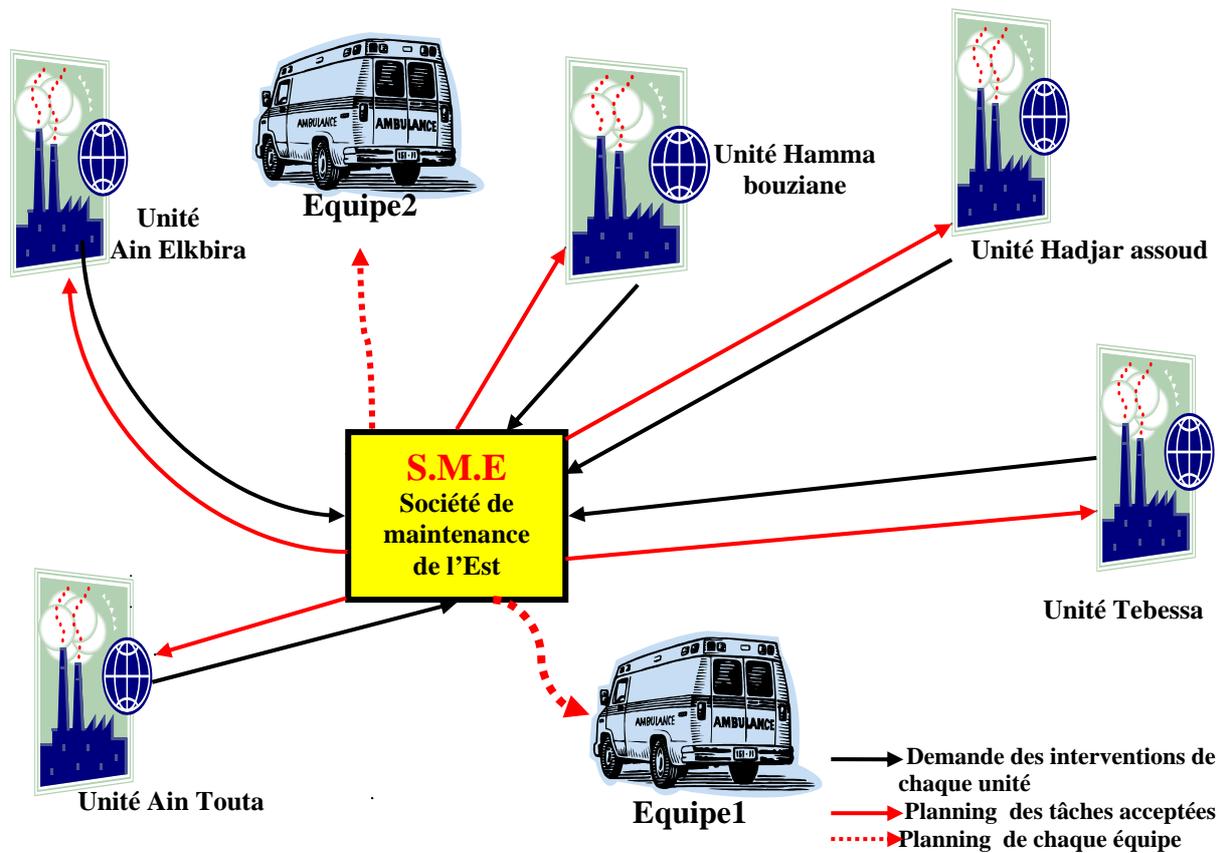
#### Algorithme 4.6 : Procédure Recherche-Pos-Inser

### 4.15 Ordonnancement prévisionnel (maintenance conditionnelle systématique):

#### 4.15.1 Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel :

Pour la maintenance conditionnelle (la surveillance vibratoire) nous avons deux équipes identiques et cinq unités de productions, dont chaque unité nécessite des contrôles systématiques sur un horizon de temps. Le but de cette approche, est d'affecter à chaque équipe un ensemble de tâches qui peuvent être exécutées dans leurs intervalle temporelle  $[r_i, d_i]$ , pour cela nous avons développé, une méthode comme indique par l'algorithme

(algorithme 4.7) . Partant de la séquence de liste des tâches  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ , qui représentent les tâches à ordonnancées pour toutes les unités de production, notre approche débute par le tri de chaque liste  $L_i$  par ordre croissant de leur date  $d_i$ , puis en fusionnant toutes les listes, en une liste globale (List\_Global), la procédure (Algorithme 4.8 : Procédure Affectation\_Par\_Equipe), à son tour construit deux listes (List\_Equip1, List\_Equip2); à partir de la liste (List\_Global), sachant que la liste (List\_Equip1) contient les tâches d'indice



**Figure 4.13 :** Ordonnancement prévisionnel des tâches de maintenance conditionnelle systématique

impair alors que la liste (List\_Equip2) contient la liste des tâches d'indice pair, afin d'équilibrer la charge des deux équipes. Cette répartition, suivi par l'ordonnancement de chaque liste (List\_Equip<sub>i</sub>) par la procédure (Algorithme 4.3 : Construction\_EDD), puis on procède à la minimisation des tâches rejetées par la recherche des marges libres avec la procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche\_Rejeté). L'interface graphique de la figure (Fig. 4.11) indiquée les tâches ordonnancées pour la deuxième équipe.

```

Entrée : L1, L2, L3, L4, L5: /*Listes des tâches de chaque unité */ ;
Sortie: List_Equip1, List_Equip2;
Etape0: Trier chaque liste de Li par ordre croissant de di;
          Fusionner les listes triées {L1, L2, L3, L4, L5} en List_Global ;
Etape1: Procédure Affectation_Par_Equipe (Entrée : List_Global, Sortie : List_Equip1, List_Equip2) ;
          L := List_Equip1 ;
Etape2: Procédure Construction_EDD (Entrée : L, Sortie L, List_TRejet) ;
          Si List_TRejet ≠ ∅ Alors
              Procédure Minimiser_Tâche_Rejeté (entrée-sortie :L, List_TRejet),
              List_TRejet1 := List_TRejet1 ∪ List_TRejet ;
          FinSi
Etape3: L := List_Equip2 ;
          Procédure Construction_EDD (Entrée : L, Sortie L, List_TRejet) ;
          Si List_TRejet ≠ ∅ Alors
              Procédure Minimiser_Tâche_Rejeté (entrée-sortie :L, List_TRejet),
              List_TRejet2 := List_TRejet2 ∪ List_TRejet ;
          FinSi
Etape4: Si List_TRejet1 ∪ List_TRejet2 = ∅ Alors
              /* List_Equip1, List_Equip2 sont t les solutions finales */ ; Aller à étape 5
          Sinon
              /* les tâches restantes ne peuvent pas ordonnancées Appel à la sous-traitance*/
          FinSi
Etape5: Fin

```

**Algorithme 4.7 :** Algorithme principal pour la maintenance conditionnelle systématique

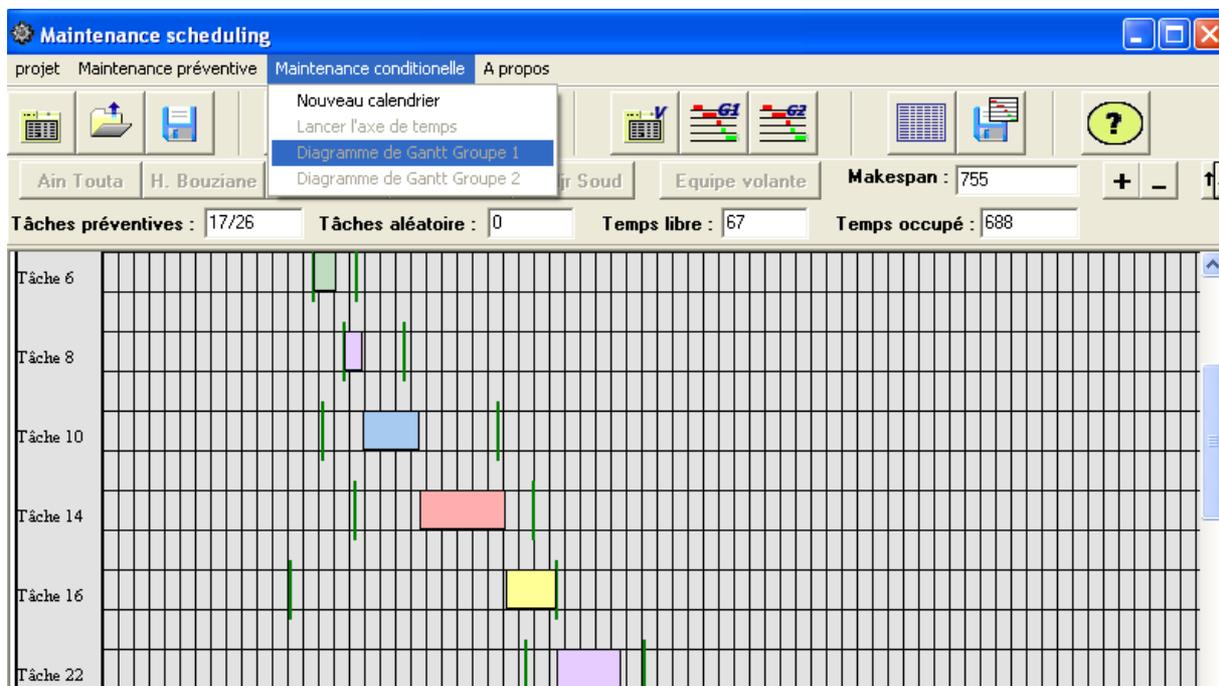
Les différentes couleurs dans le diagramme de Gantt de la figure (Fig. 4.14) permettent de spécifier et distinguer les tâches ordonnancées de chaque unité de production, affectées à la première l'équipe.

```

Entrée : List_Global ; /*  $T_i$  tâche de List_global de position  $i$  */
Sortie: List_Equip1, List_Equip2;
n := card (List_Global); i := 1 ; List_Equip1 :=  $\emptyset$  ; List_Equip2 :=  $\emptyset$ ;
Tant que  $i < n-2$  Faire
    List_Equip1 := List_Equip1  $\cup$   $\{T_i\}$ ;
    List_Equip2 := List_Equip2  $\cup$   $\{T_{i+1}\}$ ;
    i := i+2;
Fin tant que
Si  $n \text{ Modulo } (2) \neq 0$  Alors
    List_Equip1 := List_Equip1  $\cup$   $\{T_i\}$ ;
FinSi

```

**Algorithme 4.8 :** Procédure Affectation\_Par\_Equipe



**Figure 4.14 :** les tâches affectées à la première équipe (List\_Equip1)

#### 4.15.2 Ordonnancement des tâches aléatoire (maintenance conditionnelle systématique) :

Pour la maintenance corrective (les tâches arrivant aléatoirement), nous avons deux possibilités pour les insérer, car le nombre de ressource est de deux équipes identiques. Nous désignons par ( $T_{alae}$ ) les tâches aléatoires à insérer dans l'un des ensembles de tâches programmables (List\_Equip1, List\_Equip2). Notre approche de résolution consiste à rechercher une position dans le planning de la première équipe (List\_Equip1) et cela par l'application de la procédure (Algorithme 4. 3 : Construction\_EDD), s'il existe une position

qui ne provoque pas de retard pour la liste (List\_Equip1), alors la tâche est acceptée, sinon la procédure (Algorithme 4.4 : Procédure Minimiser Tâche \_Rejeté) est exécutée pour déterminer la marge libre à accueillir la tâche aléatoire, si la tâche n'est pas acceptée, une dernière tentative d'insertion est de procéder de la même manière avec la liste (List\_Equip2). Finalement s'il n'existe pas de position d'insertion, on fait appel à la sous-traitance.

```

Entrée: List_Equip1, List_Equip2,  $T_{alaet}$ 
/*  $T_{alaet}$  définie par date de disponibilité, durée et date au plus tard */
n1:=card (List_Equip1); n2:=card (List_Equip2);
Etape0: L = List_Equip1  $\cup$  { $T_{alaet}$ };
    Procédure Construction_EDD (Entrée L, Sortie : L, List_TRejet)
    Si List_TRejet =  $\emptyset$  Alors
        List_Equip1:= L;
         $T_{alaet}$  est acceptée; aller à Etape3 ;
    Sinon
        Procédure Recherche-Pos-Inser (Entrée : List_Equip1,  $T_{alaet}$ , Sortie : List_Equip1) ;
    Finsi
Etape1: Si n1 < card (List_Equip1) Alors
    /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe « Equip1 » */; aller à Etape3 ;
    Sinon
        L := List_Equip2  $\cup$  { $T_{alaet}$ }
        Procédure Construction_EDD (Entrée : L, Sortie : L, List_TRejet)
        Si List_TRejet =  $\emptyset$  Alors
            /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe « Equip2 » */
             $T_{alaet}$  est acceptée; List_Equip2:= L ; aller à Etape3 ;
        Sinon
            Procédure Recherche-Pos-Inser (Entrée : List_TVAdmiss,  $T_{alaet}$ , Sortie : List_Equip2);
            aller à Etape2 ;
        Finsi
    Finsi
Etape2: Si n2 < card (List_Equip2) Alors
    /* la tâche aléatoire est affectée à l'équipe « Equip2 » */
     $T_{alaet}$  est acceptée; List_Equip2:= L ; aller à Etape3 ;
    Sinon
         $T_{alaet}$  est rejetée ; Appel à la sous-traitance ; aller à Etape3 ;
    Finsi
Etape3: Fin.

```

**Algorithme 4.9 :** Algorithme principal pour la maintenance corrective conditionnelle  
Systématique

**4.16. Conclusion :**

Notre travail a été réalisé au sein de la société de maintenance de l'Est (SME) pour assurer l'affectation des moyens matériels et humains de chaque activité de maintenance au niveau des cimenteries de l'est, nous nous sommes intéressés à produire une approche pour la minimisation des conflits sur les ressources, afin de minimiser le coût de la maintenance.

L'idée de notre approche consiste à résoudre en premier le problème d'ordonnement statique des tâches connues à l'instant initial, puis à construire un ordonnancement réactif permettant l'insertion des tâches aléatoires dès l'instant d'arrivée.

L'objectif de la méthode choisie est de minimiser le nombre de tâches rejetées. Les résultats obtenus pour les tâches de la maintenance préventives sont acceptables, par contre, pour les tâches de la maintenance conditionnelle, on remarque que le nombre de tâches rejetées est important.

---

***CONCLUSION  
GENERALE***

---

---

## *Conclusion Générale*

---

Dans le contexte de mondialisation actuel, les entreprises doivent être de plus en plus compétitives. Le fonctionnement des moyens de production étant très optimisé, de nos jours, 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 ce sont elles qui réalisent ces interventions. L'affectation et l'ordonnancement des activités 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.

Un environnement international à forte connotation TIC (Technologies de l'Information et de la Communication), permet à l'heure actuelle la mise en place de techniques innovantes de gestion de la maintenance. Cet environnement technologique permet aux entreprises soit d'externaliser la fonction maintenance pour mieux se concentrer sur leur activité principale, soit de passer de la maintenance classique à la maintenance à distance et en temps réel.

Le contexte de notre travail concerne l'ordonnancement des activités de maintenance préventive systématique et maintenance conditionnelle dans les systèmes de production répartis (différentes cimenteries de l'Est).

Après avoir resitué, au premier chapitre, le contexte de travail, à savoir le système d'aide à la décision pour la génération du planning des interventions de la maintenance, pour les unités de production dispersées géographiquement, nous avons proposé une architecture SIAD.

Nous avons abordé dans le deuxième chapitre un ensemble de définitions qui portent sur les concepts de base de la maintenance et les différentes politiques de la maintenance.

Nous avons fait par la suite un état de l'art de quelques méthodes pour la résolution de problèmes de l'ordonnancement des activités de la maintenance. Les algorithmes qui constituent cet état de l'art, ont été choisis pour l'élaboration de notre démarche de résolution.

Il est donc parfois nécessaire de réagir à une panne en exécutant une opération de maintenance corrective le plus tôt possible. Nous proposons dans ce cas d'étendre notre démarche au cas de la maintenance corrective. Cet objectif sera réalisé en considérant des tâches de maintenance corrective qui apparaissent aléatoirement lors de l'ordonnancement des tâches de maintenance systématique. Dans ce cas, il faut élaborer un nouveau critère de maintenance. Ce critère prendra en compte le coût supplémentaire de la maintenance corrective et la disponibilité de la ressource.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au développement d'un outil pour ordonnancer et affecter les tâches de la maintenance aux différentes équipes, d'équilibrer la charge et de minimiser les conflits entre les différentes équipes( équipe sur site et équipe volante pour la maintenance préventive systématique et les deux équipes de la maintenance conditionnelle) .

La démarche de résolution du problème d'ordonnancement proposée au quatrième chapitre, comporte deux phases :

- Résolution du problème statique pour l'ordonnancement prévisionnel des tâches connues à priori au début de l'ordonnancement pour construire une séquence admissible des tâches qui servira de base pour l'ordonnancement en temps réel,
- Résolution du problème dynamique pour l'ordonnancement en temps réel des tâches aléatoire, l'approche proposée permet de définir une position d'insertion dès l'arrivée de la tâche aléatoire, dans le cas où elle est acceptée pour l'exécution par la ressource disponible.

Les résultats obtenus pour les tâches de la maintenance préventives systématiques sont acceptables, par contre, pour les tâches de la maintenance conditionnelle, on remarque que le nombre de tâches rejetées est important.

Dans nos perspectives nous orientons notre recherche vers le développement d'un algorithme qui détermine le chemin minimal, pour l'équipe volante et les équipes de la maintenance conditionnelle systématique, afin de minimiser les coûts de la maintenance.

---

***REFERENCES***  
***BIBLIOGRAPHIQUES***

---

---

## *Références Bibliographiques*

---

- [ABBO, 03] ABBOU R «Contribution à la mise en oeuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance». Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2003.
- [AFNOR] AFNOR, Recueil des normes françaises X 06, X 50, X 60, AFNOR.
- [AKHR, 00] M AKHROUF, « Contribution au développement des S.I.A.D Multicritères » Mémoire de Magister, INI ALGER ,2000.
- [BELL, 05] Y. Bella, M. Mostefai « Modélisation de la maintenance distribuée des systèmes manufacturiers basée sur l'approche Processus-Processeur » », Article, 3<sup>ème</sup> conférence internationale sur la productique, 6 pages, Tlemcen, Alger 2005.
- [BELL, 74] BELLMANN R. et DREYFUS S.E “Applied dynamic programming .Princeton. University Press” 1974.
- [BENB et al, 01] F BENBOUZIDE, F NADER, C VARNIER, N ZERHOUNI « Un SIAD pour l'élaboration du planning de maintenance préventive » Article, 3<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation Simulation, 8 pages, Troyes, France, 2001.
- [BENB, 05] Fatima BENBOUZID SITAYEB « contribution a l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoints production/maintenance – cas du flowshop » Thèse, Université de Franche-Comté France 2005.
- [BOIT et HAZA, 87] Daniel BOITEL, Claude HAZARD « Guide de la maintenance » Editions Nathan, 1987.
- [BONC et al., 81] Bonczek, R., Holsapple, C., and Watson, A. (1981a). Foundations of décision support systems. Academic Press, NY, USA
- [BOUC, 98] François BOUCLY « Le management de la maintenance Evolution et mutation « AFNOR 1998.
- [BOUG et al, 07] F. BOUGCHICHE, M. BAKALEM, M. TADJINE «Proposition d'une approche d'insertion d'une tâche aléatoire dans un environnement a deux ressources identiques parallèles » MOAD Bejaia Algérie ,2007.
- [CHEC, 92] CHECROUN A « Comprendre, concevoir et utiliser les SIAD » Editions Masson, 1992.
- [CHEL et al, 06] Anis CHELBI, Mohamed Radhouane BENNOUR, Noureddine ZERHOUNI « Contribution a la modélisation des approches de coopération en E-maintenance», Article, 6<sup>e</sup> Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc , 2006.
- [DUPU, 05] Matthieu DUPUY « Contributions à l'analyse des systèmes industriels et aux problèmes d'ordonnancement à machines parallèles flexibles : application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique» Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse, France ,2005.
- [DUPU, 05] Matthieu DUPUY « Contributions à l'analyse des systèmes industriels et aux problèmes d'ordonnancement à machines parallèles flexibles : application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique » Thèse, Toulouse 2005.

- [DURO et al, 04] C. DURON, M.A. OULD LOULY et J.-M. PROTH « Ordonnancement d'une ressource unique : insertion d'une Tâche aléatoire sous la contrainte temps réel » 5<sup>e</sup> Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation "Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques" MOSIM'04 du 1er au 3 septembre 2004 – Nantes France
- [ESQU et LOPE, 99] Patrick ESQUIROL et Pierre LOPEZ « L'ordonnancement » Collection Gestion. Edition ECONOMICA Paris 1999.
- [GRAB et al. 99 ] B. Grabot, C. Bérard, P. Nguyen, "An implementation of man-software cooperative scheduling: the IO software", Production Planning and Control, vol.10, n°3, 1999, pp. 238-250.
- [HALA, 09] HALA Sabah « Modélisation et dimensionnement d'une plate forme hétérogène de services » Thèse, Université de Franche-Comté France 2009.
- [HÉDI, 01] HÉDI KAFFEL, « la maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre » Thèse université Laval Québec, Canada, 2001.
- [HENG, 02] Jean HENG, « Pratique de la maintenance Préventive : Mécanique, pneumatique, Hydraulique, Electricité, Froid, Editions DUNOD, 2002.
- [IVAN et al, 03] IVANOV Alexei, VARNIER Christophe, ZERHOUNI Noureddine « Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué » , Article, 4<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, 7 pages Besançon, France, 2003
- [IVAN et al, 03] A. IVANOV, C. VARNIER, N. ZERHOUNI « Ordonnancement dynamique des tâches de maintenance dans un système de télémaintenance », CIP'03, Alger (Algérie), Octobre 2003.
- [KIRK et al, 83] KIRKPATRICK S, GELATT C.D. et VECCHI M.P. (1983). Optimization by mulated annealing, Science
- [KOUÏ et al, 03] A. KOUIDER, S. OURARI, S. BENABBAS, M. MIHOUBI «Approche heuristique pour l'ordonnancement temps réel d'une machine dans un contexte perturbé » USTBH, AL Alia Bab Azzouar, Algérie. 2002
- [LEBA, 03] Marjorie LE BARS « Un Simulateur Multi Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale » Thèse, Paris, 2003
- [LEFR, 98] LEFRANÇOIS P. « Méthode de conception de systèmes, note de cours GSO 62911», Université Laval, Québec, 1998
- [LEPR, 05] Sophie Lépreux, «Approche de développement centré décideur et a l'aide de patron de Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision Application à l'investissement dans le domaine ferroviaire » Thèse, France ,2005.
- [LEPR, 05] [Sophie Lépreux, 2005] « Approche de développement centré décideur et l'aide de patron de Systèmes Interactifs d'Aide \_a la Décision Application \_a l'investissement dans le domaine ferroviaire » Thèse, Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, France ,2005.
- [LETO, 01] Agnès LETOUZEY « Ordonnancement interactif basé sur des indicateurs : Applications à la gestion de commandes incertaines et à l'affectation des opérateurs » Thèse, Toulouse 2001.
- [LEVI et POME, 90] Pierre LEVINE, Jean-Charles POMEROL « Systèmes interactifs d'aide à la décision et systèmes experts » Editions Hermès, Paris, 1990.
- [LOPE et ROUB, 01] Pierre LOPEZ et François ROUBELLAT « Ordonnancement de la production » Edition HERMES, France 2001.
- [LOPE, 03] Pierre LOPEZ « Approche par contraintes des problèmes l'ordonnancement et

- d'affectation : structures Temporelles et mécanismes de propagation » Thèse d'habilitation, Toulouse 2003.
- [MAHI et al, 06] L. Mahiddine, A. Hafed, A. Achour, S. Khouri, B. Boudiba «Plate-forme logicielle de E-maintenance et télédiagnostic», Article, 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, Setif, Alger, 2007.
- [MARM, 07] François MARMIER "contribution à l'ordonnement des activités de maintenance sous contrainte de compétence : une approche dynamique, proactive et multi-critère " Thèse, FRANCHE-COMTÉ, France 2007.
- [MELL et al ,05] Hakima MELLAH, Salima HASSAS, Habiba DRIAS « De coopération à auto-organisation dans un processus de télémaintenance », Article, 3<sup>ème</sup> conférence internationale sur la productique, 8 pages, Tlemcen, Alger 2005.
- [MOKO, 04] MOKOTOFF.E « An exact algorithm for the identical parallel machine scheduling problem » European journal of operational research, 2004.
- [MOOR, 86] J.M.Moore, «A n jobs, one machine sequencing algorithm for minimizing the number of late job». Management science 1968.
- [MORV, 89] Pierre MORVAN « Dictionnaire de l'informatique concepts, matériels, langages. » Editons Larousse 1989.
- [MOUB, 97] Moubray J Reliability Centred Maintenance, International Press, 1997.
- [QUEU et al, 03] Le Quere Y., Sevaux M, Trentesaux D, et Tahon C., « Modèle de coopération d'un processus de ré-ordonnement distribué ». Article , France, 2003.
- [RACO, 06] Daniel RACOCEANU « contribution à la surveillance des systèmes de production en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle ».Thèse d'habilitation Université de France Comité de Besançon, France, 2006.
- [ROY, 00] Roy B. (2000) "Réflexions sur le thème : quête de l'optimum et aide à la décision." Cahier du Lamsade n° 167. Université Paris-Dauphine, 21 Pp.
- [SAIN, 03] David SAINT VOIRIN « Modélisation des approches de coopération en télémaintenance : étude et contribution » Mémoire DEA, Besançon, France, 2003.
- [SIME et al, 06] Z. SIMEU-ABAZI, M. DI MASCOLO, D.M. PHAM «Maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites» Article, 6<sup>e</sup> Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc , 2006.
- [SIMO ,77] SIMON H.A « The new science of management decision,Prentice-Hall Newjersery » ,1977.
- [TALB, 04] El-Djillali TALBI « Sélection et réglage de paramètres pour l'optimisation de logiciels d'ordonnement industriel » Thèse, Toulouse 2004.
- [TRAN ,01] Erwan TRANVOUEZ « IAD et ordonnancement : une approche du ré ordonnancement par système multi -agent » Thèse France (Aix-Marseille) ,2001.
- [TRAN, 01] Erwan TRANVOUEZ « IAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnement par systèmes multi-agents » Thèse, D'AIX-MARSEILLE III 2001.
- [TREN, 96] Damien TRENTESAUX « Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production » Thèse, Grenoble, 1996.

- [VARN et al, 03] F. BENBOUZID, Y. BESSADI, SID ALI .G, C VARNIER, N. ZERHOUNI. « Résolution du problème de l'ordonnancement Conjoint Maintenance/Production par la stratégie séquentielle » 4<sup>ème</sup> Conférence Francophone de Modélisation et de Simulation “Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services” MOSIM'03 – du 23 au 25 avril 2003 – Toulouse (France).
- [VERN, 99] VERNADAT F, «Technique de Modélisation en Entreprise : Application aux Processus Opérationnels», Economica, Paris, 1999.
- [VINC, 03] Giard VINCENT «Gestion de la production et des flux » Edition ECONOMICA, France 2003.
- [WIES et al, 96] WIESLAW kudia and VADIM Timkovsky. « Total completion time minimization in two machines with unit time operations ».European journal of operational research, 1996.
- [ZWIN, 96] ZWINGELSTEIN.Gille, « La maintenance basée sur la fiabilité », guide pratique d'application de la RCM, Edition HERMES, Paris, France, 1996.