

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF  
UFAS (ALGERIE)

## **MEMOIRE**

Présenté à la Faculté des Sciences de l'ingénieur  
Département d'électrotechnique  
Pour l'Obtention du Diplôme de

### **MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE**

Option : **Automatique**

Par

**M<sup>r</sup> : AZLI Hichem**

### **Thème**

## **GESTION DE LA MAINTENANCE DISTRIBUEE DES SYSTEMES DE PRODUCTION**

Soutenu le : .../.../....

devant la commission d'examen:

<b>Président :</b>	<b>Dr Lamamra Athmane</b>	<b>U.F.A.Sétif</b>
<b>Rapporteur :</b>	<b>Prof. Mostefai Mohammed</b>	<b>U.F.A.Sétif</b>
<b>Co-Rapporteur :</b>	<b>Mme Bensamra Yasmina</b>	<b>U.F.A.Sétif</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Dr Khemliche Mabrouk</b>	<b>U.F.A.Sétif</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Dr Benaouda Abdelhafid</b>	<b>U.F.A.Sétif</b>

## ملخص

إن تطبيق مبدأ الصيانة الموزعة يرتكز على بناء مخطط يعتمد على تحليل العمليات و الموارد, هذا المخطط يهدف إلى تسريع عملية صيانة المعدات.

بصفة عامة، فإن المطلوب من مسير المؤسسة المكلف بتسيير الموارد البشرية هو حل الإشكالية الآتية: تخصيص أفضل كفاءة لكل مهمة صيانة في أفضل وقت ممكن، كما أن عملية ترتيب مهام الصيانة تعتمد أساساً على كفاءة و استعداد الموارد البشرية.

البرمجة الديناميكية هي واحدة من طرق تحقيق الأمثلية، وتعتمد على التعداد الضمني للحلول، هذه الطريقة تسمح بحل إشكالات القرارات المتسلسلة، وبصفة عامة، فإنها تتطرق لإشكاليات إيجاد الحل الأمثل باستراتيجية تكمن في تفكيك الإشكالية إلى سلسلة من الإشكاليات، ثم تعيين علاقة تراجعية بين الحلول المتلى.

**الألفاظ المفتاحية :** الصيانة الموزعة, الموارد البشرية, الترتيب, الكفاءة, الإستعداد, البرمجة الديناميكية.

## Abstract

The implementation of the maintenance distributed concept consist of the construction of a plan based on the analysis of the processes and the processors, allowing to accelerate the process of maintenance of the equipment.

In a general way, the manager of the company charged to manage human resources has to solve the following problem: to assign for each task of maintenance best competence at the best time.

The scheduling of the maintenance tasks takes into account the competence and the availability of human resources.

The dynamic programming is a method of optimization proceeding by implicit enumeration of the solutions. This approach makes possible to solve effectively sequential problems of decision. More generally, it consists in tackling problems of optimization by breaking up the problem into a sequence of problems, then to establish a relation of recurrence between the optimal solutions.

Key-words : Distributed maintenance, human resources, scheduling, competence, availability, dynamic programming.

## Résumé

La mise en œuvre du concept de la maintenance distribuée consiste en la construction d'un plan basé sur l'analyse des processus et des processeurs, permettant d'accélérer le processus de maintenance des équipements.

De manière générale, Le manager de l'entreprise chargé de gérer la ressource humaine a à résoudre la problématique suivante: assigner pour chaque tâche de maintenance la meilleure compétence au meilleur moment.

L'ordonnement des tâches de maintenance tient compte de la compétence et de la disponibilité des ressources humaines.

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation procédant par énumération implicite des solutions. Cette approche permet de résoudre efficacement des problèmes de décisions séquentiels. Plus généralement, elle consiste à aborder des problèmes d'optimisation avec une stratégie qui consiste à décomposer le problème en une séquence de problèmes, ensuite établir une relation de récurrence entre les solutions optimales.

Mots-clés : Maintenance distribuée, ressources humaines, ordonnancement, compétence, disponibilité, programmation dynamique.

## Avant-propos ...

Le présent travail a été effectué au laboratoire d'Automatique (LAS) du département d'électrotechnique au sein de l'Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS).

Tout d'abord, je tiens à remercier les personnes qui ont accepté de faire partie de mon jury de mémoire.

- ❖ **Mr. M. MOSTEFAL**, Professeur au département d'électrotechnique de l'université de Sétif, pour avoir accepté le rôle de rapporteur et pour la longue conversation au LAS m'apportant de précieux conseils. Qu'il trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de mes sincères remerciements.
- ❖ **Mr. A. LAMAMRA**, Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.
- ❖ **Mr. M. KHEMLICHE**, Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Sétif, en acceptant de faire partie du jury d'examen pour la soutenance de ce travail.
- ❖ **Mr. A. BENAOUA**, Maître de conférences au département d'informatique de l'université de Sétif, pour avoir accepté de participer au jury, et pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail.
- ❖ Je souhaite également remercier **Mme. Y. BENSAMRA**, chargée de cours au département d'électrotechnique de l'université de Sétif pour avoir suivi et encadré ce travail avec la plus grande attention.

J'adresse mes sincères remerciements à tous mes amis qui m'ont aidé, de près ou de loin, pour l'élaboration de ce travail.

# Sommaire

---

<b>Introduction générale</b> .....	3
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>Maintenance, méthodes et organisation</b> .....	5
I.1 Introduction .....	5
I.2 Les concepts de la maintenance.....	5
I.2.1 Définitions.....	5
I.2.2 Les différentes formes de la maintenance .....	6
I.2.3 Fonctions et tâches associées à la maintenance.....	8
I.3 Notions de maintenabilité et de fiabilité.....	10
I.3.1 Maintenabilité.....	10
I.3.2 Fiabilité.....	11
I.4 Politiques de maintenance préventive .....	15
I.5 Le système de gestion de la maintenance.....	16
I.5.1 Définition.....	16
I.5.2 Les modes de gestion.....	19
I.5.2.1 Faire (internaliser) .....	19
I.5.2.2 Faire faire.....	19
I.5.1.3 Faire ensemble.....	19
I.5.3 Conditions de réussite d'un programme de gestion de la maintenance	20
I.6 Coût de la maintenance.....	20
I.7 Conclusion.....	22
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>Concept de la maintenance distribuée</b> .....	24
II.1 Introduction .....	24
II.2 Concept de la maintenance distribuée.....	24
II.2.1 La maintenance en réseau.....	24
II.2.2 L'évaluation d'un système de maintenance.....	26
II.3 Mise en œuvre du concept de la maintenance distribuée.....	27
II.3.1 L'analyse des processus.....	28
II.3.2 Génération de scénarii techniquement réalisables.....	30
II.3.3 Le filtre stratégique.....	31

II.3.3.1 Evaluation des partenaires externes.....	31
II.3.3.2 Synthèse.....	34
II.3.4 Le filtre économique.....	34
II.4 Conclusion .....	35

### **CHAPITRE III**

#### **Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application.....**

III.1 Introduction.....	37
III.2 Gestion des ressources humaines.....	37
III.2.1 Ordonnancement des ressources humaines.....	37
III.2.2 Compétence des ressources humaines.....	38
III.3 Formulation du problème.....	39
III.3.1 Modélisation du problème.....	40
III.3.2 Méthodes de résolution.....	42
III.3.2.1 Introduction.....	42
III.3.2.2 Algorithme de programmation dynamique.....	43
III.4. Application.....	45
III.4.1 Cahier des charges.....	46
III.4.2 Résolution du problème.....	46
III.5 Application numérique.....	48
III.5.1 Première configuration.....	49
III.5.2 Deuxième configuration.....	53
III.5.3 Troisième configuration.....	56
III.6 Résultats.....	57
III.7 Analyse de l'algorithme.....	58
III.8 Conclusion.....	59

#### **Conclusion générale.....**

62

## *Introduction générale*

Dans le nouveau contexte industriel, les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production. Alors que la maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme un centre de coûts, nous sommes de plus en plus conscients qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise.

Cependant, Maintenir l'appareil de production n'est pas une tâche facile, cela nécessite des ressources humaines compétentes, des outils et des matériels adaptés aux équipements et aux installations à entretenir, un système de gestion de pièces de rechange adéquat, ainsi qu'un système d'information bien pensé pour assurer un échange efficace entre les différents intervenants. D'où l'émergence du concept de la maintenance distribuée, ce concept basé sur l'analyse des activités et des ressources selon une approche réseau permet de remédier aux problèmes se résumant généralement en la pénurie des ressources humaines et matériels nécessaires à l'exécution des tâches de maintenance.

L'objectif de notre travail est de permettre au gestionnaire de l'entreprise de résoudre la problématique inscrite dans le cadre de la minimisation du coût global de maintenance, nous étudions le problème d'existence d'affectation du personnel pour la réalisation d'un plan de production permettant d'accélérer le processus de maintenance des équipements.

Nous avons à réaliser un système de maintenance capable d'affecter aux tâches de maintenance les meilleures compétences aux meilleurs moments.

La méthode de la programmation dynamique a été adoptée pour résoudre la problématique décrite ci-dessus, celle-ci est bien adaptée pour les problèmes de décision séquentiels. Plus généralement, elle consiste à aborder des problèmes d'optimisation avec une stratégie qui consiste à décomposer le problème en une séquence de problèmes, ensuite établir une relation de récurrence entre les solutions optimales.

Le mémoire est structuré selon le plan suivant:

- Chapitre 1 : La maintenance: méthodes et organisation: Nous allons définir au cours de ce chapitre les notions de maintenance, maintenabilité, et de fiabilité, ensuite, nous allons présenter le système de gestion de la maintenance avec ses différents aspects préventifs et correctifs.
- Chapitre 2 : Concept de la maintenance distribuée: nous allons présenter au cours de ce chapitre le concept de la maintenance distribuée tout en définissant les étapes nécessaires à son implantation.
- Chapitre 3 : Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application: nous allons étudier le problème d'affectation de la ressource humaine, ensuite, nous allons présenter l'algorithme de résolution basé sur la méthode de la programmation dynamique, et le valider sur un réseau de maintenance constitué d'un centre expert, trois sites de production, deux équipes et six tâches de maintenance.
- Une conclusion et des perspectives sont émises à la fin de cette recherche.

# CHAPITRE I

## Maintenance, méthodes et organisation

### I.1 Introduction

Les entreprises sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production. Alors que la maintenance, jusqu'à très récemment, était considérée comme un centre de coûts, nous sommes de plus en plus conscients qu'elle peut contribuer d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise.

Dans ce chapitre, nous allons rappeler certains concepts de maintenance et de maintenabilité, définir les types d'action de la fonction maintenance, et les conditions de réussite d'un système de gestion de la maintenance.

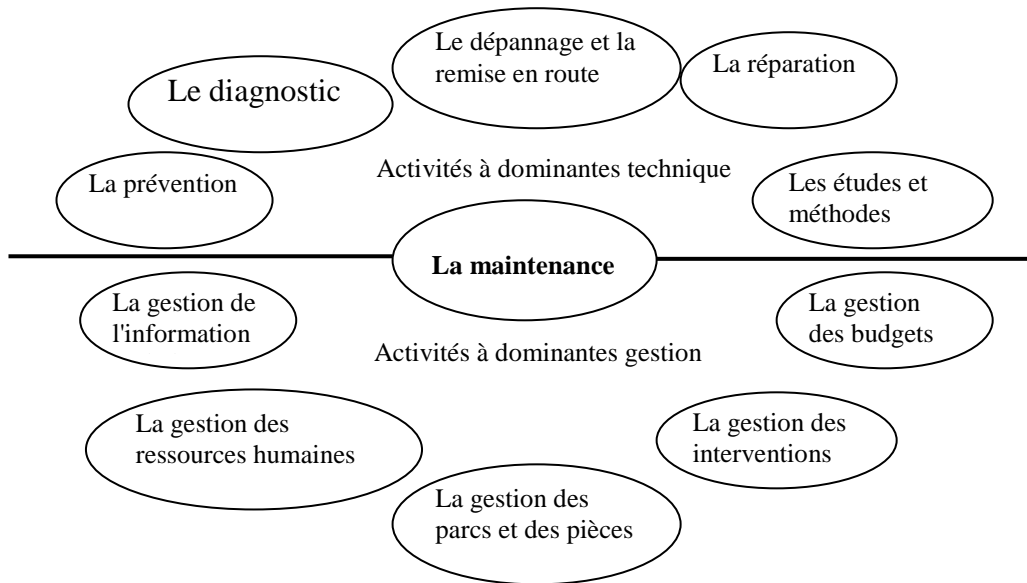
### I.2 Les concepts de la maintenance

#### I.2.1 Définitions

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance comme étant l'ensemble des activités destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités technique, administratives et de management.

Retour et *al.* [35] présentent la fonction maintenance comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion (voir figure 1.1).



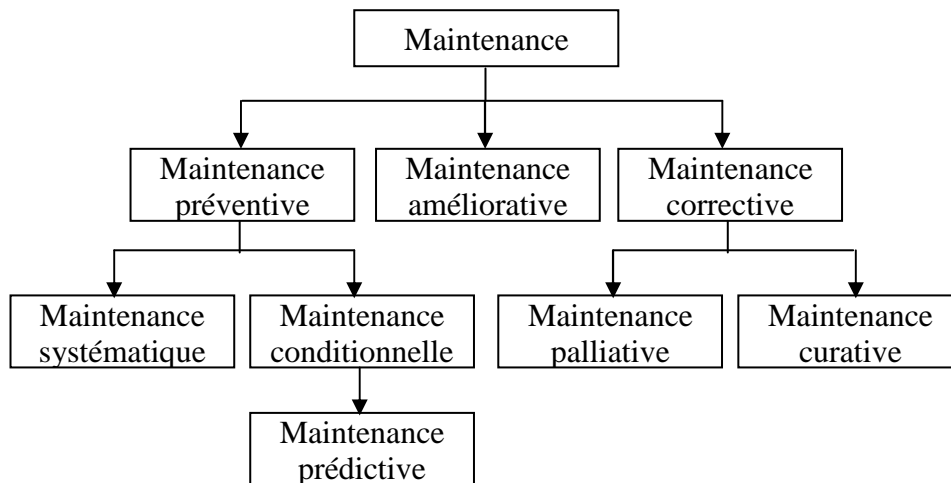


**Figure I.1. Le contenu de la fonction maintenance [33]**

### **I.2.2 Les différentes formes de la maintenance**

On distingue généralement trois types d'actions (figure I.2):

- l'entretien de routine (maintenance améliorative), tel que le graissage ou les réglages simples souvent confiés à l'utilisateur.
- la maintenance corrective ou non programmée, qui a pour but de réparer une panne déclarée.
- la maintenance préventive ou programmée, qui a pour but de prévenir des pannes prévisibles par des remplacements de pièces non encore défectueuses ou des révisions périodiques.



**Figure I.2. Les différents types de maintenance**

- **La maintenance corrective:** elle est définie comme une maintenance effectuée après défaillance (AFNOR X 60-010 [2]). Elle est caractérisée par son caractère aléatoire et requiert des ressources humaines compétentes et des ressources matérielles (pièces de rechange et outillage) disponibles sur place. La maintenance corrective débouche sur deux types d'intervention. Le premier type est à caractère provisoire, ce qui caractérise la maintenance palliative. Le deuxième type est à caractère définitif, ce qui caractérise la maintenance curative.
- **La maintenance préventive:** elle est définie quant à elle comme une maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).
- **La maintenance préventive systématique:** est une maintenance effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage (AFNOR [2]). 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.

- **La maintenance préventive conditionnelle:** est une maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (AFNOR [2]). 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.
- **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.

### **I.2.3 Fonctions et tâches associées à la maintenance**

a- La première fonction consiste à optimiser toutes les tâches en fonction des critères retenus dans le cadre de la formulation de la politique de maintenance.

Cette partie regroupe quatre tâches principales :

- L'étude technique : elle consiste à :
  - rechercher des améliorations dans le système de production.
  - participer à l'analyse des accidents de travail pour essayer d'y remédier.
  - participer à la conception des travaux neufs.
- La préparation et l'ordonnancement (c'est la fonction qui nous intéresse particulièrement), elle consiste à :
  - établir les fiches d'instructions nécessaires pour effectuer les interventions.
  - constituer la documentation pour tous les genres d'intervention ;
  - établir les plannings des interventions préventives et d'approvisionnement.
  - recevoir et classer les documents relatifs à l'intervention.
- L'étude économique et financière : cette tâche comporte plusieurs étapes :
  - gérer les approvisionnements pour optimiser la gestion des matières premières.
  - analyser les coûts de maintenance, de défaillance et de fonctionnement,
  - participer à la rédaction des cahiers de charges pour tenir compte de la maintenabilité et de la fiabilité des systèmes à commander.

-gérer le suivi et la réalisation des travaux pour ainsi mettre à jour la partie historique du dossier technique.

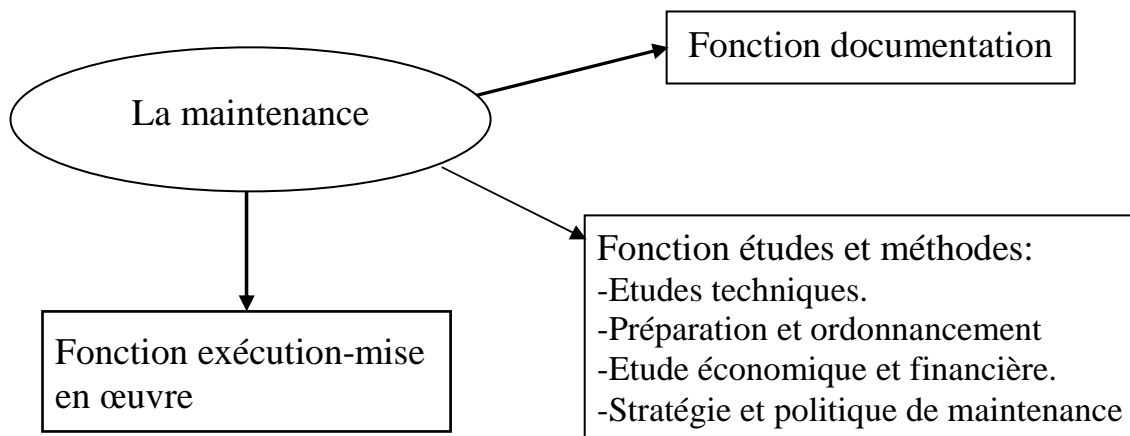
b- La fonction exécution et mise en œuvre, ses principales tâches :

- installer les machines et le matériel.
- informer le personnel sur la façon d'utiliser les équipements.
- appliquer les consignes d'hygiène, de sécurité et des conditions de travail.
- gérer l'ordonnancement et l'intervention de la maintenance et établir le diagnostic de défaillance du matériel.
- coordonner les interventions de la maintenance et remettre en marche le matériel après intervention.
- gérer les ressources matérielles.

c- La fonction documentation, est ses principales tâches :

- établir et mettre à jour l'inventaire du matériel et des installations.
- constituer et compléter les dossiers techniques, historiques et économiques.
- constituer et compléter une documentation générale.

Ce système de maintenance permet de préciser, de limiter et de dégager les responsabilités et les attentes envers ce système. Cependant, ceci constitue une condition nécessaire mais non suffisante pour réussir l'implantation d'un système de maintenance.



**Figure I.3. Les fonctions et les tâches associées à la maintenance**

## **I.3 Notions de maintenabilité et de fiabilité**

Avant de parler des politiques de maintenance, il est utile de développer un peu le concept de maintenabilité et de fiabilité.

### **I.3.1 Maintenabilité**

Si la maintenance est une action réalisée par les techniciens de maintenance sur le système pour le remettre en état. La maintenabilité représente une caractéristique du système, celle-ci précise la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge [6]

La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage.

Cela veut dire qu'on ne comptera pas les temps morts non imputables à la conception du système, tels que les délais de réponse des dépanneurs, et les durées d'attente des pièces de rechange ou les temps passés à la rédaction des pièces administratives, car ces temps dépendent de l'organisation et de l'efficacité du service de maintenance et non de la conception du système [6], [33].

Pour rendre le dépannage plus facile et plus rapide, on devra prévoir, dès la conception, les moyens pour faciliter :

- Le diagnostic des pannes existantes et de celles risquant de survenir rapidement (défaillances par dégradation) ;
- l'accès aux pièces à remplacer, leur démontage et leur remplacement ;
- le contrôle de la validité de l'action de maintenance.

La durée de maintenance active est très variable en fonction de la panne, de l'aptitude du dépanneur et des moyens d'aide dont il dispose. Ceux-là sont des variables aléatoires caractérisées par une densité de probabilité et une fonction de répartition appelée fonction maintenabilité.

Il en résulte que la maintenabilité peut être mesurée par une probabilité, d'où la maintenabilité est une caractéristique d'un système mesurée par la probabilité d'être remis, par une action de maintenance, dans des conditions opérationnelles définies, dans une durée fixée; les ressources et les conditions d'environnement étant préalablement spécifiées.

### I.3.2 Fiabilité

La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité que ce dispositif accomplisse une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée [37].

Nous désignons par  $R(t)$  la fiabilité (qui est une grandeur comprise entre 0 et 1), où  $t$  désigne la durée de la mission.

$$R(t) = P \quad \{ \text{durée de vie du système} > t \} \quad \mathbf{1.1}$$

Rappelons que la durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu.

Le fait que la défaillance d'un système puisse survenir à n'importe quel moment nous amène à considérer cette grandeur comme une variable aléatoire à laquelle nous pouvons associer une fonction de densité  $f(t)$ . Il importe de rappeler que  $f(t).dt$  est la probabilité que la durée de vie d'un système soit comprise entre  $t$  et  $t + dt$ , ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre  $t$  et  $t + dt$ .

$$f(t).dt = P \quad \{ t < \text{durée de vie du système} < t + dt \} \quad \mathbf{1.2}$$

Ce qui implique :

$$\int_0^{+\infty} f(t)dt = \mathbf{1} \quad \mathbf{1.3}$$

Nous convenons dans ce qui suit qu'un système est considéré défaillant ou hors d'usage s'il n'est pas en mesure de réaliser la fonction pour laquelle il a été conçu.

Nous désignons par  $F(t)$ , la fonction de répartition ou la fonction de distribution associée aux durées de vie.  $F(t)$  peut s'interpréter comme la probabilité que la durée de vie du composant soit supérieure ou égale à  $t$ .

$$F(t) = P \quad \{ \text{durée de vie du système} \leq t \} \quad \mathbf{1.4}$$

On suppose qu'en tout temps, le système est soit «en opération» ou «hors d'usage», donc :

$$\forall t > 0 \quad R(t) + F(t) = 0 \quad 1.5$$

De par la définition de la fonction densité  $f(t)$  et en se basant sur les concepts de base de probabilité, nous avons :

$$R(t) = \int_t^{+\infty} f(x) dx \quad 1.6$$

$$\text{D'où} \quad F(t) = \int_0^t f(x) dx$$

De même

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad 1.7$$

$$\text{et} \quad f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad 1.8$$

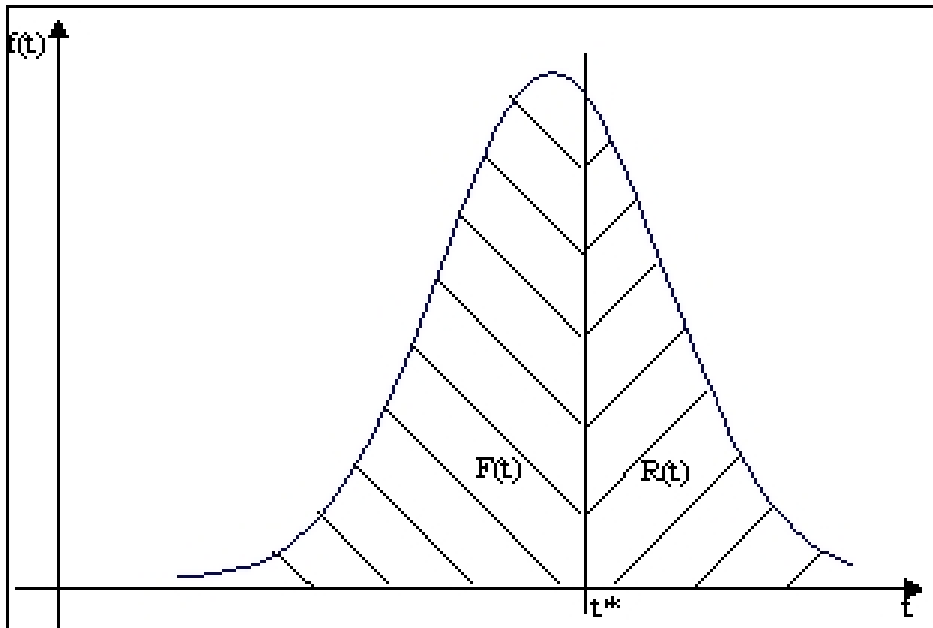


Figure I.4. La fonction densité de durée de vie

La défaillance d'un équipement peut être caractérisée par un taux appelé taux de panne. Ce taux est aussi appelé taux de défaillance, taux de hasard ou taux de mortalité. Il est défini comme étant la probabilité conditionnelle qu'un équipement tombe en panne entre l'instant  $t$  et  $t + \Delta t$  sachant qu'il a survécu jusqu'à l'instant  $t$ .

Il peut aussi être défini comme la proportion de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t$  (équation 1.7). Il représente également la vitesse d'arrivée de la panne.

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} \quad 1.9$$

Avec:

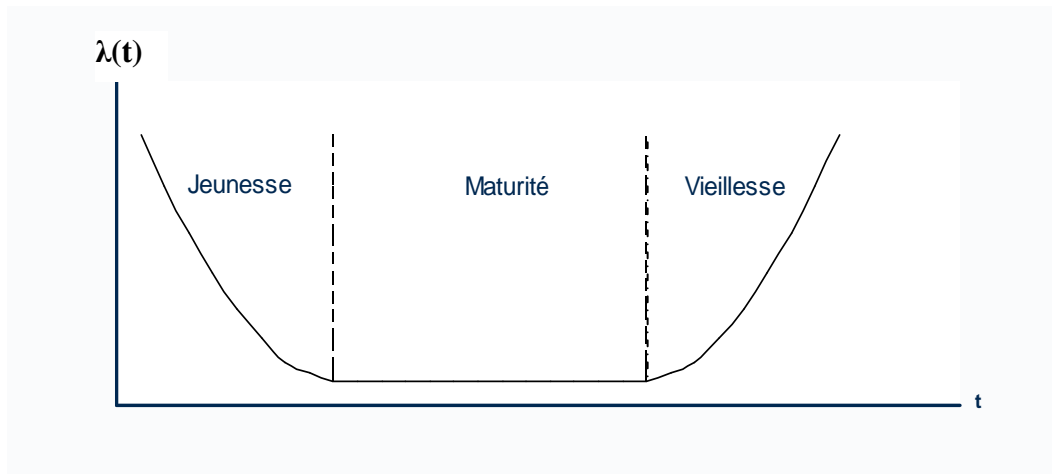
$\lambda(t)$  : Taux de panne en fonction du temps.

$N(t)$  : Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t$ .

$N(t + \Delta t)$  : Nombre de composants ayant survécu jusqu'à l'instant  $t + \Delta t$ .

Si nous représentons le taux de panne en fonction du temps, nous obtenons une courbe appelée « courbe en baignoire » qui est divisée en 3 parties :





**Figure I.5. Courbe en baignoire [33]**

La première est appelée période de mortalité infantile où le taux de panne est en décroissance ce qui correspond aussi à la période de rodage; la deuxième partie n'est autre que la durée de vie utile : c'est la zone où le taux de panne est constant; la dernière partie est appelée le vieillissement ou l'usure: en atteignant cet âge, le composant commence à vieillir et le taux de panne augmente en fonction du temps.

La vie utile d'un composant comporte des cycles de fonctionnement.

Au cours d'un cycle, l'état du composant passe de l'état «en fonction» à l'état «hors d'usage» (figure 1.6).

Si nous analysons ce cycle, nous remarquons qu'il est composé de la moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF).

Cette moyenne est définie comme la durée moyenne de bon fonctionnement du composant (figure 1.6). L'expression du MTBF est donnée par l'équation 1.10.

La moyenne de temps de bon fonctionnement comporte la MUT (Mean Up Time) qui est la moyenne de temps de fonctionnement et la MDT (Mean Down Time) qui est la moyenne de temps de panne.

Cette dernière est composée de la moyenne de temps technique de réparation (MTTR) qui est la durée moyenne de réparation du composant sur un horizon de temps  $T$  (figure 1.6) et une fraction de temps nécessaire à la détection de la panne et à la remise en route du composant.

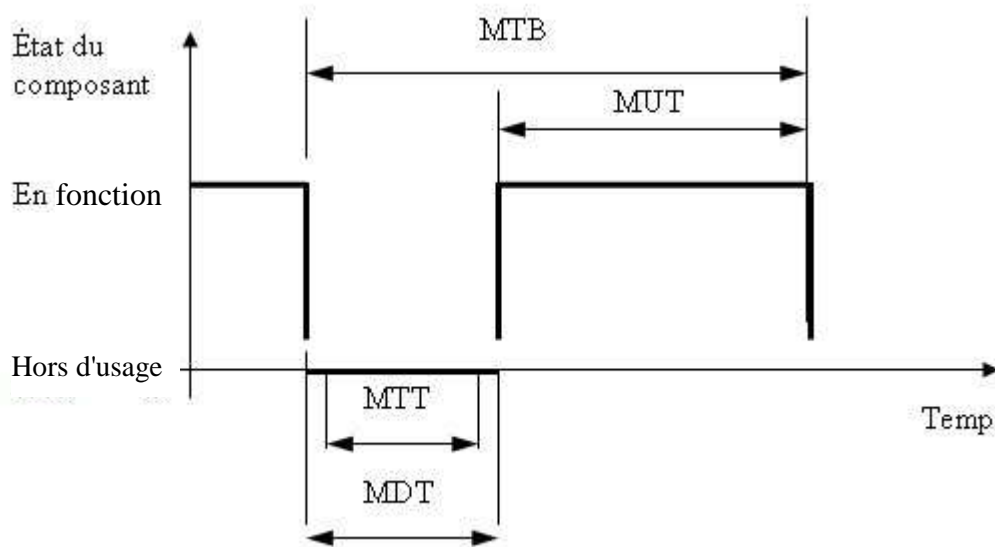


Figure I.6: la présentation des différentes grandeurs en fonction du temps [33]

La durée moyenne entre deux défaillances (MTBF) correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire  $T$ . Son expression est donnée par l'équation 1.10.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad 1.10$$

Il résulte de ces définitions une grandeur qui caractérise un appareil au même titre que la fiabilité : la disponibilité. Elle est définie comme la probabilité de bon fonctionnement d'un dispositif à l'instant  $t$ . Augmenter la disponibilité d'un matériel consiste à diminuer le nombre de ses arrêts et à réduire le temps nécessaire pour résoudre les causes de ceux-ci. Ainsi, la disponibilité, notée  $D$ , est donnée par l'équation 1.11 [37].

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad 1.11$$

#### I.4 Politiques de maintenance préventive

La maintenance préventive permet de remplacer des pièces qui se dégradent par suite d'usure, de fatigue, etc., avant qu'elles ne provoquent une défaillance. Ces pièces présentent un taux de défaillance croissant avec l'âge.

La détermination de la durée entre remplacements nécessite la connaissance de la distribution des durées de vie.

On a le choix entre plusieurs politiques de maintenance préventive. Les plus fréquentes sont les suivantes:

- Dans la maintenance préventive systématique, on fixe les règles strictes pour déterminer les dates de maintenance.

Suivant l'importance d'un équipement dans un système, celle-ci peut s'effectuer :

- pour un âge fixé de l'équipement ; il faut alors disposer d'un moyen pour connaître l'âge de l'équipement durant la vie du système ;
- pour un âge fixé du système ; c'est le cas des révisions des automobiles préconisées par les constructeurs ;
- à des dates fixes. Les deux premières sont plus efficaces, mais difficiles à gérer, la troisième se gère bien, mais elle est plus coûteuse en temps et en pièces de rechange.

- La maintenance préventive conditionnelle consiste à vérifier périodiquement l'état des pièces qui se dégradent et à n'intervenir que si l'état de dégradation est suffisamment avancé pour compromettre la fiabilité du système. Elle nécessite des moyens de mesure ou de test permettant d'apprécier l'état de dégradation.

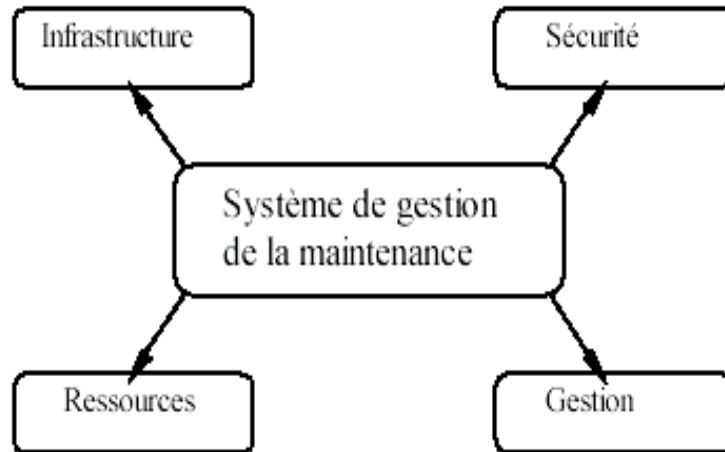
L'évolution des capteurs de mesure (par exemple, les capteurs de vibrations) et des dispositifs d'analyse automatique (par exemple, l'analyse des huiles de graissage) associés aux télémesures et aux ordinateurs rendent cette politique plus accessible. Elle est très efficace, mais la gestion des ressources de maintenance est plus difficile et nécessite souvent le recours à l'ordinateur.

Dans la pratique, on est amené, pour réduire les coûts de maintenance et assurer la disponibilité des systèmes, à combiner ces différentes politiques dans le plan de maintenance

## **I.5 Le système de gestion de la maintenance**

### **I.5.1 Définition**

Un système de gestion de la maintenance implanté adéquatement a un impact à différents niveaux : l'infrastructure, les ressources (humaines et matérielles), la gestion (pièces de rechange, inventaire, etc.) et la sécurité.



**Figure I.7. L'impact du système de gestion de la maintenance**

Le système de gestion de la maintenance comporte quatre étapes importantes les unes que les autres [22].

- 1- La première étape concerne la réception du matériel et documentation.
- 2- La deuxième est relative au choix du type de maintenance à effectuer en fonction des paramètres choisis.
- 3- A partir du type de maintenance, nous précisons les étapes du processus de maintenance telles que la planification des interventions qui constituent la troisième étape,
- 4- La dernière étape se présente par la réalisation et le suivi de l'opération de maintenance.

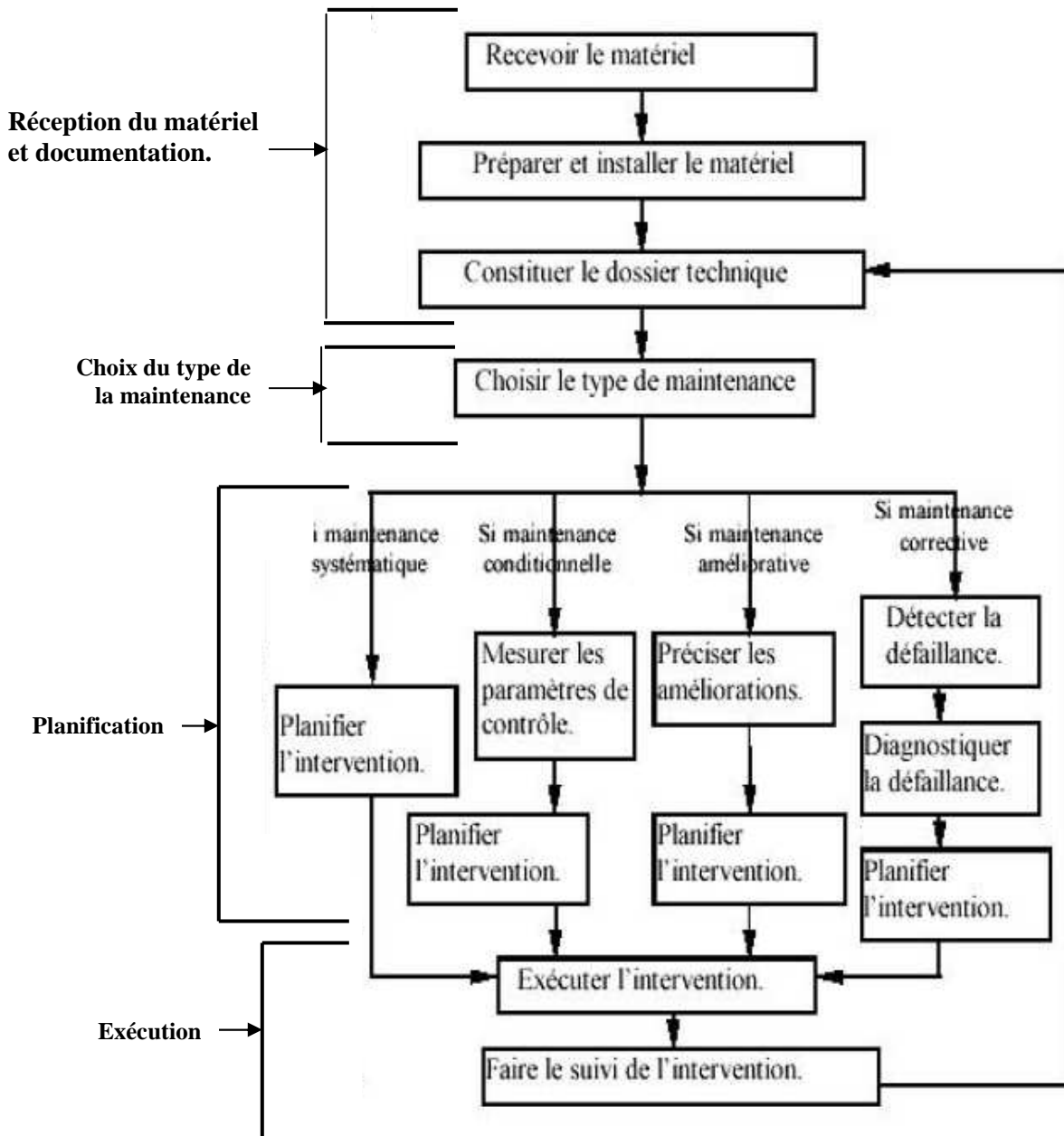


Figure I.8. Le système de gestion de la maintenance

## **I.5.2 Les modes de gestion**

Les exigences d'implantation d'un système de maintenance concernent la disponibilité des ressources humaines et matérielles et d'un système d'information assorti d'outils d'analyse et d'aide à la décision.

L'entreprise peut décider pour chaque processus de maintenance de le réaliser en totalité ou en partie par des processeurs internes ou externes, le choix est dicté par les décisions stratégiques de faire, faire faire ou faire ensemble.

### **I.5.2.1 Faire (internaliser)**

Ce choix de gestion implique que toutes les activités de maintenance (processus) soient assurées par les ressources internes de l'entreprise, donc cette décision nécessite une disponibilité des ressources humaines et matérielles et un système d'information bien rodé.

### **I.5.2.2 Faire faire**

Dans le cas de ce mode de gestion, la réalisation d'une partie ou la totalité des processus de maintenance est confié a des intervenants externes, les entreprises ayant adopté cette option se sont fondamentalement basées sue des considérations économiques et technologiques, les activités de chaque processus concerné sont sous-traités ou imparties.

- La sous-traitance :

Elle est définie comme l'opération par laquelle une entreprise confie à une autre le soin d'exécuter pour elle et selon un cahier des charges préétabli, une partie des actes de production ou un service dont elle conservera la responsabilité économique totale.

- L'impartition:

C'est la deuxième alternative de la décision stratégique du faire faire, associée par son étymologie aux notions de partage, de délégation et de confiance envers le partenaire, elle désigne un choix économique et une stratégie d'affaire. On dit qu'il y a impartition lorsqu'une entreprise, placée devant l'option de faire et faire faire choisit la seconde alternative.

### **I.5.2.3 Faire ensemble**

La troisième option est le faire ensemble ; elle consiste à s'allier stratégiquement avec d'autres partenaires pour réaliser partiellement ou totalement les processus, les résultats de ces alliances sont excellents. Le concept réseau qui en résulte est de plus en plus répandu, les membres du réseau bénéficient d'un pouvoir de négociation plus grand, d'une expertise de réduction de risque, de flexibilité et de concentration sur les activités qu'ils maîtrisent le plus.

### **I.5.3 Conditions de réussite d'un programme de gestion de la maintenance**

La préparation du terrain et l'implantation du personnel constituent deux conditions nécessaires pour la réussite d'un système de gestion de la maintenance, Il faudra également ajouter d'autres conditions pour la réussite de l'implantation :

- se définir un objectif fixe.
- favoriser une direction et un personnel motivés pour l'instauration de la maintenance.
- se prévaloir de procédures rigoureuses de collecte, de traitement et d'archivage de données.
- assurer la communication entre les différents membres de l'équipe.
- se doter de procédures de suivi, d'évaluation de la performance et d'affichage des indicateurs de performance.

### **I.6 Coût de la maintenance**

Ils existent dans la littérature plusieurs types de modèles de calcul du coût de la maintenance, on va se contenter dans notre étude du modèle basé sur la fiabilité et la disponibilité des systèmes [33].

À partir de cette définition, plusieurs paramètres de fonctionnement comme la fonction densité de probabilité, la fiabilité et la moyenne de temps de fonctionnement pourront être déterminées. Nous avons choisi de présenter un modèle qui permet de calculer le coût de maintenance en se basant sur la durée de vie résiduelle.

Les auteurs présentent trois hypothèses. La première stipule que l'intervention préventive n'altère pas l'état de fonctionnement du système sur lequel l'intervention a lieu. La deuxième précise que lorsqu'un composant subit une intervention, son état après celle-ci devient aussi bon qu'un nouveau composant. La dernière stipule que les différents composants d'un système sont économiquement indépendants.

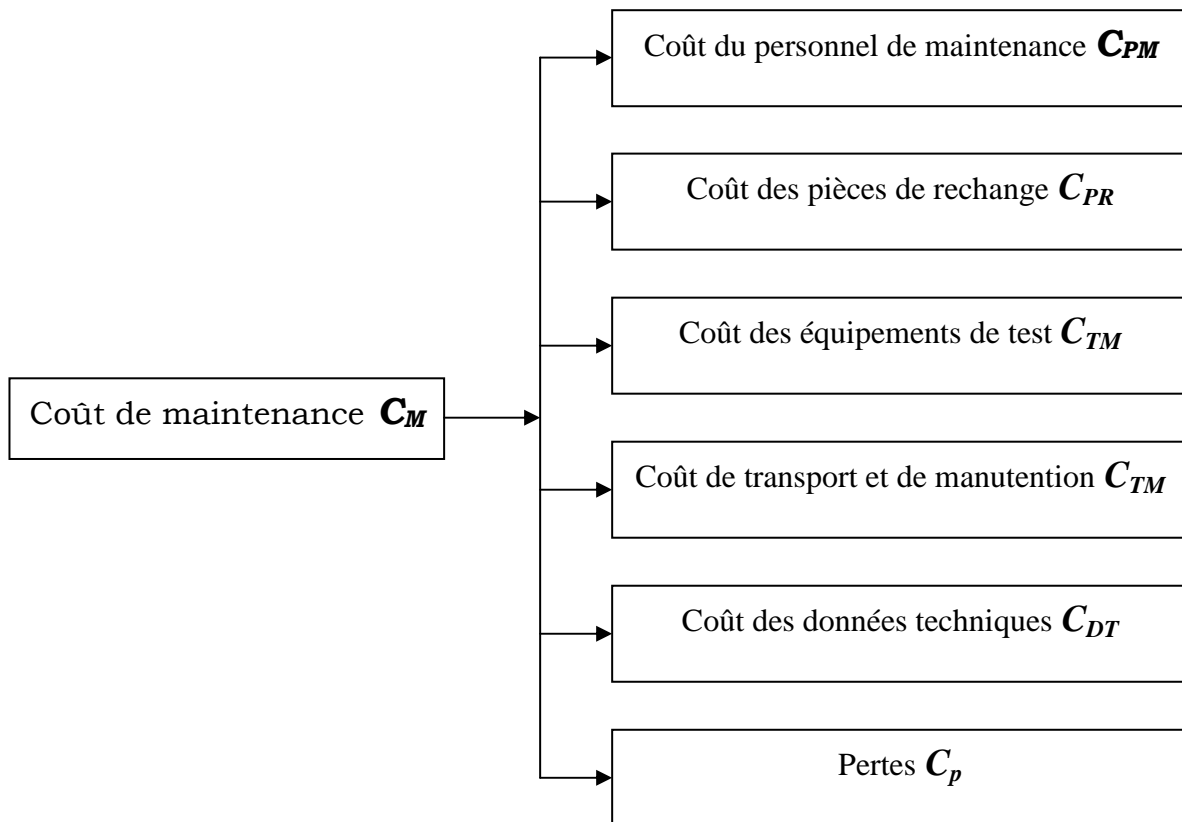
La fonction coût de maintenance détaillée dans l'équation 1.12 comprend tous les aspects intervenant dans le calcul du coût de maintenance comme les pièces de rechange, les coûts du personnel, les équipements de réparation et de test des composants.

$$C_M = C_{PM} + C_{PR} + C_{ET} + C_{TM} + C_{DT} + C_P \quad 1.12$$

Avec

$C_M$  Le coût de maintenance.

- $C_{PM}$  Le coût du personnel de maintenance.  
 $C_{PR}$  Le coût des pièces de rechange.  
 $C_{ET}$  Le coût des équipements de test et de maintenance.  
 $C_{TM}$  Le coût de transport et de manutention  
 $C_{DT}$  Le coût des données techniques.  
 $C_P$  Le coût des pertes d'énergie et de matière suite à une intervention de type préventif ou correctif.



**Figure I.9. La structure de la fonction coût de la maintenance**



## **I.7 Conclusion**

L'étude de la fonction maintenance contribue d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise ; puisque celle-ci est considérée comme un centre de coût induit par les défaillances accidentelles des systèmes de production.

Nous avons défini au cours de ce chapitre les notions de maintenance, maintenabilité, et de fiabilité, puis nous avons présenté le système de gestion de la maintenance avec ses différents aspects préventifs et correctifs, au prochain chapitre nous allons présenter le concept de la maintenance distribuée.

## **CHAPITRE II**

# **Concept de la maintenance distribuée**

### **II.1 Introduction**

Les problèmes relatifs à l'implantation d'un système de maintenance dans une entreprise se résument généralement à l'insuffisance de ressources humaines compétentes, la carence de ressources matérielles nécessaires et la déficience d'un système d'information capable de nous indiquer qui fait quoi, quand et comment.

D'où l'émergence du concept de la maintenance distribuée, ce concept est basé sur l'analyse des processus, sur l'approche réseau et sur l'évaluation des options stratégiques.

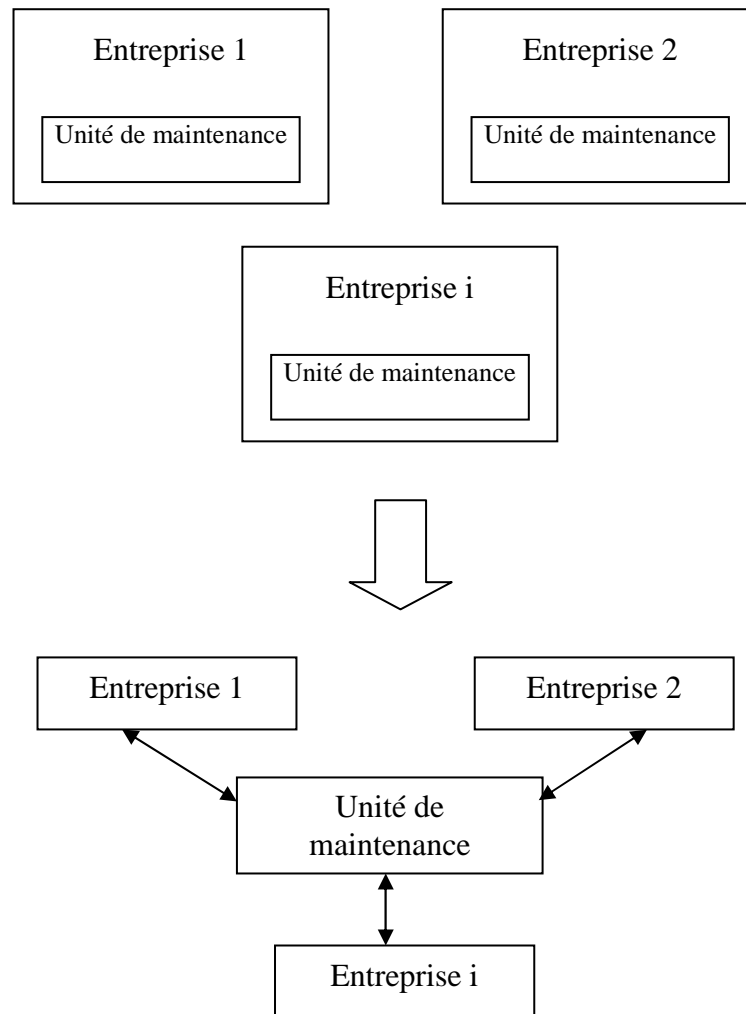
### **II.2 Concept de la maintenance distribuée [22]**

#### **II.2.1 La maintenance en réseau**

La maintenance distribuée est définie comme étant une approche de mise en œuvre de la maintenance basée sur l'analyse des activités et des ressources selon une approche réseau.

En effet, l'entreprise peut faire partie d'un réseau d'entreprise qui se partage une unité de maintenance.

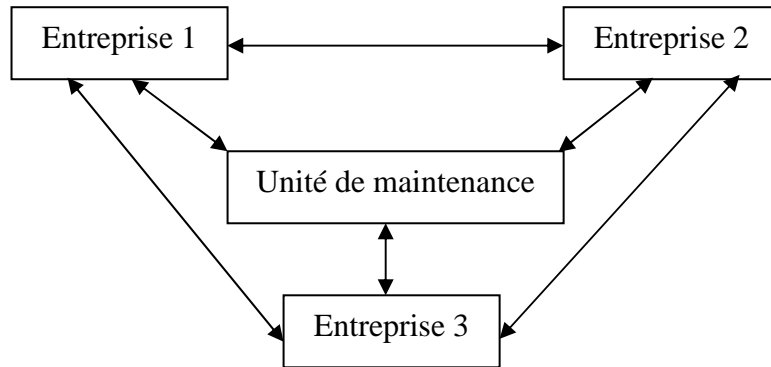
Une fois cette unité de maintenance leader est installée, et que les liens entre l'unité de maintenance et les entreprise commencent à prendre forme, d'autres liens entre les différents membres du réseau seront établis.



**Figure II.1. Création d'une unité de maintenance à partir des unités de maintenance des entreprises manufacturières**

Ceci crée une interaction entre les membres du réseau et ce dernier n'aura plus de leader. Nous parlons dans ce cas de réseau dynamique de maintenance.

L'intensité de la relation entre l'unité de maintenance et l'entreprise peut varier de l'intégration à la co-entreprise.



**Figure 2.2. La migration de l'unité de maintenance dans le 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. Les couples processus-processeur sont sélectionnés selon une analyse technique, stratégique et économique.

## **II.2.2 L'évaluation d'un système de maintenance**

Avant d'établir un programme efficace de gestion de la maintenance, il faut connaître l'état actuel du système de production, et les ressources disponibles, et la façon avec laquelle les pièces de rechanges sont gérées, les processus de maintenance déjà implantés...

Pour y parvenir deux étapes sont nécessaires :

1-Il faut prendre connaissance de l'unité de production concernée. Il est important de connaître : les caractéristiques de fonctionnement, l'horaire de travail, la configuration de l'unité à maintenir et l'historique des interventions effectuées sur les équipements.

2-Dans un deuxième temps, nous prenons connaissance de la politique de production de l'entreprise ainsi que de la structure organisationnelle de la fonction maintenance. Il est question de l'organigramme de la fonction maintenance et des ressources humaines qui sont affectées. Pour chaque ressource humaine, il faut connaître les champs d'expertise et d'action et l'expérience dans les interventions de maintenance.

Afin d'évaluer le système déjà existant et les besoins en maintenance de l'entreprise, un questionnaire inspiré des travaux de Lavina [25] permet d'identifier quel processus sera pris en considération lors de l'analyse.

Cette analyse porte sur les 12 domaines suivants :

- 1-Organisation générale.
- 2- Méthode de travail
- 3-suivi technique des équipements.
- 4-gestion portefeuille des travaux.
- 5-Tenue des stocks de pièces de rechange.
- 6-achat et approvisionnement des pièces et matières.
- 7-Organisation matérielles de l'atelier de maintenance.
- 8-Ouillage.
- 9-Documentation technique.
- 10-Personnel et formation.
- 11Sous-traitance.
- 12-Contrôle de l'activité.

### **II.3 Mise en œuvre du concept de la maintenance distribuée**

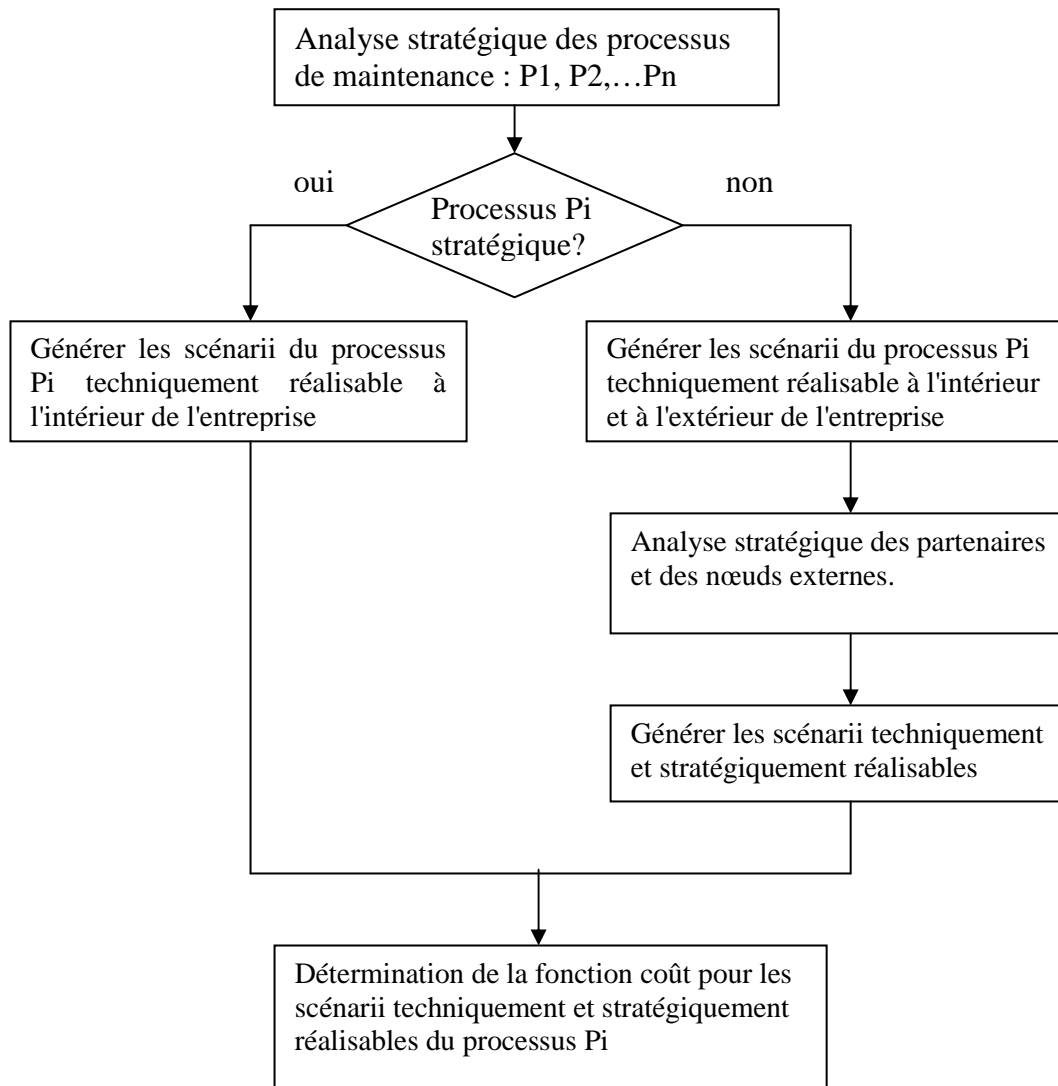
Pour implanter ce nouveau concept, plusieurs étapes sont nécessaires, d'abord, il faut diagnostiquer le système de maintenance déjà existant pour déterminer les faiblesses et les défaillances de ce système, ensuite il faut analyser le processus du point de vue stratégique.

Si le processus est stratégique, il faut déployer des efforts pour trouver des solutions internes, par contre si ce processus est moins important, nous déterminons les processeurs internes et externes capables de le réaliser, d'où la génération d'un ensemble de scénarii composé de couples (processus-processeurs) techniquement réalisables.

Une fois ces couples formés, et dans le cas d'existence de partenaires externes, nous évaluons stratégiquement ces couples, il en résulte des scénarii techniquement et stratégiquement réalisables.

Si par la suite nous aurions plusieurs scénarii pour un seul processus, le filtre économique, dernière étape de ce modèle, permet de faire un choix éclairé.

Nous détaillons dans ce qui suit toutes les étapes nécessaires à l'élaboration du modèle.



**Figure II.3. Mise en œuvre du concept de la maintenance distribuée**

### **II.3.1 L'analyse des processus**

Dans cette étape, nous allons faire l'analyse de processus du point de vue stratégique, pour cette fin, trois critères sont pris en considération : importance, performance et potentiel.

- L'importance du processus dans la stratégie de l'entreprise est déterminée par sa pertinence pour l'élaboration de l'avantage concurrentiel de celle-ci.
- La performance d'un processus est mesurée par sa capacité à atteindre des objectifs à moindres coûts.
- Le potentiel quant à lui, est déterminé par la capacité du processus à devenir plus compétitif.

Le niveau de chaque critère est déterminé subjectivement par le gestionnaire de l'entreprise.

Pour l'analyse stratégique des processus de maintenance, une série de question est posée.

- Dans quelle mesure la réalisation de l'action de maintenance coïncide t-elle avec la politique de gestion de l'entreprise ?
- On réaliser cette activité d'une autre manière ?
- Quelles autres opportunités avons-nous pour exploiter les ressources que nous affectons à ces actions de maintenance ?
- Quel est le risque concurrentiel de se départir complètement ou partiellement de cette tâche ?

Le tableau ci-dessous présente pour chaque processus du système de maintenance les décisions stratégiques à prendre en fonction des valeurs des indicateurs importance, performance et potentiel.

Évaluation des processus internes			Action.
Importance	Performance	Potentiel	
-	-	-	Externaliser
-	-	+	Externaliser
-	+	-	Externaliser
-	+	+	Externaliser ou garder à l'interne
+	-	-	Garder à l'interne
+	-	+	Garder à l'interne
+	+	-	Garder à l'interne
+	+	+	Garder en portant une attention stratégique

**Tableau II.1. Le diagnostic des processus internes [22]**

D'après le tableau, si un processus est jugé important (processus stratégique) il est essentiel de le garder à l'interne même si les autres indicateurs (performance et potentiel) ne sont pas favorables.

### **II.3.2 Génération de scénarii techniquement réalisables**

La réalisation des processus de maintenance est souvent accompagnée par quelques interrogations concernant les trois volets : ressources humaines, ressources matérielles et organisation.

On s'interroge sur leur disponibilité et leur taux d'occupation, leur habilité a réalisé le processus à l'interne et à utiliser des ressources externes et leur temps de réponse, cela constituera notre contribution qu'on va présenter au chapitre 3.

La génération de systèmes de processus techniquement capables de réaliser le processus de maintenance est composée de quatre étapes :

- L'étude de la procédure d'exécution :

Cette procédure nous indique les ressources matérielles, les pièces de rechange et les compétences requises pour l'exécution du processus en question.



- L'analyse de la documentation technique :

Il faut ramasser tout l'historique et les documents relatifs à ce processus. Afin d'identifier les ressources humaines et les entreprises externes ayant déjà réalisé l'intervention.

- L'analyse des ressources internes :

À partir de la documentation technique consultée précédemment, nous dégageons la liste des ressources humaines qui sont en mesure d'exécuter l'intervention, Il faut aussi vérifier la disponibilité des ressources matérielles en fonction de leur utilisation dans la production.

- L'exploration des ressources externes :

Cela permet le recensement des organismes externes pouvant réaliser le processus et déterminer leur temps de réponse et leur implication dans l'entreprise.

- La génération des systèmes internes ou externes techniquement réalisables :

À partir des hypothèses simplificatrices citées auparavant, cette étape permet de générer des systèmes techniquement réalisables.

### **II.3.3 Le filtre stratégique**

S'il y a lieu de partenaires externes dans les scénarii générés au cours de l'étape précédente, une analyse stratégique est indispensable. Plusieurs questions se posent vis à vis du partenaire externe :

- Qu'elle est la fiabilité du partenaire ?
- Est-il facilement joignable ?

Pour cela nous allons déterminer les critères d'évaluation du partenaire externe, en suite on fera la synthèse des partenaires et des liens qui peuvent se tisser entre les partenaires.

#### **II.3.3.1 Evaluation des partenaires externes**

Au cours de cette étape, nous procédons à l'évaluation stratégique des nœuds externes et des partenaires, nous définissons les critères qui permettent de sélectionner le nœud ou le partenaire externe.

- **L'importance par rapport à l'entreprise(IN)**

Il est nécessaire de connaître l'importance de l'organisme externe pour l'entreprise. Si le nœud ou partenaire externe développe une technologie de pointe de surveillance d'équipement indispensable au système de production, ce nœud ou partenaire sera stratégiquement important pour l'entreprise.

- **L'importance par rapport au partenaire(IL)**

Elle détermine le degré d'influence de l'entreprise dans le processus décisionnel du partenaire externe.

- **La performance(PF)**

Elle est définie par la contribution à la création de valeur dans l'entreprise. Elle est indépendante de la performance de l'entreprise.

- **Le potentiel(PT)**

C'est le volume monétaire échangé entre les deux entreprises.

Évaluation				Actions stratégiques possibles.
IN	IL	PF	PT	
+	+	+	+	Conserver le lien en portant une attention stratégique constante au lien.
+	+	+	-	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer le potentiel du nœud ou du partenaire et en ajustant la fonction risque.
+	+	-	+	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer la performance du nœud ou du partenaire et en ajustant la fonction risque.
+	+	-	-	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer la performance et le potentiel du nœud ou du partenaire et en ajustant la fonction risque.
+	-	+	+	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer notre importance vis à vis du nœud ou du partenaire et en ajustant la fonction risque.
+	-	+	-	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer notre importance vis à vis du nœud ou du partenaire et son potentiel en ajustant la fonction risque.
+	-	-	+	Conserver le lien tout en cherchant à améliorer notre importance vis à vis du nœud ou du partenaire et sa performance en ajustant la fonction risque.
+	-	-	-	Rompre le lien.
-	+	+	+	Conserver le lien pour des activités non stratégiques. Le soin est laissé au filtre économique pour la sélection de cette possibilité.
-	+	+	-	Conserver le lien pour des activités non stratégiques. Le soin est laissé au filtre économique pour la sélection de cette possibilité.
-	+	-	+	Rompre le lien.
-	+	-	-	Rompre le lien.
-	-	+	+	Conserver le lien pour des activités non stratégiques. Le soin est laissé au filtre économique pour la sélection de cette possibilité.
-	-		-	Rompre le lien
-	-	-		Rompre le lien
-	-	-	-	Rompre le lien

**Tableau II.2. L'évaluation du partenaire externe[22]**

Le tableau suivant présente les critères de sélection des partenaires ou des nœuds externes et les actions stratégiques qui en découlent.

On mentionne toute fois que le facteur importance du partenaire est déterminant dans l'action stratégique possible.

### II.3.3.2 Synthèse

Une fois que les indicateurs sont déterminés pour chaque processus de maintenance, il est possible de voir les différentiels cas de figure (scenarii) qui s'offrent au gestionnaire.

Evaluation des processus internes			Action
Importance	Performance	Potentiel	
-	-	-	Sous-traiter, impartir, faire en réseau
-	-	+	Sous-traiter, impartir, faire le processus avec un nœud ou un partenaire pour lequel l'activité est importante
-	+	-	Sous-traiter, impartir, faire le processus avec un nœud ou un partenaire pour lequel l'activité est importante. Préparer le processus pour qu'il soit externalisable.
-	+	+	Sous-traiter, impartir, faire le processus avec un nœud ou un partenaire pour lequel l'activité est importante. Externalité le nœud interne qui fait ce processus (créer une filiale).

**Tableau II.3. La synthèse des actions stratégiques [22]**

### II.3.4 Le filtre économique

La dernière étape de ce modèle sera de passer les couples sélectionnés à travers le filtre économique, celui-ci permet de faire un choix éclairé.

## **II.4 Conclusion**

L'étude de la fonction maintenance contribue d'une manière significative à la performance globale de l'entreprise ; puisque celle-ci est considérée comme un centre de coût induit par les défaillances accidentelles des systèmes de production

Le concept de la maintenance distribuée a été immergé pour remédier à la pénurie des ressources humaines compétentes et les ressources matérielles nécessaires à l'exécution des tâches de maintenance, ce concept est défini comme étant une approche de mise en œuvre de la maintenance basée sur l'analyse des activités et des ressources selon une approche réseau.

L'implantation de ce nouveau concept nécessite plusieurs étapes :

- Diagnostiquer le système de maintenance déjà existant pour déterminer les faiblesses et les défaillances de ce système.
- Analyser le processus du point de vue stratégique, si le processus est stratégique, il faut déployer des efforts pour trouver des solutions internes, sinon il faut déterminer les processeurs internes et externes capables de le réaliser, il en résulte des scénarii techniquement réalisables.
- Analyser les partenaires externes du point de vu stratégique, il en résulte des scénarii techniquement et stratégiquement réalisables.
- Dernière étape de ce modèle, c'est le filtre économique qui permet de faire un choix éclairé.

Nous allons étudier au prochain chapitre la gestion de la ressource humaine qui est une des plus importantes ressources dans une entreprise.

## **CHAPITRE III**

# **Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application**

### **III.1 Introduction**

La mise en œuvre du concept de la maintenance distribuée consiste en la construction d'un plan de maintenance basé sur l'analyse des processus (tâches de maintenance) et des processeurs (ressources humaines, ressources matériels, pièces de rechange, et système d'information).

Nous nous intéressons dans cette contribution à la gestion des ressources humaines dans de tel système, et nous étudions le problème d'existence d'affectation du personnel pour la réalisation d'un plan de production permettant d'accélérer le processus de maintenance des équipements et de minimiser le coût global de la maintenance.

### **III.2 Gestion des ressources humaines**

La gestion des ressources humaine est un ensemble de fonctions et de pratiques ayant pour objectif de mobiliser et développer les ressources pour une plus grande efficacité et efficience, en soutien de la stratégie d'une organisation (association, entreprise, administration, etc.).

De manière générale, le manager de l'entreprise chargé de gérer la ressource humaine a à résoudre deux problèmes:

- l'assignation des techniciens de maintenance à des équipes.
- et la détermination des cycles d'intervention de ces derniers.

#### **III.2.1 Ordonnancement des ressources humaines**

L'ordonnancement des activités de maintenance consiste à organiser dans le temps la réalisation des tâches de maintenance en tenant compte de la compétence de la ressource humaine et de sa disponibilité, les domaines d'application de l'ordonnancement sont nombreux: informatique temps réel, médecine, services, etc....

### Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

En ordonnancement d'atelier, il y a deux types de ressources à gérer: les ressources humaines et les machines, il s'agit d'affecter dans le temps des opérateurs à des stations de travail composées de machines.

#### **III.2.2 Compétence des ressources humaines**

Dans la littérature, plusieurs définitions ont été proposées, D'après Foucher [15], une compétence peut être définie comme un ensemble de savoir et de savoir faire, en vue d'accomplir de façon adaptée une activité généralement complexe.

La compétence traduit également l'aptitude de l'opérateur humain à identifier et à apprécier en permanence l'importance et l'urgence relatives des tâches qui doivent être réalisées, ainsi que sa capacité à définir et conduire un ordonnancement dynamique de ses activités en fonction des contraintes spatio-temporelles [34].

On rencontre plusieurs types de compétences:

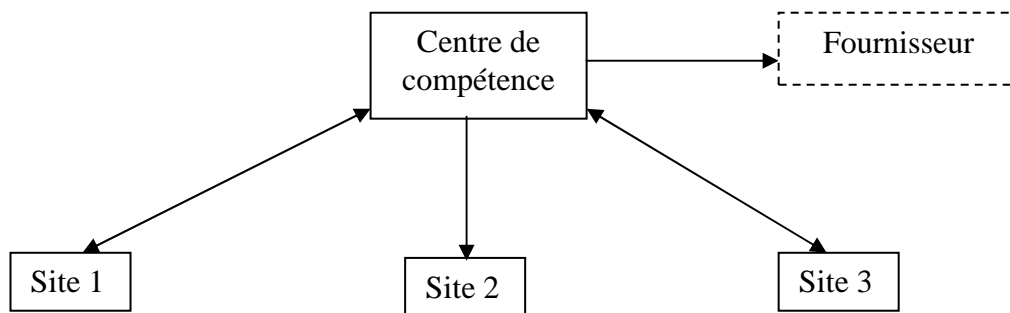
- Compétences par rapport aux tâches. Le travailleur ne peut exécuter que des opérations bien spécifiques, et cela indépendamment de la machine utilisée.
- Compétence par rapport aux machines: chaque travailleur est qualifié pour exécuter n'importe quelle opération, mais sur un ensemble de machines spécifiques, le travailleur ne peut donc pas travailler sur toutes les machines.
- Compétence mixte: il existe des travailleurs qualifiés pour opérer sur plusieurs centres de travail et exécuter plusieurs types de tâches, les travailleurs bien formés ayant cette caractéristique peuvent opérer efficacement dans des cellules flexibles de production pour répondre rapidement au changement des demandes en produits et en volume [20].
- Compétence hiérarchisée: Hung [21], Billionnet [7] classifient les compétences en plusieurs types, ensuite les types sont classés sur une échelle hiérarchique: un travailleur plus qualifié peut substituer à un travailleur moins qualifié, mais pas l'inverse.
- Compétence par contrat: V.Kher [24] parle de compétence de certains travailleurs à répondre aux exigences spécifiques des clients, la règle d'affectation des opérateurs prend en compte la disponibilité des travailleurs dans les différents départements qui contiennent des commandes destinées aux clients.

### III.3 Formulation du problème

Tous les systèmes de télémaintenance possèdent des points communs dans leur organisation. Un système télémaintenance est souvent constitué d'au moins deux parties distinctes:

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

Ces entités ne sont pas seules, l'existence d'autres composants du système dépend de leur organisation, nous pouvons introduire des fournisseurs dans notre système, qui fournissent quelques ressources (par exemple les pièces de rechange ou les outils de maintenance) au centre de compétence, mais en général nous pouvons dire que le problème de gestion de stock des pièces de rechange est indépendant et nous supposant que nous avons toujours assez de ressources dans le centre de compétence.



**Figure III.1. Schéma d'interaction entre les différents composants d'un système de télémaintenance**

### Hypothèses

Nous adoptons les hypothèses suivantes:

- Nous nous positionnons dans le cas de la maintenance préventive.
- Les dates d'intervention et les durées de tâches sont calculées sur la base de l'analyse statistique des pannes.
- Une équipe de maintenance doit avoir un certain niveau de compétence pour pouvoir maintenir l'équipement.
- Chaque équipe est indépendante par rapport aux autres équipes.
- Il n'y a pas de matériel partagé entre les équipes.
- Les équipes de maintenance peuvent avoir des compétences différentes dans chaque domaine. Pour modéliser ce fait, on associe le niveau de compétence requis à chaque tâche. De l'autre côté, chaque équipe a son propre niveau de



compétence. Si le niveau de compétence de l'équipe est inférieur au niveau requis par la tâche, l'équipe ne peut pas la traiter.

### III.3.1 Modélisation du problème

Nous nous intéressant au problème de minimisation du coût de la maintenance dans un contexte distribué, au niveau de l'organisation du système, nous adoptons la structure suivante : il y a un centre de compétence, qui possède des équipes de maintenance (E1, E2.....).

Chaque équipe est qualifiée dans tous les domaines, correspondant à tous les types d'interventions avec des niveaux de compétence différents pour chaque domaine.

Chaque tâche de maintenance est représentée par son indice  $i$ , sa durée  $p_i$ , sa date d'exécution optimale  $d_i$ .

Le coût d'une tâche de maintenance est représenté sur la figure III.2

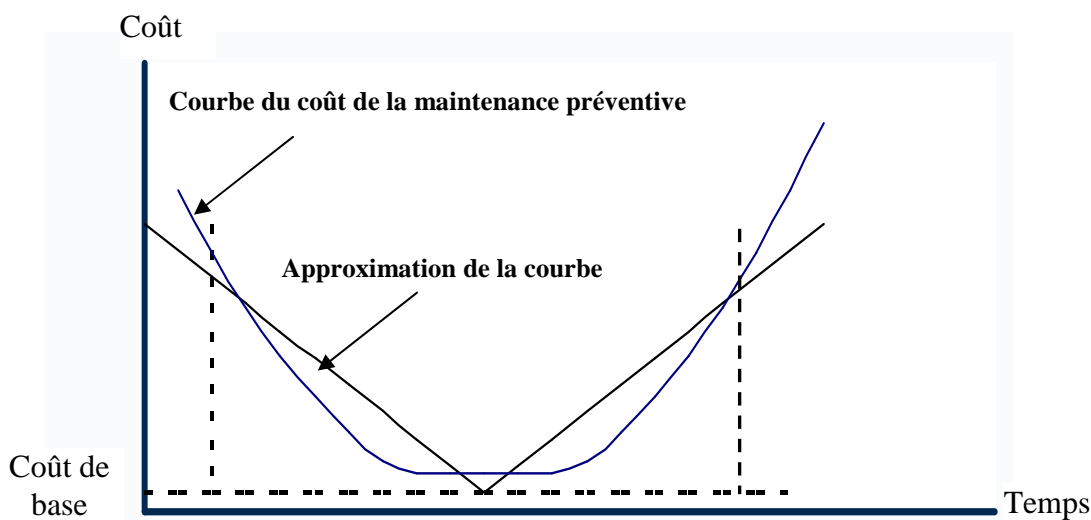


Figure III.2. Le coût d'une tâche de maintenance

La courbe en baignoire présentée au chapitre 1 a été approchée par une courbe linéaire dans le but d'obtenir un modèle mathématique simple.

La formule correspondant au coût d'une tâche :

$$Coût_i = CoûtDeBase + a. | d_i - C_i | \quad \text{III.1}$$

Où

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

<b>CoûtDeBase</b>	le coût minimal de la tâche.
<b><math>C_j</math></b>	la date d'achèvement de la tâche i.
<b><math>\alpha</math></b>	coût de la maintenance par unité de temps.

Il y a une date optimale d'intervention qui permet de minimiser le coût de la maintenance; si on intervient avant cette date, le coût de la maintenance augmente, parce que les interventions sont faites trop souvent.

D'autre part, si on dépasse cette date optimale, l'équipement risque de tomber en panne, donc le coût de la maintenance augmente aussi. Cette courbe est l'approximation de la « courbe du coût global de la maintenance préventive ».

Le coût des activités de maintenance est la somme des coûts de toutes les tâches  $\Sigma Cout_i$ .

Il faut remarquer que cette fonction ne tient pas compte des coûts supplémentaires (par exemple, il n'y a aucun coût de déplacement) dans le cadre d'un service de maintenance externalisé.

Avec cette fonction à optimiser, si les dates d'échéance de tâches sont réparties dans l'ordonnancement optimal, tous les temps libres entre les tâches seront remplis par les temps de déplacements.

Donc, il paraît plus réaliste, d'introduire encore les coûts de déplacements, dans le but de minimiser le nombre de déplacements. Le coût d'un déplacement est le produit du temps de déplacement et le coût par unité de temps de déplacement :

$$C_{depli} = tdepl_i \cdot \text{Coût Temps} \quad \text{III.2}$$

Avec

<b><math>tdepl_i</math></b>	temps de déplacement.
<b>Coût Temps</b>	coût de déplacement par unité de temps

Et la fonction globale à optimiser (fonction objectif) s'écrit:

$$FO = \Sigma Cout_i + \Sigma Cdepl_i \quad \text{III.3}$$

### III.3.2 Méthodes de résolution

Dans la plupart des articles dédiés à ce type de problème, les auteurs supposent qu'il n'y a pas de temps mort entre deux tâches consécutives. De plus, les problèmes traités se limitent à l'ordonnancement de tâches sur une seule machine.

#### III.3.2.1 Introduction

Lorsque les tâches ont des dates d'échéance, le problème avec des avances et des retards comme fonction à optimiser est connu sous le nom de Earliness/Tardiness problem,

Abdul-Razaq et Potts, 1989 [1], ont résolu ce type de problèmes, mais ils ne considèrent que les ordonnancements sans le temps d'attente entre les tâches. Leur méthode de résolution utilise un algorithme de séparation et d'évaluation.

Leurs résultats montrent que le problème avec plus de 25 tâches peut prendre un temps de calcul considérable.

Plus tard, Ibaraki et Nakamura 1994 [22], ont amélioré la procédure ; ils ont proposé la méthode SSDP (Successive Sublimation Dynamic Programming) pour résoudre ce problème. Les expériences ont montré, que cette méthode peut résoudre les problèmes avec 35 tâches. Cependant, ils considèrent aussi, qu'il n'y a pas de temps d'attente entre les tâches.

N. Sortrakul, H.L. Nachtmann 2004 [38]; ont proposé une heuristique basée sur les algorithmes génétiques, celle-ci peut s'avérer efficace pour l'ordonnancement des tâches sur une seule machine, par contre son utilisation est limitée sur les problèmes de petite et moyenne taille.

Si la séquence de tâches est donnée, l'ordonnancement optimal avec les temps d'attente entre les tâches peut être obtenu par l'application d'une procédure, proposée par Garey et Al; 1989 [19].

Des méthodes semblables ont été développées par Davis et Kanet 1993 [13].

Ainsi, si on peut insérer le temps d'attente de la manière optimale, le problème principal est de déterminer la meilleure séquence.

Fry et Al 1987 [16], ont décrit une procédure de résolution, basée sur la recherche locale par une procédure de recherche de solutions voisines. Fry et Al; 1989 [17] décrivent une procédure de séparation et d'évaluation pour la minimisation de la somme moyenne de l'avance et du retard. Ils remarquent que l'algorithme peut résoudre les problèmes avec 20 tâches.

Balas et Al 1993 [5], on introduit la notion d'introduction de délais de précedence. Ils ont utilisé le terme de « contraintes de précedence avec délais ».

Cette notion fait apparaître des contraintes supplémentaires sur les dates de disponibilités des tâches.

Finta et Liu; 1994 [14] montrent que si les tâches ont une durée arbitraire, la minimisation du makespan (durée globale des tâches de maintenance) avec des durées entières pour les délais de précedence, devient polynomiale.

Gagne et Al; 2001 [18] ont proposé une heuristique basée sur un algorithme de colonie de fourmis. Le problème, qu'ils traitent est le problème avec les temps de réglages, dépendants de la séquence et la fonction à minimiser est le retard total. Ils trouvent, que l'algorithme est assez efficace du point de vue de la qualité de solutions, ainsi que du point de vue du temps de calcul.

De plus ils proposent une comparaison de l'algorithme avec d'autres heuristiques.

### **III.3.2.2 Algorithme de programmation dynamique**

Le problème que nous attaquons est un peu différent par rapport aux problèmes présentés. Nous traitons un problème avec plusieurs équipes de maintenance, de plus, les équipent possèdent différents niveaux de compétences, cela est introduit par le fait que les machines ne sont pas pareils.

Le but d'un système de maintenance est de trouver la meilleure compétence au meilleur moment.

Trouver une solution suppose la résolution de deux sous-problèmes :

- Pour chaque équipe il faut trouver la meilleure séquence de tâches.
- Pour chaque tâche il faut trouver la meilleure date de début.

Pour résoudre ce problème, nous allons appliquer la méthode de la programmation dynamique.

La programmation dynamique est une méthode d'optimisation procédant par énumération implicite des solutions. Cette approche permet de résoudre efficacement des problèmes de décisions séquentielles. Plus généralement, elle consiste à aborder des problèmes d'optimisation avec une stratégie consistant en deux points essentiels :

- Décomposer le problème en une séquence de problèmes.
- Etablir une relation de récurrence entre les solutions optimales des problèmes.

Dans un problème de programmation dynamique, on distingue deux types de variables, les variables d'état et les variables de contrôle (variable de police).

**a. Problème d'allocation**

On considère l'indice de performance  $P = \sum_{i=1}^K f_i(x_i)$  tel que  $f_i(x_i)$  dépend uniquement de  $x_i$  et que l'ensemble des  $x_i$  soient contraint par  $\sum_{i=1}^K g_i(x_i) \leq b$ .

$f_i$  et  $g_i$  sont des fonctions analytiques ou graphiques,  $b =$  constante et le problème posé étant de maximiser (ou minimiser)  $P$ .

Le terme "Allocation" est utilisé et justifié par l'exemple suivant :

Soit un budget  $b$  (dinars) à investir pour la réalisation de  $K$  projets; soit  $g_i(x_i)$ , la valeur en dinars allouée pour réaliser le  $i$ ème projet en espérant un gain de rentabilité ayant pour valeur  $f_i(x_i)$ .

L'optimisation est donc de maximiser :

$$P = \sum_{i=1}^K f_i(x_i) \text{ avec la contrainte : } \sum_{i=1}^K g_i(x_i) \leq b$$

**b. Approche de la programmation dynamique**

Soit la forme généralisée de la contrainte :  $\sum_{i=1}^K g_i(x_i) \leq \beta_K \leq b$

On suppose dans ce cas que :  $x_i$  et  $g_i(x_i)$  ne prennent que des valeurs positives.

On définit une fonction :  $F_K(\beta_K)$  tel que :  $F_K(\beta_K) = \text{maximum}(P)$ .

$$F_K(\beta_K) = \text{maximum} \left[ \sum_{i=1}^K f_i(x_i) \right]$$

$$F_K(\beta_K) = \text{maximum} \left[ f_K(x_K) + \sum_{i=1}^{K-1} f_i(x_i) \right]$$

"F" est appelée fonction du gain maximum ou fonction du gain minimum.

" $\beta_K$ " est appelée variable ressource ou la variable allouée.

Il s'agit maintenant de déterminer, à partir de  $F_K(\beta_K)$ , la solution. Pour cela on définit  $\hat{x}_K(\beta_K)$  comme fonction de contrôle associée à  $x_K$  pour une valeur de  $\beta_K$ .

Autrement dit  $\hat{x}_K(\beta_K)$  est la valeur optimale de  $x_K$ .

De cette manière, on déduit :

$$F_K(\beta_K) = f_K[\hat{x}_K(\beta_K)] + \text{maximum} \left[ \sum_{i=1}^{K-1} f_i(x_i) \right] \quad \text{III.4}$$

Dans lequel le terme maximum est contraint par :

$$\sum_{i=1}^{K-1} g_i(x_i) \leq \beta_K - g_K[\hat{x}_K(\beta_K)]$$

De même que pour la première étape, on définit la fonction de gain maximum

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

$$F_{K-1}\{\beta_K - g_K[\hat{x}_K(\beta_K)]\} = \text{maximum} \left[ \sum_{i=1}^{K-1} f_i(x_i) \right].$$

Afin d'obtenir une formule générale, soit:  $\beta_{K-1} = \beta_K - g_K[\hat{x}_K(\beta_K)]$  et qui représente la valeur allouée aux variables restantes :  $x_1, \dots, x_{K-1}$ . On obtient donc:

$$F_{K-1}(\beta_{K-1}) = \text{maximum} \left[ \sum_{i=1}^{K-1} f_i(x_i) \right].$$

Avec la contrainte réduite :  $\sum_{i=1}^{K-1} g_i(x_i) \leq \beta_{K-1}$

L'équation (III.4) devient alors :

$$F_K(\beta_K) = \text{maximum} \{ f_K[x_K(\beta_K)] + F_{K-1}(\beta_{K-1}) \}$$

Ainsi la solution de niveau K est simplifiée lorsque la solution de niveau K-1 est connue. Ce principe de récurrence est valable quelque soit  $k = 1, \dots, K$ . Ce processus de récurrence s'arrête avec la condition  $F_0(\beta_0) = 0$ .

D'où:  $F_1(\beta_1) = \text{maximum} [f_1(x_1)]$  avec la contrainte :  $g_1(x_1) \leq \beta_1$

L'expression générale de récurrence de niveau  $k = 1, \dots, K$  est la suivante :

$$F_k(\beta_k) = \text{maximum} \{ f_k[x_k(\beta_k)] + F_{k-1}(\beta_{k-1}) \}. \quad \text{III.5}$$

avec la contrainte  $g_k(x_k) \leq \beta_k$

Ainsi en partant de  $k = 1$  vers  $k = K$  on obtient le tableau suivant :

k →	1	2	.....	K-1	K			
$\beta_k \downarrow$	$F_1(\beta_1)$	$\hat{x}_1(\beta_1)$	$F_2(\beta_2)$	$\hat{x}_2(\beta_2)$	$F_{K-1}(\beta_{K-1})$	$\hat{x}_{K-1}(\beta_{K-1})$	$F_K(\beta_K)$	$\hat{x}_K(\beta_K)$
0	$F_1(0)$	$\hat{x}_1(0)$	$F_2(0)$	$\hat{x}_2(0)$	$F_{K-1}(0)$	$\hat{x}_{K-1}(0)$	$F_K(0)$	$\hat{x}_K(0)$
1	$F_1(1)$	$\hat{x}_1(1)$	$F_2(1)$	$\hat{x}_2(1)$	$F_{K-1}(1)$	$\hat{x}_{K-1}(1)$	$F_K(1)$	$\hat{x}_K(1)$
2	$F_1(2)$	$\hat{x}_1(2)$	$F_2(2)$	$\hat{x}_2(2)$	$F_{K-1}(2)$	$\hat{x}_{K-1}(2)$	$F_K(2)$	$\hat{x}_K(2)$
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
B	$F_1(b)$	$\hat{x}_1(b)$	$F_2(b)$	$\hat{x}_2(b)$	$F_{K-1}(b)$	$\hat{x}_{K-1}(b)$	$F_K(b)$	$\hat{x}_K(b)$

Alors que le remplissage du tableau se fait en chaînage avant, la détermination des valeurs optimales des solutions se fait en chaînage arrière.

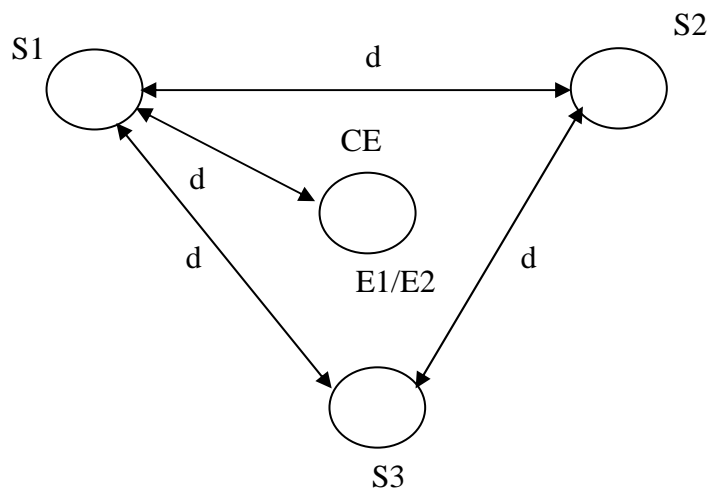
### III.4. Application

Nous présentons dans ce qui suit un exemple d'application permettant de mettre en pratique l'algorithme de programmation dynamique.

### III.4.1 Cahier des charges

- 3 sites de production. S1, S2, S3.
- 1 centre expert CE.
- 2 équipes de maintenance E1, E2 (avec des niveaux de compétences de:  $q_1=75\%$ , et  $q_2=100\%$ )
- 6 tâches de maintenance ( $i=6$ ).
- Les compétences demandées par les tâches( $Q_i$ ) sont réparties entre 50% et 100%.
- La durée de chaque tâche ( $p_i$ ).

La configuration adoptée est représentée sur la figure ci –dessous (figure III.3).



**Figure III.3. Configuration adoptée.**

A l'instant  $t=0$ , les équipes de maintenance E1, E2, se trouvent au centre expert.

Nous allons considérer tout au long de notre étude que la durée de déplacement entre le centre expert et les différents sites est égale à la durée de déplacement entre les différents sites, est égale à l'unité ( $d=1$ ).

### III.4.2 Résolution du problème

#### Description du procédé globale

La procédure consiste à définir la séquence de tâche optimale pour chaque équipe (E1, E2).

L'indice de performance  $P$  à minimiser représente le nombre de déplacement effectué par les équipes (E1, E2).

$$P = \sum_{i=1}^K f_i(x_i) \quad \text{à minimiser, avec} \quad K=6 \text{ (6 tâches de maintenance)}$$

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

Tel que la fonction  $f(x_i)$  est définie par:

**Fonction  $f(x_i)$**

**SE** //: le site où se trouve l'équipe E.

**S** //: site de production.

**si**  $SE(i-1)=S(i)$

$f(x_i) = 0$  // pas de déplacement.

**sinon**

$f(x_i)=1$  // il y a un déplacement

**Finsi**

En utilisant la programmation dynamique, le problème peut être résolu par la formule réursive (III.5)

$$F_k(\beta_k) = \min \{ f_k[x_k(\beta_k)] + F_{k-1}(\beta_{k-1}) \}$$

D'où

$$F_6(\beta_6) = \min \{ f_6[x_6(\beta_6)] + F_5(\beta_5) \} \quad (\text{déplacement globale})$$

$$F_5(\beta_5) = \min \{ f_5[x_5(\beta_5)] + F_4(\beta_4) \}$$

•

•

•

$$F_2(\beta_2) = \min \{ f_2[x_2(\beta_2)] + F_1(\beta_1) \}$$

$$F_1(\beta_k) = \min \{ f_1[x_1(\beta_1)] \}$$

Nous avons à remplir le tableau si dessous.



<b>K →</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Site</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>
<b>Durée</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
<b>Compétence</b>	<b>Q1</b>	<b>Q2</b>	<b>Q3</b>	<b>Q4</b>	<b>Q5</b>	<b>Q6</b>
<b><math>\beta</math> (équipe)</b>	<b><math>\beta_1</math></b>	<b><math>\beta_2</math></b>	<b><math>\beta_3</math></b>	<b><math>\beta_4</math></b>	<b><math>\beta_5</math></b>	<b><math>\beta_6</math></b>
<b>F(<math>\beta</math>)</b>	<b>F1</b>	<b>F5</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>	<b>F5</b>	<b>F6</b>

**Tableau III.1. Table des variables**

Ainsi, le calcul du minimum de déplacement au court de chaque étape permet de faire un choix optimal quant à l'équipe qui exécutera la tâche K.

Si lors de l'étape K, le niveau de compétence de l'équipe *E1* est inférieur au niveau de compétence requis par la tâche K, l'équipe *E2* sera forcée d'exécuter cette tâche.

### **III.5 Application numérique**

L'algorithme a été programmé sous Matlab, le programme génère aléatoirement les paramètres suivants pour chaque tâche:

- Le numéro du site, sur lequel la tâche doit être traitée.
- La durée de la tâche (on a choisi de fixer la durée de chaque tâche entre 1 et 10 unités de temps).
- Le niveau de compétence demandé pour chaque tâche (compris entre 50% et 100%).

Les paramètres de calcul:

- **CoutDeBase**=230\$ (coût de base de maintenance).
- **CoutDTemp**s=38\$ (coût de déplacement par unité de temps).
- **$\alpha$** =78; (coût de maintenance par unité de temps).
- Le numéro du site, la durée, et la compétence requise pour chaque tâche sont représentés dans le tableau III.2.

K →	1	2	3	4	5	6
Numéro du site	2	1	3	3	3	2
Durée des tâches	3	8	5	2	6	7
Compétence	72	74	65	70	70	85

**Tableau III.2 Paramètres de calcul**

**Remarque:** Pour simplifier la problématique et adopter une démarche progressive en termes de difficulté, nous optons en premier temps pour une configuration avec 2 équipes ayant la même compétence (100%), tout en ne prenant pas compte des durées des tâches, ou en d'autre terme, la disponibilité des équipes.

Nous optons dans un deuxième temps pour une configuration avec 2 équipes compétentes à 100%, avec prise en compte des durées des tâches.

La dernière configuration consiste à prendre en compte les compétences des équipes données dans le cahier des charges.

### II.5.1 Première configuration

- Les deux équipes sont compétentes à 100%.
- L'algorithme nous donne le meilleur ordonnancement qui minimise le nombre de déplacement des équipes (il ne tient pas comptes de la disponibilité des équipe).

### Décomposition du calcul

Lors de chaque étape, le calcul de la fonction 'F<sub>k</sub>(β<sub>k</sub>)' permet de faire un choix éclairé quant à l'équipe qui exécutera la tâche de maintenance K.

- **K=1**

$$F_1(\beta_k) = \min \{ f_1[x_1(\beta_1)] \}$$

A l'instant t=0, l'équipe E1 se trouve au centre expert (SE1=0), pour exécuter la tâche 1, E1 doit se déplacer vers le site 2(S=2).

D'où SE1≠S  
 Donc f1(E1)=1 (il y a eu un déplacement de l'équipe E1).

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

De la même manière on calculera  $f_1(E_2)$

$$\underline{f_1(E_2)} = 1$$

Et on obtient

$$F_1 = \min(1, 1) = 1 \text{ (unité de temps)}$$

**Séquences optimales:**

Deux possibilités nous sont offertes:

E1

E2

La tâche 1 sera exécutée par l'équipe E1 ou l'équipe E2.

• **K=2**

$$F_2(\beta_2) = \min \{ f_2[\chi_2(\beta_2)] + F_1(\beta_1) \}$$

$$\underline{f_2(E1, E1)} = 1$$

$$\underline{f_2(E1, E2)} = 1$$

$$\underline{f_2(E2, E1)} = 1$$

$$\underline{f_2(E2, E2)} = 1$$

$$F_2 = \min \{ (1, 1, 1, 1) + 1 \} = 2$$

**Séquences optimales:**

E1E1

E1E2

E2E1

E2E2

• **K=3**

$$F_3(\beta_3) = \min \{ f_3[\chi_3(\beta_3)] + F_2(\beta_2) \}$$

$$\underline{f_3(E1, E1, E1)} = 1$$

$$\underline{f_3(E1, E1, E2)} = 1$$

$$\underline{f_3(E1, E2, E1)} = 1$$

$$\underline{f_3(E1, E2, E2)} = 1$$

$$\underline{f_3(E2, E1, E1)} = 1$$

$$\underline{f_3(E2, E1, E2)} = 1$$

$$\underline{f_3(E2, E2, E1)} = 1$$

$$\underline{f_3(E2, E2, E2)} = 1$$

$$F_3 = \min \{ (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) + 2 \} = 3$$

**Séquences optimales:**

E1E1E1  
E1E1E2  
E1E2E1  
E1E2E2  
E2E1E1  
E2E1E2  
E2E2E1  
E2E2E2

• **K=4**

$$F_4(\beta_4) = \min \{ f_4[\chi_4(\beta_4)] + F_3(\beta_3) \}$$

$$\begin{aligned} \underline{f_4(E1,E1,E1,E1)} &= 0 \\ f_4(E1,E1,E1,E2) &= 1 \\ f_4(E1,E1,E2,E1) &= 1 \\ \underline{f_4(E1,E1,E2,E2)} &= 0 \\ \underline{f_4(E1,E2,E1,E1)} &= 0 \\ f_4(E1,E2,E1,E2) &= 1 \\ f_4(E1,E2,E2,E1) &= 1 \\ \underline{f_4(E1,E2,E2,E2)} &= 0 \\ \underline{f_4(E2,E1,E1,E1)} &= 0 \\ f_4(E2,E1,E1,E2) &= 1 \\ f_4(E2,E1,E2,E1) &= 1 \\ \underline{f_4(E2,E1,E2,E2)} &= 0 \\ \underline{f_4(E2,E2,E1,E1)} &= 0 \\ f_4(E2,E2,E1,E2) &= 1 \\ f_4(E2,E2,E2,E1) &= 1 \\ \underline{f_4(E2,E2,E2,E2)} &= 0 \end{aligned}$$

$$F_4 = \min \{ (0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0) + 3 \} = 3$$

**Séquences optimales:**

E1E1E1E1  
E1E1E2E2  
E1E2E1E1  
E1E2E2E2  
E2E1E1E1  
E2E1E2E2  
E2E2E1E1  
E2E2E2E2

• **K=5**

$$F_5(\beta_5) = \min \{ f_5[\chi_5(\beta_5)] + F_4(\beta_4) \}$$

- $f_5(E1,E1,E1,E1,E1) = 0$
- $f_5(E1,E1,E1,E1,E2) = 1$
- $f_5(E1,E1,E2,E2,E1) = 1$
- $f_5(E1,E1,E2,E2,E2) = 0$
- $f_5(E1,E2,E1,E1,E1) = 0$
- $f_5(E1,E2,E1,E1,E2) = 1$
- $f_5(E1,E2,E2,E2,E1) = 1$
- $f_5(E1,E2,E2,E2,E2) = 0$
- $f_5(E2,E1,E1,E1,E1) = 0$
- $f_5(E2,E1,E1,E1,E2) = 1$
- $f_5(E2,E1,E2,E2,E1) = 1$
- $f_5(E2,E1,E2,E2,E2) = 0$
- $f_5(E2,E2,E1,E1,E1) = 0$
- $f_5(E2,E2,E1,E1,E2) = 1$
- $f_5(E2,E2,E2,E2,E1) = 1$
- $f_5(E2,E2,E2,E2,E2) = 0$

$$F_5 = \min \{ (0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0) + 3 \} = 3$$

**Séquences optimales:**

- E1E1E1E1E1
- E1E1E2E2E2
- E1E2E1E1E1
- E1E2E2E2E2
- E2E1E1E1E1
- E2E1E2E2E2
- E2E2E1E1E1
- E2E2E2E2E2

• **K=6**

$$F_6(\beta_6) = \min \{ f_6[\chi_6(\beta_6)] + F_5(\beta_5) \}$$

- $f_6(E1,E1,E1,E1,E1,E1) = 1$
- $f_6(E1,E1,E1,E1,E1,E2) = 1$
- $f_6(E1,E1,E2,E2,E2,E1) = 0$
- $f_6(E1,E1,E2,E2,E2,E2) = 1$

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

$$\begin{aligned} f_6(E1,E2,E1,E1,E1,E1) &= 1 \\ \underline{f_6(E1,E2,E1,E1,E1,E2)} &= 0 \\ f_6(E1,E2,E2,E2,E2,E1) &= 1 \\ f_6(E1,E2,E2,E2,E2,E2) &= 1 \\ f_6(E2,E1,E1,E1,E1,E1) &= 1 \\ f_6(E2,E1,E1,E1,E1,E2) &= 1 \\ \underline{f_6(E2,E1,E2,E2,E2,E1)} &= 0 \\ f_6(E2,E1,E2,E2,E2,E2) &= 1 \\ f_6(E2,E2,E1,E1,E1,E1) &= 1 \\ \underline{f_6(E2,E2,E1,E1,E1,E2)} &= 0 \\ f_6(E2,E2,E2,E2,E2,E1) &= 1 \\ f_6(E2,E2,E2,E2,E2,E2) &= 1 \end{aligned}$$

$$F_6 = \min\{(1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1)\} + 3 = 3$$

**Séquences optimales:**

E1E1E2E2E2E1  
E1E2E1E1E1E2  
E2E1E2E2E2E1  
E2E2E1E1E1E2

Ainsi, nous obtenons 4 possibilités d'ordonnancement qui permettent la minimisation du nombre de déplacements des équipes de maintenance, cependant, cette première configuration ne tient pas compte de la disponibilité et de la compétence des équipes.

**II.5.2 Deuxième configuration**

- Les deux équipes sont compétentes à 100%.
- Nous tenons compte de la durée des tâches de maintenance (disponibilité des équipes), donc l'indice de performance P représente cette fois-ci le temps global de maintenance, et la fonction  $f_i(x_i)$  devient:

**Fonction  $f(x_i)$**

*SE* //: le site où se trouve l'équipe E.  
*S* //: site de production.  
*p(i)* //: durée de la tâche i  
*si*  $SE(i-1)=S(i)$   
 $f(x_i) = p(i)$  // pas de déplacement.  
*sinon*  
 $f(x_i)=1+p(i)$  // il y a un déplacement  
*Finsi*

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

• **K=1**

$$F_1(\beta_1) = \min \{ f_1[x_1(\beta_1)] \}$$

$$\begin{aligned} \underline{f_1(E1)} &= 1+p(1) = 1+3=4 \\ \underline{f_1(E2)} &= 1+p(1) = 1+3=4 \end{aligned}$$

$$F_1 = \min(4,4) = 4 \text{ (unités de temps)}$$

**Séquences optimales:**

E1.

E2.

• **K=2**

$$F_2(\beta_2) = \min \{ f_2[x_2(\beta_2)] + F_1(\beta_1) \}$$

$$\begin{aligned} f_2(E1,E1) &= 1+8 \\ \underline{f_2(E1,E2)} &= 1+8 \\ \underline{f_2(E2,E1)} &= 1+8 \\ f_2(E2,E2) &= 1+8 \end{aligned}$$

$$F_2 = \min(1+8+3, 1+8+0, 1+8+0, 1+8+3) = 9$$

**Séquences optimales:**

E1E2.

E2E1.

• **K=3**

$$F_3(\beta_3) = \min \{ f_3[x_3(\beta_3)] + F_2(\beta_2) \}$$

$$\begin{aligned} \underline{f_3(E1, E2, E1)} &= 1+5 \\ f_3(E1, E2, E2) &= 1+5 \\ f_3(E2, E1, E1) &= 1+5 \\ \underline{f_3(E1, E1, E2)} &= 1+5 \end{aligned}$$

$$F_3 = \min(1+5+4, 1+5+9, 1+5+9, 1+5+4) = 10$$

**Séquences optimales:**

E1E2E1

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

E2E1E2

• **K=4**

$$F_4(\beta_4) = \min \{ f_4[\chi_4(\beta_4)] + F_3(\beta_3) \}$$

$$\underline{f_4(E1, E2, E1, E1)} = 0+2$$

$$\underline{f_4(E1, E2, E1, E2)} = 1+2$$

$$\underline{f_4(E2, E1, E2, E1)} = 1+2$$

$$\underline{f_4(E2, E1, E2, E2)} = 0+2$$

$$F_4 = \min(0+2+10, 1+2+9, 1+2+9, 0+2+10) = 12$$

**Séquences optimales:**

E1E2E1E1

E1E2E1E2

E2E1E2E1

E2E1E2E2

• **K=5**

$$F_5(\beta_5) = \min \{ f_5[\chi_5(\beta_5)] + F_4(\beta_4) \}$$

$$f_5(E1, E2, E1, E1, E1) = 0+6$$

$$\underline{f_5(E1, E2, E1, E1, E2)} = 1+6$$

$$f_5(E1, E2, E1, E2, E1) = 1+6$$

$$f_5(E1, E2, E1, E2, E2) = 0+6$$

$$f_5(E2, E1, E2, E1, E1) = 0+6$$

$$f_5(E2, E1, E2, E1, E2) = 1+6$$

$$\underline{f_5(E2, E1, E2, E2, E1)} = 1+6$$

$$f_5(E2, E1, E2, E2, E2) = 0+6$$

$$F_5 = \min(0+6+12, 1+6+9, 1+6+10, 0+6+12, 0+6+12, 1+6+10, 1+6+9, 0+6+12) \\ = 16$$

**Séquences optimales :**

E1E2E1E1E2

E2E1E2E2E1



Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

- **K=6**

$$F_6(\beta_6) = \min \{ f_6[\chi_6(\beta_6)] + F_5(\beta_5) \}$$

$$\begin{aligned} \underline{f_6(E1,E2,E1,E1,E2,E1)} &= 1+7 \\ \underline{f_6(E1,E2,E1,E1,E2,E2)} &= 1+7 \\ \underline{f_6(E2,E1,E2,E2,E1,E1)} &= 1+7 \\ \underline{f_6(E2,E1,E2,E2,E1,E2)} &= 1+7 \end{aligned}$$

$$F_6 = \min(1+7+12, 1+7+16, 1+7+16, 1+7+12) = 20$$

**Séquences optimales:**

E1E2E1E1E2E1

E2E1E2E2E1E2

Deux possibilités optimales d'ordonnancement nous sont offertes, par contre, elles ne tiennent pas compte de la compétence des équipes.

**III.5.3 Troisième configuration**

On tiendra compte de toutes les contraintes décrites dans le cahier des charges:

- Les compétences des équipes sont données dans le tableau 3.2
- Nous tenons compte de la durée des tâches de maintenance (disponibilité des équipes).

Puisque les cinq premières tâches de maintenance requièrent des compétences inférieures à 75%, (voir tableau III.2), on se retrouve au cas de la deuxième configuration pour les étapes K=1...5.

- **K=6**

La tâche 6 requière une compétence de 85%, d'où, l'équipe E1 ne peut exécuter cette tâche, celle-ci sera exécutée par l'équipe E2.

$$F_6(\beta_6) = \min \{ f_6[\chi_6(\beta_6)] + F_5(\beta_5) \}$$

$$\begin{aligned} \underline{f_6(E1,E2,E1,E1,E2,E2)} &= 1+7 \\ \underline{f_6(E2,E1,E2,E2,E1,E2)} &= 1+7 \end{aligned}$$

$$Durée_6 = \min(1+7+16, 1+7+12) = 20$$

**Séquences optimales:**

E2E1E2E2E1E2

Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application

Ainsi, nous obtenons le meilleur ordonnancement, qui permet de réduire le coût de maintenance, et de satisfaire les critères de disponibilité et de compétence.

**III.6 Résultats**

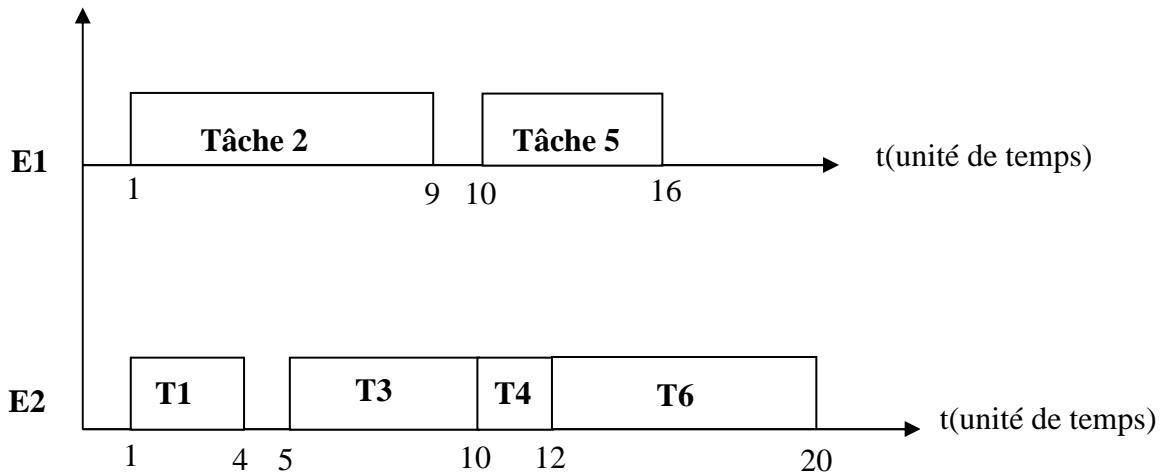
Séquences de tâches optimales:

- Equipe 1: **tâche 2, tâche 5.**
- Equipe 2: **tâche 1, tâche 3, tâche 4, tâche 6.**

**Dates optimales d'intervention:**

En supposant qu'il n'y a pas de temps d'attente entre les tâches, les dates optimales sont représentées dans le tableau ci-dessous:

<b>K →</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Dates optimales (unité de temps)</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>12</b>



**Figure III.4. : Dates optimales**

Et le coût global de maintenance (CGM) est calculé à partir de l'équation (III.3).

$$CGM = \sum C_{out_i} + \sum C_{depl_i}$$

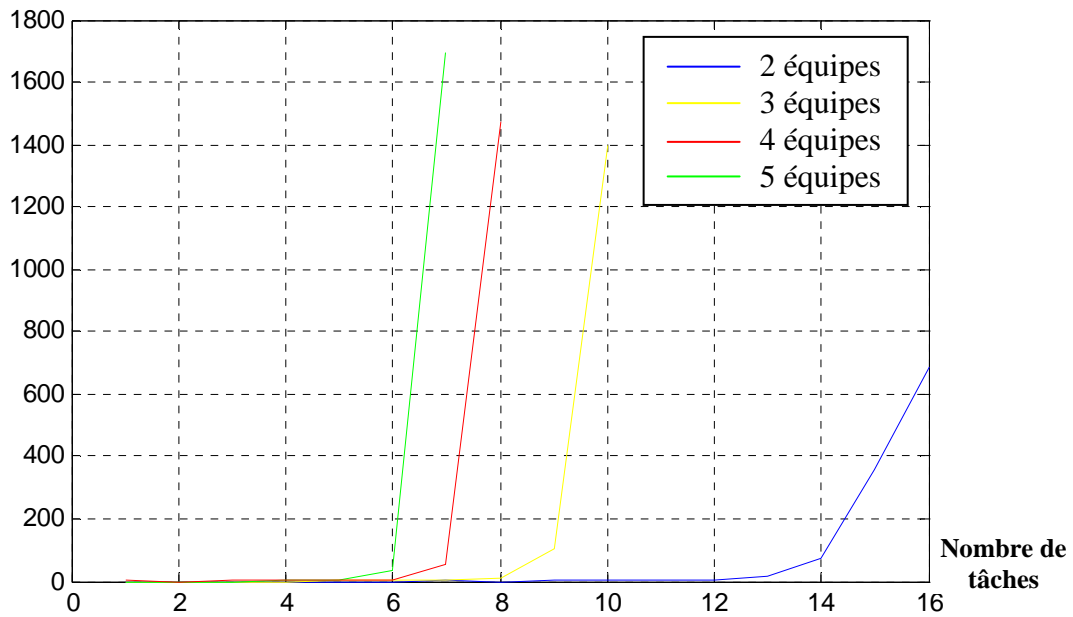
$$CGM = 1402\$$$

### III.7 Analyse de l'algorithme

Afin d'étudier l'impact du nombre de tâches sur le temps d'exécution de l'approche, Nous avons testé l'algorithme pour différentes valeurs du nombre de tâches.

Le graphique ci-dessous, traduit l'évolution du temps d'exécution de la méthode, en fonction du nombre de tâche de maintenance.

Temps de calcul (S)



**Figure III.4. Evolution du temps d'exécution de l'algorithme en fonction du nombre de tâches**

*Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application*

		<b>2 équipes</b>	<b>3 équipes</b>	<b>4 équipes</b>	<b>5 équipes</b>
Temps de calcul pour:	2 tâches	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	0,05
	3 tâches	$10^{-3}$	$10^{-3}$	0,1	0,2
	4 tâches	$10^{-3}$	0,05	0,2	0,3
	5 tâches	$10^{-3}$	0,1	0,5	1,1
	6 tâches	0,05	0,2	6,5	26,6
	7 tâches	0,08	0,5	31	1685
	8 tâches	0,1	7,2	1490	--
	9 tâches	0,12	112	--	--
	10 tâches	0,2	1400	--	--
	11 tâches	0,5	--	--	--
	12 tâches	2,4	--	--	--
	13 tâches	12	--	--	--
	14 tâches	85	--	--	--
	15 tâches	398	--	--	--
	16 tâches	682	--	--	--

**Tableau III-3.temps de calcul (seconde)**

Comme le montre le graphe, le temps d'exécution du programme évolue lentement en fonction du nombre de tâche de maintenance.

A partir d'une certaine valeur ( $T=14$  pour 2 équipes), le temps de calcul devient considérable, cela est justifié par le fait que le nombre de combinaison à estimer devient à ce moment très important.

### **III.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une problématique générale portant sur l'affectation du personnel pour la réalisation d'un ensemble de tâches de maintenance, dont le but global est la minimisation du coût de la maintenance.

Nous avons tout d'abord présenté quelques définitions portant sur la gestion des ressources humaines, ensuite nous avons donné le modèle mathématique de la problématique, puis nous avons exposé un bref état de l'art des méthodes de résolution dans ce domaine.

La programmation dynamique est souvent employée pour résoudre des problèmes d'optimisation satisfaisant le principe d'optimalité.

C'est une méthode ascendante : On commence d'habitude par les sous problèmes les plus petits et on remonte vers les sous problèmes de plus en plus difficiles.

### *Ordonnancement des activités de maintenance dans un contexte distribué; application*

Dans une séquence optimale (de décisions ou de choix), chaque sous-séquence doit aussi être optimale.

Cette méthode a été adoptée pour résoudre notre problématique.

Nous avons proposé un exemple d'un réseau de maintenance composé d'un centre expert, 3 sites de production, 2 équipes, et 6 tâches de maintenance.

La méthodologie adoptée nous a permis d'obtenir le meilleur ordonnancement possible des tâches de maintenance permettant de réduire le déplacement des équipes de maintenance, et cela, dans le but de minimiser le coût global de maintenance; par contre le temps de calcul devient considérable lorsque le nombre de tâches augmente (au-delà de 20 tâches).

## *Conclusion générale*

Nous avons abordé dans ce mémoire un ensemble de problématiques qui porte sur la conception de systèmes de maintenance dans une entreprise. Nous avons recensé en se basant sur la littérature les études élaborées sur les systèmes de maintenance, leur implantation et leur diagnostique.

Il découle de cette revue de la littérature que maintenir un système de production n'est pas une tâche facile. Ceci exige, entre autres, des ressources humaines compétentes et des outils et du matériel adaptés aux équipements et aux installations à maintenir, un système efficace de gestion des pièces de rechange et un système d'information bien pensé.

Nous avons étudié la gestion de la ressource humaine qui est une des plus importantes ressources dans une entreprise, nous avons traité le problème d'ordonnement de ressources dans les systèmes de maintenance.

La méthode de la programmation dynamique a été adoptée pour résoudre notre problématique, elle a été validée sur un réseau de maintenance composé d'un centre expert, trois sites de production, deux équipes de maintenances, six tâches de maintenance; afin de simplifier l'étude, nous avons opté pour une démarche progressive en terme de difficulté, pour se faire, nous avons étudié les trois cas de figure suivants:

- Première configuration: elle consistait à résoudre le problème sans prise en compte de la disponibilité ni de la compétence des équipes.
- Deuxième configuration: elle consistait à résoudre le problème sans prise en compte de la compétence des équipes.
- Troisième configuration: elle consistait à résoudre le problème selon le cahier de charge établis (c.à.d) avec la prise en compte de toutes les contraintes.

L'algorithme établis nous a permis d'obtenir le meilleur ordonnancement possible des tâches de maintenance, permettant ainsi de réduire le déplacement des équipes de maintenance, et de minimiser le coût global de maintenance; par contre le temps de calcul devient considérable lorsque le nombre de tâche augmente (au de la de 20 tâches).

---

### *Conclusion générale*

Enfin, Cette recherche a permis d'ouvrir d'autres pistes, et plusieurs extensions restent possibles à ce travail. En effet, il serait envisageable de définir des équipes compétentes dans différents domaines (ex: électrique, mécanique,...), il serait également intéressant d'introduire le partage des ressources entre les équipes de maintenance, au niveau d'outil de communications, ainsi qu'au niveau d'outils de maintenance.

***Bibliographie***

- [1] Abdul-Razak T;Potts C;1988,"Dynamic programming state-space relation for single-machine scheduling", J.Opnl.Res.Soc,vol39,pp.141-152
- [2] Afnor, "Guides de l'utilisateur : Contrats de maintenance", 2e édition, 1988, AFNOR.
- [3] Andersen T .M., Rasmussen M, "Decision support in a condition based environment", Journal of Quality in maintenance, Vol. 5, No. 2, pp. 89-101, 1999.
- [4] Ansoff I, "La stratégie de développement de l'entreprise", Éditions Hommes et techniques, Paris, France, 1986.
- [5] Balas E, Lenstra J.K, Vazacopoulus A, 1993, "One machine scheduling with delayed precedence constraints", CWI Research report BS-R9304.
- [6] Bazovsky I, "Techniques avancées en fiabilité, maintenabilité, disponibilité et recherche opérationnelle associée". Conférences ADERA-AFCIQ-AFNOR, Paris (1978)
- [7] Billionnet A, (1998). "Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands", Computer & Operational research 26, pp.715-730
- [8] Chapouille P, " La fiabilité" PUF (1972).
- [9] Chapouille P, Pazzis R, "Fiabilité des systèmes". Masson (1968).
- [10] D'Amours S, "La Gestion des Opérations En réseau Massivement Maillés d'entreprises, Essai de Maîtrise en Administration des affaires", Décembre 1992, Faculté d'administration, Université Laval, Québec, Canada.
- [11] D'Amours S, Montreuil B, Soumis B, "Price-Based Scheduling of distributed Operations in Symbiotic Manufacturing Networks", European Journal of Operational Research, pp. 148-166, 1996.
- [12] D'Amours S., Boucher S, Jabiri A, Levasseur M, Tremblay D. M. P, Montreuil B. et Poulin D. "Les meilleures pratiques d'évaluation et de sélection des fournisseurs", Rapport interne, Centre de recherche sur les technologies de l'entreprise réseau, Université Laval, Québec, Canada, 2000.
- [13] Davis J,Kanet J, 1993, "Single machine scheduling with early and tardy completion costs", Naval Research Logistics, vol. 40, pp. 85-101.
- [14] Finta L, Liu Z, 1994, "Single machine scheduling subject to precedence delays", INRIA Rapport de recherche 2198.
- [15] Foucher R, "Contribution à l'intégration des aspects humains dans la modélisation des systèmes de fabrication: vers une gestion conjointe des ressources humaines et de la production". Thèse de Doctorat de l'université de valenciennes, décembre2000.
- [16] Fry T.D, Armstrong R.D, Blackstone J.H, 1987, "Minimizing weighted absolute deviation in single machine scheduling", IIE transactions, vol.19, no.4.



- [17] Fry T, Darby-Dowman K, Armstrong R, 1989, "Single machine scheduling to minimize mean absolute lateness", Computers and Operations Research.
- [18] Gagne C, Price W.L, Gravel M, 2001, "Scheduling a single machine with sequence dependent setup time using ant colony optimization", Faculté des sciences de l'administration, l'Université Laval.
- [19] Garey M, Tarjan R, Wilfong G, 1988, "One-processor scheduling with symmetric earliness and tardiness penalties", Math Opns Res., vol13, pp.330-348.
- [20] Gits A.M "Maintenance concept and control, maintenance & logistics: Toward integrated control", Eindhoven University of Technology, 1991, pp. 181-215.
- [21] Hung R, (1994). "Single shift off-day scheduling of a hierarchical workforce with variable demands", European journal of Operational research Vol.78, pp.49-57
- [22] Ibaraki T, Nakamura Y, 1994, "A dynamic programming method for single machine scheduling", European J.of Opnl.Res; vol. 76; pp. 72-84
- [22] Kaffel H, "La maintenance distribuée : concept, évaluation, et mise en œuvre", Université Laval, Québec (2001).
- [23] Kaufmann A, "La Confiance technique : théorie mathématique de la fiabilité". Dunod(1969)
- [24] Kher H.V (2000). "Examination of worker assignment and dispatching rules for managing vital customer priorities in dual resource constrained job shop environments", Computer & Operational research 27, pp.525-537
- [25] Lavina Y, "Audit de la maintenance", Les Éditions D'organisation, Paris, France, 1994.
- [26] Lavina Y, Loubère J.M, "Maintenance et Travaux Neufs, Les règles de la sous-traitance", Les Éditions D'organisation, Paris, France, 1996.
- [27] Léger J.B, Iung B, Ferro De Beca A. et Pinoteau J, "An innovative approach for new distributed maintenance system: application to hydro power plants of the REMAFEX project", Computers in Industry, Vol. 38, pp. 131–148, 1999.
- [28] Liptrot D, Palarchio G, "Utilizing advanced maintenance practices and information technology to achieve maximum equipment reliability", International Journal of Quality and Reliability Management, Vol. 17, No. 8, pp. 919-928, 2000.
- [32] Lyonnais P, "Maintenance mathématique et méthode", Troisième édition, technique et édition Lavoisier, France, 1992.
- [33] Monchy F, "Maintenance, méthodes et organisations", DUNOD, 2000.

[34] Ortiz-Hernandez T, "Les systèmes de production automatisés: une approche socio-technique", Ufr Science de Franche-Comté, Thèse de doctorat, novembre 1995.

[35] Retour D, Bouche M et Plauchu V, "Où va la maintenance industrielle, Problèmes économiques", No. 2.159, pp. 7-13, 24 Janvier 1990.

[36] Roulet V, "La Pratique de la Sous-traitance", Édition du Moniteur, 1981.

[37] Schwob M, Peyrache G. "Traité de fiabilité". Masson (1969)

[38] Sortrakul N., Nachtmann H.L, 2004, "Genetic algorithm for integrated preventive maintenance planning scheduling for a single machine", Computers In Industry, vol56, pp.161-168

[38] Vernier J.P, "La fonction maintenance, dans technique de l'ingénieur, traité génie industriel, pp. A 8 300-1, A 8 300-15, 1998.

[46] Whisterkamp T.A, "Evaluating the maintenance process", IIE solution, pp. 22-27, December 1998.