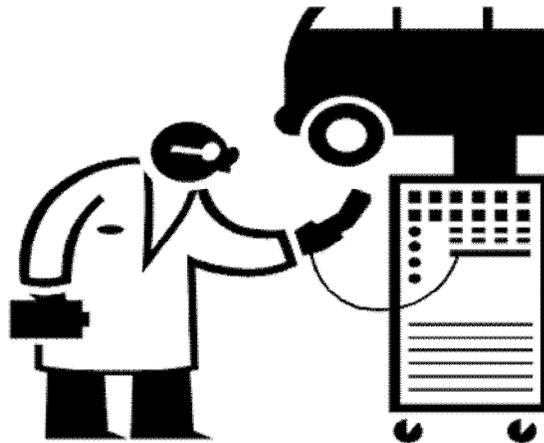




المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس  
école nationale d'ingénieurs de Tunis

# Cours de Maintenance Industrielle



3 A GI

Par Dr. Bourouni Karim

Version 1.0 : Septembre 2004



---

## Sommaire

<b>CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE</b> .....	3
<b>CHAPITRE 2 : LES CONCEPTS DE FIABILITE ET DE MAINTENANCE</b> .....	5
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	5
<b>2 LA NOTION DE FIABILITE D'UN SYSTEME</b> .....	5
<b>3 LA MAINTENABILITE ET LA MAINTENANCE</b> .....	11
3.1 LES CRITERES DE MAINTENABILITE.....	11
3.2 DEFINITION DE LA MAINTENANCE.....	11
3.3 RELATION ENTRE LA MAINTENANCE ET LA FIABILITE .....	14
<b>4 LE SYSTEME DE MAINTENANCE</b> .....	15
4.1 LES FONCTIONS ET LES TACHES ASSOCIEES A LA MAINTENANCE.....	15
4.2 LES CONDITIONS DE REUSSITE D'UN PROGRAMME DE GESTION DE LA MAINTENANCE.....	17
4.3 LES NIVEAUX DE MAINTENANCE .....	18
<b>5 LE SYSTEME DE GESTION DE LA MAINTENANCE</b> .....	19
5.1 LA PERTINENCE D'UN SYSTEME DE GESTION DE LA MAINTENANCE.....	19
5.2 PRESENTATION D'UN SYSTEME DE GESTION DE LA MAINTENANCE.....	21
5.3 LA GESTION DES FLUX D'INFORMATION.....	22
<b>6. LES APPROCHES CONTEMPORAINES</b> .....	25
6.1. LA TELE-MAINTENANCE .....	25
6.2 LA MAINTENANCE PRODUCTIVE TOTALE (TPM).....	25
6.3. LA MAINTENANCE BASEE SUR LA FIABILITE (MBF).....	26
<b>7. CONCLUSION</b> .....	27
<b>CHAPITRE 3 : LES DIFFERENTES POLITIQUES DE MAINTENANCE</b> .....	28
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	28
<b>2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE</b> .....	29
2.1 LA MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE.....	33
2.2 LA MAINTENANCE CONDITIONNELLE ET PREVISIONNELLE.....	46
<b>3 LA MAINTENANCE CORRECTIVE</b> .....	53
<b>4 CHOIX D'UNE POLITIQUE DE MAINTENANCE OPTIMISEE</b> .....	55
4.1. LES CRITERES D'OPTIMISATION.....	57
4.2. POLITIQUE DE CHANGEMENT ET CRITERES : .....	57
4.3. ETUDE DE CAS : .....	58
<b>CHAPITRE 4 : LES OUTILS DE LA MAINTENANCE</b> .....	60
<b>CHAPITRE 5 : LES FONCTIONS DE LA MAINTENANCE</b> .....	61
<b>1 LA FONCTION METHODES MAINTENANCE</b> .....	61
1.1 ROLE DU SERVICE METHODES-MAINTENANCE.....	61
1.2. L'ANALYSE DES TEMPS DE MAINTENANCE.....	63
1.3. ANALYSE DES COUTS DE LA MAINTENANCE .....	71
1.4. LA PREPARATION DES ACTIONS DE MAINTENANCE CORRECTIVE .....	78
<b>2. LES FONCTIONS ORDONNACEMENT, LOGISTIQUE ET REALISATION</b> .....	81
2.1. LE ROLE DE L'ORDONNACEMENT EN MAINTENANCE .....	81

2.2. TERMINOLOGIE DE L'ORDONNANCEMENT .....	82
<b>CHAPITRE 6 : GESTION DES OPERATIONS DE MAINTENANCE.....</b>	<b>84</b>
1. INTRODUCTION .....	84
2. CHOIX DE LA METHODE D'APPROVISIONNEMENT ECONOMIQUE .....	84
2.1. NECESSITE D'UNE GESTION SELECTIVE.....	86
2.2. APPLICATION DE LA METHODE.....	86
2.3.METHODE DE CALCUL [7].....	87
<b>CHAPITRE 7 : LA GESTION DE LA MAINTENANCE ASSISTEE PAR ORDINATEUR.....</b>	<b>90</b>
1. DEFINITION .....	90
2. INTERET DE LA MAO .....	90
3. ELABORATION D'UN PLAN MAO .....	91
4. INVENTAIRE DES LOGICIELS DE MAO .....	92
5. SYSTEME EXPERT .....	93
5.1. GENERALITES.....	93
5.2. SYSTEME EXPERT ET MAINTENANCE.....	93
5.3. ARCHITECTURE D'UN SYSTEME EXPERT .....	93
5.4. LOGICIEL D'AIDE A LA DECISION EN MATIERE DE POLITIQUE DE MAINTENANCE OU CONCEPTS DU LOGICIEL «PREVENT».....	97
6. CONDUITE D'UN PROJET GMAO .....	99
6.1 REALISATION DU CAHIER DES CHARGES (SURTOUT DEFINIR LE BESOIN) .....	99
6.2 CHOIX DU LOGICIEL.....	100
6.3 MISE EN PLACE .....	100
6.4 FORMATION DU PERSONNEL .....	100
6.5 UTILISATION / EXPLOITATION DE LA GMAO; .....	100
7. CONDITIONS DE REUSSITE D'UN PROJET GMAO .....	101
8. PRESENTATION D'UN LOGICIEL DE GMAO : NEWMMAINT .....	103
8.1. QUALITES D'UN LOGICIEL DE GMAO .....	103
8.2. FONCTIONS D'UN LOGICIEL DE GMAO.....	104
<b>CHAPITRE 8 : LES INDICATEURS DE LA MAINTENANCE .....</b>	<b>111</b>
1. INTRODUCTION .....	111
2. LES DIFFERENTS INDICATEURS .....	111
2.1. LE TAUX DE RENDEMENT SYNTHETIQUE (TRS) .....	111
2.2.COUTS DE LA MAINTENANCE .....	112
2.3. PERFORMANCES DES EQUIPEMENTS [3] .....	112
2.4 L'efficacité du service maintenance [3].....	113
2.5 PRODUCTIVITE DU PERSONNEL DE MAINTENANCE.....	113
2.6 RATIOS DE MAINTENANCE NORMALISES.....	114
<b>ANNEXES : ETUDE DE CAS .....</b>	<b>122</b>

---

## CHAPITRE 1 : Introduction Générale

---

Les enjeux socio-économiques croissants, liés aux impératifs de sécurité des hommes et des matériels, aux exigences de protection de l'environnement et de réduction des nuisances et aux gains de productivité sur des systèmes de plus en plus complexes, placent les problèmes de maintenance au centre des préoccupations relatives aux systèmes de production de biens et de services. Plusieurs facteurs induisent une véritable mutation de la maintenance parmi lesquels une *complexification de l'objet maintenu et de l'outil de maintenance, étroitement liée aux nouvelles technologies*. Dans ce contexte, la maintenance et ses nouvelles formes de type prévisionnel et coopératif sont à considérer comme un *levier d'action sur la performance globale des systèmes de production dans les logiques de développement durable*.

La maintenance des systèmes industriels est devenue un point essentiel lors de leur conception et de leur exploitation, tant pour des questions de sécurité et de sûreté de fonctionnement, que pour des questions de rentabilité. Par exemple, un arrêt de production pour maintenance sur les chaînes de montage de chez Peugeot peut coûter jusqu'à un million de francs par jour. Une maintenance mal adaptée à un système peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour les personnes que pour le matériel ou l'environnement.

Ceci explique que tous les grands systèmes utilisent les technologies de la maintenance, sous les formes les plus diverses. Jusqu'à une date récente, les techniques de maintenance curative ou de maintenance préventive (aussi appelées maintenance systématique) étaient les seules pratiquées. La première n'est toutefois applicable qu'à des systèmes ne présentant pas de risques physiques en cas de dysfonctionnement, tandis que la seconde entraîne un surcoût d'exploitation non négligeable pour l'entreprise qui la pratique.

En réponse à ce problème est apparu un type de maintenance dite prédictive, ou encore conditionnelle. Ce principe consiste à mesurer simultanément plusieurs paramètres du système à surveiller, à analyser ces données pour détecter l'apparition d'une défaillance potentielle, et à réagir de la façon la plus appropriée et la plus rapide

possible en cas de problème, (ceci va de la simple signalisation d'une pièce devant être changée dans la semaine qui vient à l'arrêt brutal du système de la façon la plus sûre qu'il soit). Il est à noter qu'actuellement près de 50% des mesures ainsi effectuées sont des mesures de type vibratoire (vibrations acoustiques, mécaniques, etc.). Cette situation justifie une intense activité de recherche au niveau des capteurs adaptés à ces types de signaux, car les débouchés industriels correspondants représentent un vaste marché.

La mise en place d'un véritable système de maintenance prédictive étant très coûteuse (réalisation d'un modèle mathématique du système pour caractériser l'endommagement des pièces, réseau de capteurs pour mesure les paramètres nécessaires, calculateur dédié pour traiter les données ainsi récupérées, système de supervision effectuant l'interface avec un opérateur humain ou au pire prenant les mesures nécessaires pour arrêter le système), elle n'est utilisée que sur les grands systèmes. Néanmoins, l'émergence de nouvelles techniques de surveillance et de caractérisation de l'endommagement ainsi que de supervision, moins onéreuses et moins contraignantes, devrait permettre à terme la diffusion de cette technologie vers de très nombreuses applications industrielles (en milieu

Les orientations technologiques visent actuellement à pouvoir continuer à faire fonctionner correctement un système industriel affecté d'une ou de plusieurs pannes non critiques, jusqu'à ce que la maintenance ou le remplacement des pièces incriminées puisse être effectué. Ceci générera des gains de productivité ainsi qu'une sécurité accrue dans un grand nombre de secteurs industriels.

Les évolutions futures visent également la mise au point de capteurs plus génériques et plus précis que ceux existant actuellement, afin de faciliter leur implantation et leur gestion. L'amélioration de la capacité de réaction et de synthèse des systèmes de supervision est également à l'étude, notamment par l'emploi de systèmes experts de plus en plus évolués exploitant des bases de données relationnelles.

Ces orientations visent également à rendre accessible aux P.M.E. / P.M.I. la technologie actuelle de maintenance prédictive, car sa mise en œuvre étant longue (de 1 à 4 ans) et spécifique à chaque système, elle reste très onéreuse. Dans l'optique de réduire ses coûts d'implantation sur un système, le but visé à long terme est le développement de cette technologie sous la forme d'une "boîte à outils" directement utilisable par un simple paramétrage de ses composants.

## CHAPITRE 2: LES CONCEPTS DE FIABILITE ET DE LA MAINTENANCE

---

### 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. La complexité des mécanismes de dégradation des équipements a fait en sorte que la durée de vie de ces derniers a toujours été traitée comme une variable aléatoire. Cet état de fait a incité plusieurs entreprises à adopter des approches plutôt réactives, n'étant pas en mesure de justifier économiquement les avantages que peut procurer la mise en place d'une maintenance préventive.

L'absence de données fiables et d'outils efficaces de traitement de ces données a réduit la fonction maintenance à des tâches de dépannage, et par le fait même, à une fonction dont les coûts ne cessent d'augmenter et dont la contribution à la performance de l'entreprise n'est pas évidente. Les responsables des services de maintenance dans les entreprises ne sont pas toujours en mesure de défendre rigoureusement leur budget d'opération et encore moins leur contribution à l'efficacité de l'entreprise. En plus de ces lacunes, les petites et moyennes entreprises manquent souvent de ressources pour mettre en place des systèmes efficaces de gestion de la maintenance.

Dans ce chapitre, nous rappellerons certains concepts de fiabilité et de maintenance, non seulement pour introduire certaines définitions, mais également pour mettre en évidence l'ampleur de l'effort nécessaire pour mettre en place un système de maintenance.

### 2 LA NOTION DE FIABILITE D'UN SYSTEME

Un système peut être défini comme un ensemble de composants interdépendants, connus pour réaliser une fonction donnée, dans des conditions données et dans un

intervalle de temps donné. Pour chaque système, il importe de définir clairement les éléments qui le caractérisent, à savoir: la fonction, la structure, les conditions de fonctionnement, les conditions d'exploitation et l'environnement dans lequel il est appelé à opérer.

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 (AFNOR [1]). C'est donc une grandeur comprise entre 0 et 1. Nous la désignons, dans ce qui suit par  $R(t)$  où  $t$  désigne la durée de la mission (équation 2.1).

$$R(t) = P(\text{durée de vie du système} > t) \quad (2.1)$$

Rappelons que la durée de vie d'un système est une mesure de la quantité de service rendu. Selon le système étudié, elle s'exprime en termes de temps, de kilomètres, d'heures de fonctionnement ou autre.

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  $t + dt$  (équation 2.2), ou encore la probabilité qu'il tombe en panne entre  $t$  et  $t + dt$  (figure 2.1).

$$f(t).dt = P(t < \text{durée de vie du système} < t+dt) \quad (2.2)$$

Il va sans dire que :

$$\int_0^{\infty} f(t).dt = 1 \quad (2.3)$$

Il est souvent difficile de caractériser la défaillance d'un système. 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. Pour certains systèmes, nous parlons de défaillance lorsque les grandeurs caractéristiques évoluent en dehors de certaines limites de fonctionnement établies auparavant. Cette seconde définition sera exploitée lorsque nous introduisons les concepts de maintenance conditionnelle. 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  $t$  (équation 2.4).

$$F(t) = P(\text{durée de vie du système} \geq t) \quad (2.4)$$

Nous supposons qu'en tout temps, le système est soit «en opération» ou «hors d'usage», il s'ensuit que :

$$\text{Pour tout } t, R(t)+F(t) = 1 \quad (2.5)$$

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

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x).dx \quad (2.6)$$

$$F(t) = \int_0^t f(x).dx \quad (2.7)$$

De même :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (2.8)$$

Ou encore :

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (2.9)$$

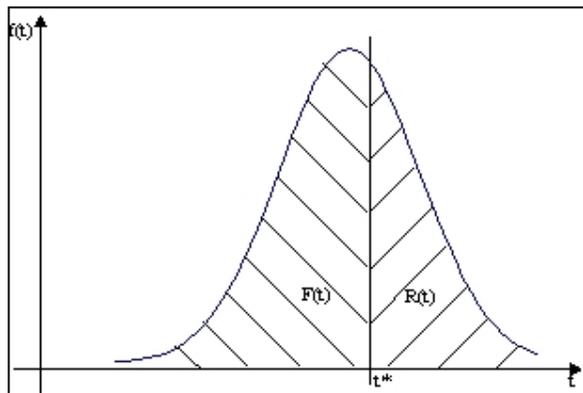


Figure 2.1. La fonction densité de durée de vie

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 que l'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 2.10). Il représente également la vitesse d'arrivée de la panne (Monchy [2]).

$$\lambda(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t)\Delta t} \quad (2.10)$$

Avec :

$N(t)$  : 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 « en baignoire » qui est divisée en 3 parties (figure 2.2) : la première est appelée période de mortalité infantile ou le taux de panne est en décroissance ce

qui correspond aussi au 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.

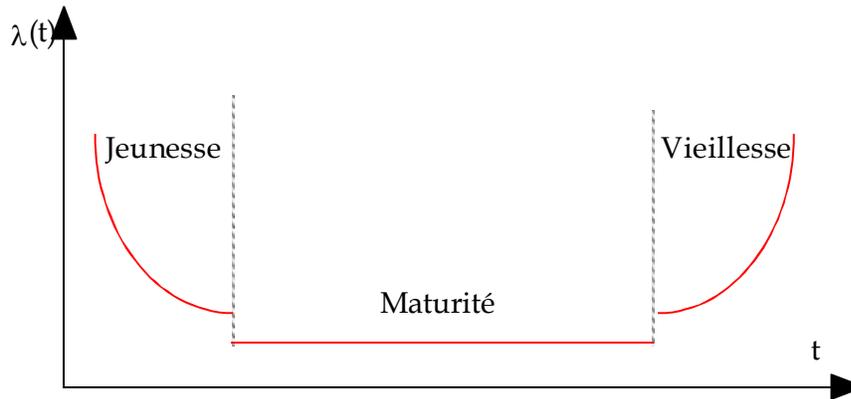


Figure 2. 2 : La courbe en baignoire.

Il importe de rappeler que la fiabilité est une fonction décroissante de l'usage fait de l'équipement. Elle est reliée au taux de panne  $\lambda(t)$  par la relation suivante :

$$R(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(x)dx\right) \quad (2.11)$$

Où  $t$  est la durée de la mission considérée.

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 2.3). 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 2.3). L'expression du MTBF est donnée par l'équation 2.12. 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 2.3) et une fraction de temps nécessaire à la détection de la panne et à la remise en route du composant.

La durée moyenne entre deux défaillances (MTBF) correspond à l'espérance mathématique de la variable aléatoire  $T$ . Son expression est donnée par l'équation 2.12.

$$MTBF = \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (2.12)$$

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 2.13 (Ait-Kadi [3]).

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.13)$$

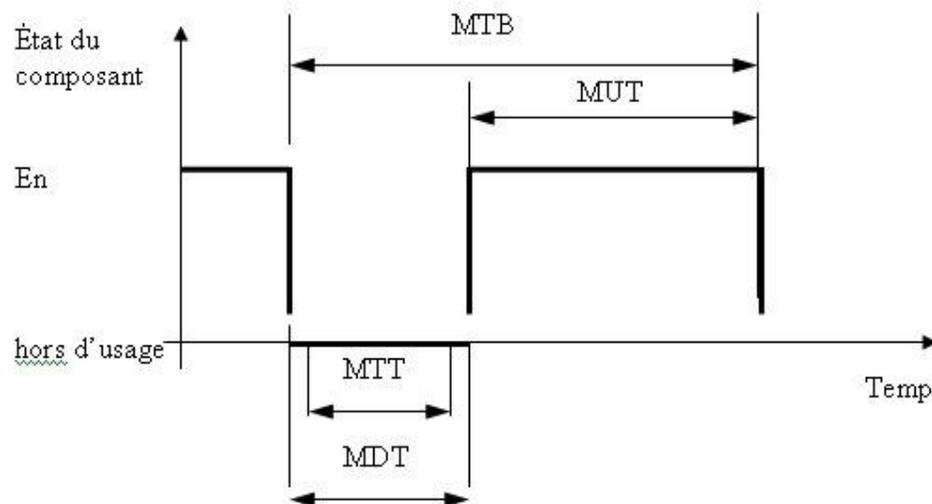


Figure 2.3 : La présentation des différentes grandeurs en fonction du temps \*

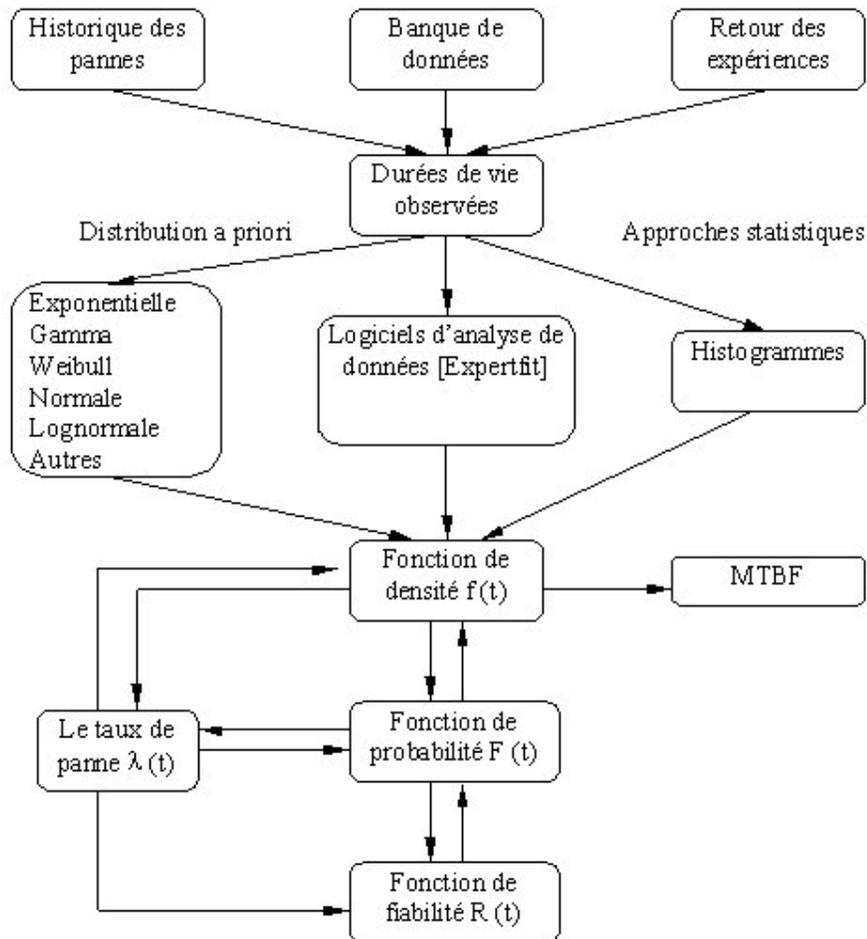
D'un point de vue pratique, la figure 2.4 présente un schéma global de détermination des caractéristiques de la fiabilité opérationnelle d'un composant à partir d'une banque de données, de l'historique des pannes ou du retour des expériences. Ces données nous permettent de déterminer la durée de vie observée et de déduire les différentes caractéristiques telles que le taux de panne, la fiabilité, la défaillance, etc.

Pour mettre en place une politique de maintenance adéquate, il est important de comprendre les phénomènes de défaillance et de dégradation des composants. Il existe deux types de défaillances : la défaillance catalectique complète et soudaine et la défaillance par dérive. Cette dernière est due à un phénomène d'usure (Monchy [2]).

La norme AFNOR [1] définit la défaillance comme une altération ou une cessation d'un bien à accomplir une fonction requise.

L'analyse de la défaillance est faite non seulement dans le but de réparer ou dépanner un système défaillant, mais également de chercher à éviter la réapparition du défaut. Une expertise doit permettre, à l'issue d'une défaillance d'un équipement, de déterminer les causes qui peuvent être soit un processus intrinsèque ou une imputation

externe (accident ou mauvaise utilisation) (Monchy [2]). Elle doit aussi permettre d'identifier la nature de la défaillance, de la détecter, d'en déduire les conséquences, d'en déterminer l'amplitude et finalement, de comprendre le processus de manifestation qui est caractérisé par la vitesse de propagation ou le caractère.



**Figure 2.4:** La détermination expérimentale des différentes caractéristiques d'un composant

Les principaux modes de défaillances sont divisés dans les trois catégories suivantes :

- la santé - matière : il s'agit de défauts préexistants dans les pièces en service. Il apparaît suite à un défaut soit lors de l'élaboration de la matière, soit lors de l'élaboration de la pièce finie, ou lors du montage;
- les modes de défaillances mécaniques en fonctionnement : il s'agit de plusieurs types de défaillances mécaniques. Elles apparaissent suite à un choc, à une surcharge, à une fatigue mécanique ou thermique, à un fluage, à l'usure, à l'abrasion, à l'érosion ou à la corrosion;
- les modes de défaillances électriques : ces défaillances surgissent suite à la rupture

---

d'une liaison électrique, au collage, à l'usure de contact ou au claquage d'un composant.

Pour remédier à ces défaillances, les concepts de maintenance et de maintenabilité ont vu le jour. Comme le mentionne Monchy [2], les défaillances sont à la maintenance ce que les maladies sont à la médecine : leur raison d'exister.

### 3 LA MAINTENABILITE ET LA MAINTENANCE

#### 3.1 Les critères de maintenabilité.

Les normes NF X 60-300 et X 60-301 spécifient cinq types de critères de maintenabilité. Le premier critère est relatif à la surveillance de la maintenance préventive. Il est important de connaître à ce niveau l'accessibilité de la composante, sa démontabilité et son interchangeabilité. Le deuxième est relatif à la maintenance corrective, plus particulièrement, le temps de recherche de panne ou de défaillance et le temps de diagnostic. Le troisième critère est relatif à l'organisation de la maintenance, pris en compte par la périodicité du préventif, le regroupement à des périodes identiques, l'homogénéité de la fiabilité des composants, la présence d'indicateurs et de compteurs et la complexité des interventions. L'avant-dernier critère est lié à la qualité de la documentation technique. Celui-ci comporte la valeur du contenu, la disponibilité de la documentation, le mode de transmission et les principes généraux de rédaction et de présentation de la documentation technique. Le dernier critère de maintenabilité est lié au suivi du bien par le fabricant. Il sera question de l'évolution du fabricant, de la qualité du service après-vente et de l'obtention des pièces de rechange.

#### 3.2 Définition de la maintenance.

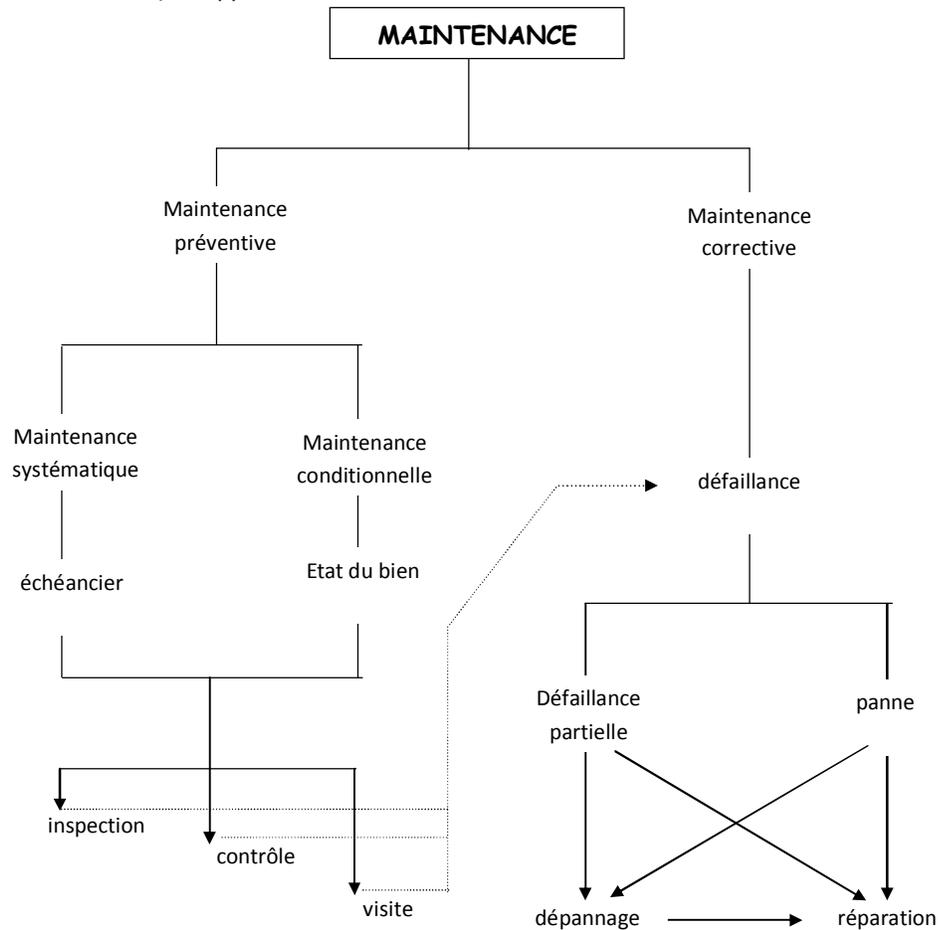
Les normes NF X 60-010 et 60 011 définissent la maintenance comme l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé.

Retour et *al.* [4] 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 2. 5).



**Figure 2.5:** Le contenu de la fonction maintenance (Retour et al. [4])

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive. Le deuxième fait référence à l'aspect correctif (voir figure 2. 6). Nous présentons dans les paragraphes qui suivent les définitions de chaque type de maintenance.



**Figure 2.6 :** Les différents types de maintenance.

---

La maintenance corrective est définie comme une maintenance effectuée après défaillance (AFNOR X 60-010 [1]). 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 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 [1]). 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 [1]). 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.

Il existe aussi un troisième concept qui consiste à se débarrasser définitivement des défaillances : c'est la **maintenance améliorative**. Elle nécessite une réflexion pour :

- Déterminer les causes réelles du problème
- Envisager les remèdes adaptés à leur suppression.

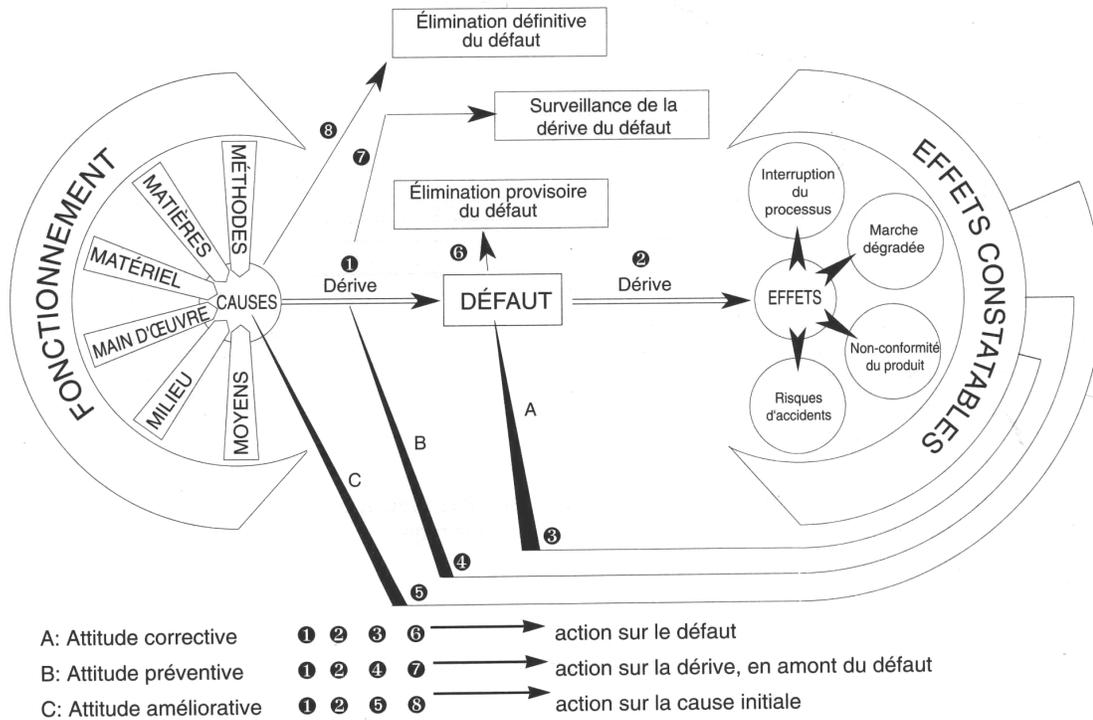


Figure 2.7: Les différentes options de la maintenance

### 3.3 Relation entre la maintenance et la fiabilité

La figure 2.8 présente la contribution des différents types de maintenance en ce qui concerne la fonction de fiabilité  $R(t)$  et la durée de vie utile de l'équipement.

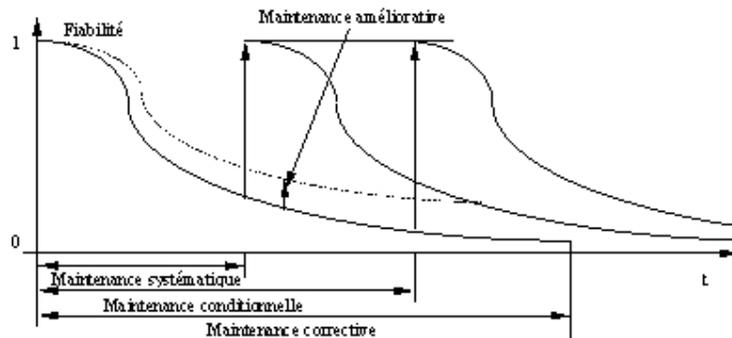


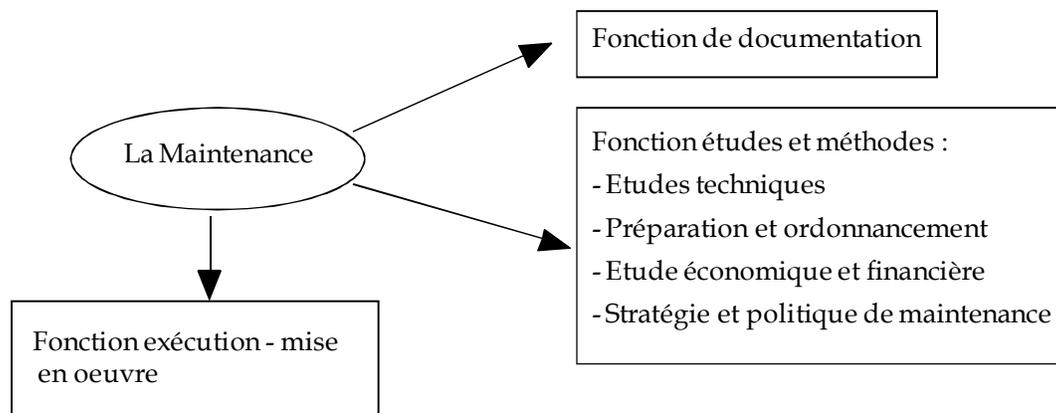
Figure 2.8: l'impact de la maintenance sur la fiabilité des équipements.

Il va sans dire qu'une réduction du taux de panne  $\lambda(t)$  entraîne une amélioration de la fonction de fiabilité  $R(t)$ . C'est dans cette optique que la maintenance améliorative a été instaurée. La maintenance préventive, avec toutes ses variantes, va en revanche tenter de ramener le taux de panne à son niveau le plus bas en remplaçant la composante utilisée sans améliorer les caractéristiques intrinsèques de l'équipement.

## 4 LE SYSTEME DE MAINTENANCE

### 4.1 Les fonctions et les tâches associées à la maintenance

Après avoir présenté quelques définitions de la maintenance et de ses différents types, nous situons dans ce qui suit la maintenance par rapport au processus de production. Ainsi, nous présentons les fonctions et les tâches associées à la maintenance. Nous identifions trois fonctions associées à la gestion de la maintenance (figure 2. 9). Ces tâches associées à chacune de ces fonctions, bien que différentes dans leurs descriptions, sont complémentaires dans leurs finalités.



**Figure 2.9:** Les fonctions et les tâches associées à la maintenance

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.

La première tâche, relative à l'étude technique, consiste à :

- rechercher des améliorations dans le système de production susceptibles d'apporter la valeur ajoutée recherchée;
- participer à la conception des travaux neufs tout en tenant compte de l'aspect maintenance de l'appareil de production;
- participer à l'analyse des accidents de travail pour essayer d'y remédier en apportant des consignes de sécurité dans un premier lieu, et des actions de maintenance corrective et préventive dans un second lieu.

La deuxième tâche, relative à la préparation et l'ordonnancement, 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 (la politique de gestion du stock étant dépendante de celle de l'entreprise) ;
- recevoir et classer les documents relatifs à l'intervention.

La troisième tâche, relative à l'étude économique et financière, comporte plusieurs étapes telles que :

- gérer les approvisionnements pour optimiser la gestion des matières premières nécessaires au processus de production;
- analyser les coûts de maintenance, de défaillance et de fonctionnement, ce qui aura un impact direct sur la politique de maintenance choisie par l'entreprise manufacturière et aussi sur le coût de production;
- 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 des machines.

En se fondant sur l'étude économique et financière, l'entreprise doit :

- choisir des procédures de maintenance corrective, préventive conditionnelle et préventive systématique;
- déterminer des domaines d'actions préventives prioritaires;
- étudier les procédures de déclenchement des interventions;
- élaborer et choisir les procédures de contrôle;
- élaborer et choisir les procédures d'essai et de réception des nouveaux équipements pour assurer l'existence des différents éléments nécessaires à la maintenance;
- assurer la sécurité dans l'organisation pour faire régner un climat de confiance.

Pour remplir la fonction étude et méthode avec toutes ses composantes telles que citées ci-dessus, le personnel doit disposer des dossiers techniques résumant les caractéristiques techniques des machines et des pièces d'usure; des fiches d'historique résumant les opérations déjà effectuées, en d'autres termes, le comportement de la machine; de la documentation du fournisseur constamment mise à jour et résumant l'évolution des techniques et des banques de données (éventuellement).

Pour la fonction exécution - mise en œuvre, une expérience considérable sur le matériel des entreprises modernes et une connaissance approfondie des différentes technologies sont nécessaires.

Les principales tâches pour remplir cette fonction sont les suivantes :

- installer les machines et le matériel (réception, contrôle, etc.);
- informer le personnel sur la façon d'utiliser les équipements et faire la mise à niveau;

- 
- 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 (les pièces de rechange, l'outillage, etc.).

Le troisième type de fonction, à savoir la documentation, est complémentaire aux deux autres. Ses principales tâches consistent à :

- établir et mettre à jour l'inventaire du matériel et des installations ;
- constituer et compléter les dossiers techniques, historiques et économiques ainsi que le dossier des fournisseurs;
- constituer et compléter une documentation générale (technique, scientifique, d'hygiène et de sécurité).

Le système de maintenance ainsi situé 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 dans une entreprise. Nous présentons dans ce qui suit les autres conditions de réussite.

#### **4.2 Les conditions de réussite d'un programme de gestion de la maintenance**

Un programme de gestion de la maintenance ne peut atteindre les résultats voulus sans la préparation du terrain et sans l'implication du personnel. Ces deux conditions sont importantes pour la réussite d'un système de gestion de la maintenance. Il faudra également ajouter d'autres conditions pour la réussite de l'implantation du système :

- se définir un objectif fixe : cet objectif va permettre de tracer les lignes directrices de la politique de maintenance. Il dépend énormément de la mission de l'entreprise. Prenons, par exemple, une entreprise hôtelière qui cherche le confort de son client. Celle-ci ne peut pas avoir le même département de maintenance qu'une entreprise minière qui cherche à diminuer le prix de revient par kilogramme de minerai;
- 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 pertinentes. Ces données seront utilisées dans le système de gestion de la maintenance;
- 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.

Nous citons dans ce qui suit quelques objectifs que doivent se fixer les entreprises manufacturières. Il faut cependant rappeler que ces objectifs sont étroitement liés à la mission de l'entreprise :

- la limitation du nombre d'interruptions de service et la réduction des durées de pannes accidentelles;
- le maintien des équipements en bon état pour opérer en toute sécurité;
- la maximisation de l'efficacité de l'équipement;
- la minimisation des coûts d'opération;
- le maintien d'un niveau de qualité élevé du travail effectué par le service de maintenance pour, entre autres, améliorer la qualité des produits et allonger la durée de vie des équipements.

**L'objectif visé est de réduire l'inventaire de pièces de rechange, d'accroître la capacité de production, ainsi que le profit global de l'entreprise.**

### 4.3 Les niveaux de maintenance

Une autre condition pour réussir un système de maintenance serait de spécifier les niveaux de maintenance dans l'entreprise. Monchy [2] et Nakajima [5, 6] présentent cinq niveaux. Ceux-ci font référence à la complexité des tâches à effectuer et aux ressources humaines et matérielles nécessaires à la réalisation de chacune des tâches:

**1<sup>er</sup> niveau** : réglage simple prévu par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun montage d'équipement ou échange d'équipements accessibles en toute sécurité.

**2<sup>ème</sup> niveau** : dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet ou d'opérations mineures de maintenance préventive.

**3<sup>ème</sup> niveau** : identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.

**4<sup>ème</sup> niveau** : travaux importants de maintenance corrective ou préventive.

**5<sup>ème</sup> niveau** : travaux de rénovation, de reconstruction ou réparations importantes confiées à un atelier central.

Les ressources nécessaires pour chaque niveau sont illustrées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

Niveaux	Personnel d'intervention	Moyens
1 <sup>er</sup>	Exploitant sur place	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2 <sup>ème</sup>	Technicien habilité sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation, plus pièces de rechange trouvées à proximité, sans délai.
3 <sup>ème</sup>	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, contrôle, etc.
4 <sup>ème</sup>	équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essai, de contrôle, etc.
5 <sup>ème</sup>	équipe complète, polyvalente en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur.

## 5 LE SYSTEME DE GESTION DE LA MAINTENANCE

### 5.1 La pertinence d'un système de gestion de la maintenance

La pertinence d'un système de gestion de la maintenance a été démontrée dans plusieurs ouvrages (Monchy [2], Lyonnais [7], Nakajima [5, 6], Lavina [8], Jardine et al. [9]). En effet, un système de gestion de la maintenance bien adapté aux besoins de l'entreprise manufacturière peut l'aider à demeurer compétitive aussi bien à l'échelle nationale qu'à l'échelle internationale. Pour illustrer cette pertinence, nous procéderons en deux étapes. Au cours de la première, nous mettons en évidence les conséquences de l'implantation d'un système de gestion de la maintenance sur l'entreprise. Au cours de la deuxième étape, nous essaierons d'établir le lien entre les résultats cités lors de la première étape et les critères de compétitivité d'une entreprise manufacturière.

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 2.10). C'est ce que nous détaillerons dans ce qui suit.

Sur le plan de l'infrastructure, l'implantation de ce système permet de :

- protéger les investissements en assurant aux machines et aux bâtiments une vie utile prolongée grâce à un entretien régulier et efficace;

- veiller au rendement de ces investissements en utilisant au maximum les équipements et en réduisant ainsi au minimum les périodes d'interruption (non planifiées) du système de production.

Sur le plan des ressources, l'effet du système de gestion de la maintenance se situe aussi bien aux niveaux des ressources humaines que des ressources matérielles. En ce qui concerne le premier volet, ce système permet de :

- superviser et diriger le personnel du service d'entretien afin d'améliorer au maximum l'utilisation et l'allocation de ces ressources;
- assurer efficacement la formation technique du personnel, pour qu'il maîtrise les tâches qu'il est en train d'accomplir.

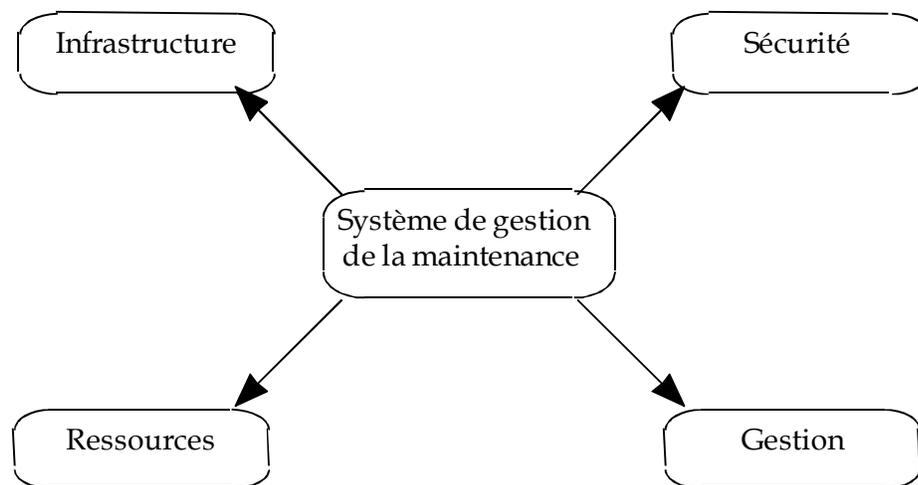


Figure 2.10: L'impact du système de gestion de la maintenance.

En ce qui concerne le volet matériel, le système de gestion de la maintenance permet de :

- améliorer l'utilisation de ces ressources (les équipements, l'outillage et les pièces de rechange);
- optimiser leur allocation (pour éviter le gaspillage);
- réduire les coûts de production.

Au niveau de la gestion, il permet de :

- consigner les dépenses et de bien estimer les coûts des travaux d'entretien et de maintenance afin de tenter de les réduire;
- contrôler les coûts d'entretien afin de tenir une comptabilité en vue de l'établissement des budgets futurs.

Sur le plan de la sécurité, ce système permet de :

- mettre en place un système de prévention des accidents en assurant la sécurité de fonctionnement des équipements et la sécurité des bâtiments;
- avoir un climat serein de travail au sein de l'entreprise, créant ainsi une ambiance de travail sécuritaire.

Finalement, le système de gestion de la maintenance influence aussi les critères de compétitivité de l'entreprise, à savoir la qualité, le prix, le temps, la flexibilité, le service et la notoriété. Ces derniers sont tributaires des actions de maintenance suivantes:

- assurer une longue vie utile aux machines et aux bâtiments;
- diminuer les périodes d'interruption de production;
- superviser le personnel des services d'entretien;
- réduire les coûts des services d'entretien;
- améliorer l'efficacité des ressources humaines;
- éviter le gaspillage des ressources matérielles;
- assurer la formation technique du personnel de service;
- assurer l'indépendance des cadres et des travailleurs locaux sur le plan technique et pendant la phase d'exploitation;
- estimer les coûts des travaux d'entretien;
- mettre en place un système de prévention des accidents de travail;
- évaluer le fonctionnement des équipements en vue des décisions d'achat futures.

Effectivement, en augmentant la durée de vie utile des machines du système de production, la maintenance permet d'amortir sur une longue durée les équipements et réduit par conséquent le prix de revient du produit fini. La diminution de la période d'interruption de la production permet de son côté de réduire le coût par unité produite. Par ailleurs, la supervision, la formation et l'amélioration de l'efficacité des ressources humaines du service de maintenance permettent d'agir sur tous les critères de compétitivité. De même, un bon estimé des travaux de maintenance et leur optimisation permettent au gestionnaire d'améliorer le contrôle des coûts.

## **5.2 Présentation d'un système de gestion de la maintenance**

Le cadre de référence du système de gestion de la maintenance que nous présentons à la figure 2.11, comporte quatre étapes aussi importantes les unes que les autres.

La première étape concerne la réception du matériel et la documentation. La deuxième est relative au choix du type de maintenance à effectuer en fonction des

paramètres choisis. A partir du type de maintenance choisi (préventive conditionnelle, systématique, corrective ou améliorative), nous précisons les étapes du processus de maintenance telles que la planification des interventions, les procédures de détection des défaillances, l'exécution et le suivi de l'intervention (troisième étape). La dernière étape concerne la réalisation et le suivi de l'opération de maintenance.

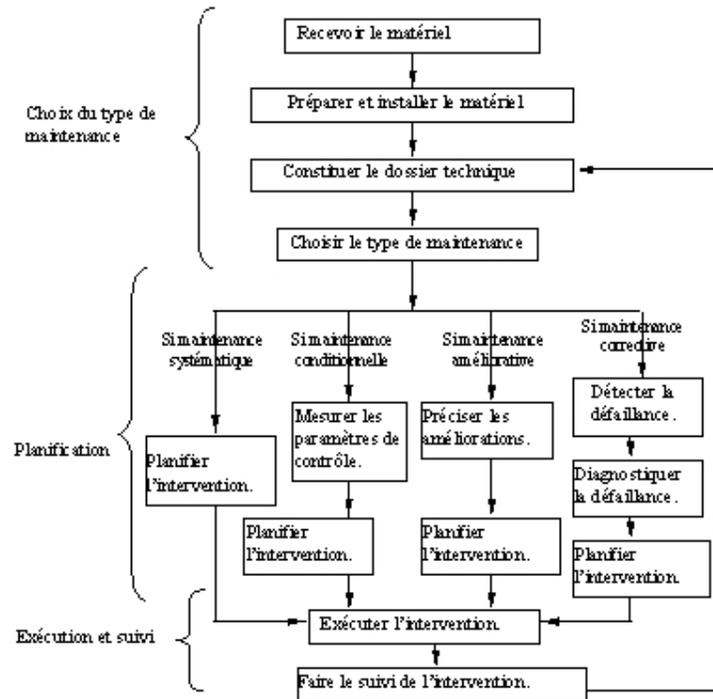


Figure 2.11 : Le système de gestion de la maintenance

### 5.3 La gestion des flux d'information

A travers cette dynamique de gestion des opérations dans la maintenance, un volume important d'informations circule à travers les différents processus. Pour étudier cet aspect de la fonction maintenance et en se référant aux travaux sur l'organisation des systèmes, le système de gestion de la maintenance peut être subdivisé en trois sous-systèmes :

- le sous-système de décision et de pilotage,
- le sous-système d'information,
- le sous-système opérant.

Le sous-système de décision comprend de nombreuses fonctions : régulation, décision et coordination. Il définit, entre autres, les objectifs et les orientations à moyen et à long terme.

Le sous-système opérant comprend la réalisation des opérations qui assurent l'atteinte des objectifs de l'entreprise. En général, il reçoit des intrants, les transforme grâce à l'utilisation de ressources en extrants (produits ou services à valeur ajoutée). Il se charge de l'exécution des travaux et de la gestion des opérations de maintenance.

Les échanges entre les sous-systèmes de pilotage et opérant s'effectuent via le système d'information. Sa structure doit permettre de relier d'une manière intelligente les différents intervenants, de leur acheminer une information complète et de les renseigner sur l'état du système en tout temps et ce, d'une manière sûre et sans équivoque. Un sous-système d'information peut être plus ou moins simple à concevoir, cela dépend essentiellement de l'effort requis pour investiguer au-delà des limites de l'action et pour forcer la révision fondamentale des façons de faire.

#### Rôle du système d'information dans la maintenance

Un système de gestion de la maintenance génère un volume important d'informations (figure 2.12, Kaffel [10]). Jusqu'à très récemment, ces informations étaient exploitées pour facturer les services rendus par les équipes de maintenance et pour établir les budgets d'achat de nouveaux équipements et d'outillages. L'usage de ces informations pour assurer la planification, le lancement et le suivi des opérations étaient très limités. Sur le plan technique, très peu d'entreprises disposent de banques de données exploitables. Le cas échéant, les données sont généralement introduites par le personnel technique. Elles sont incomplètes, imprécises et peu fiables.

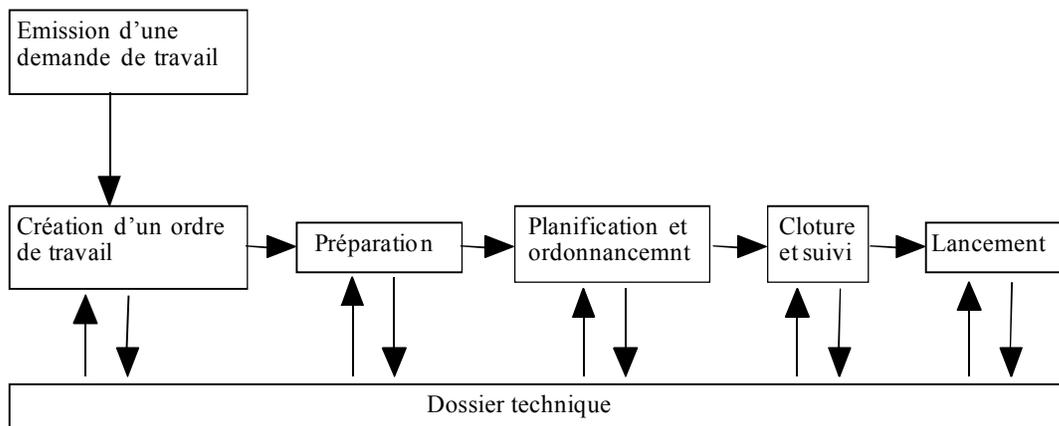


Figure 2.12: La procédure de traitement d'une demande de travail

Indépendamment du type de maintenance considéré, la figure 2.12 montre le processus de traitement d'une requête adressée aux services de maintenance ainsi que les informations considérées à chacune des étapes de traitement.

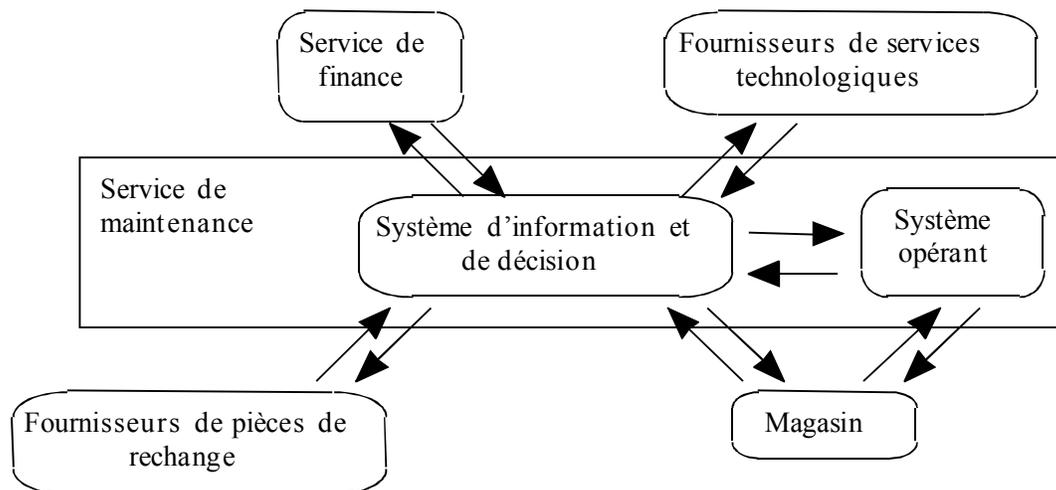
Le système d'information et de décision a pour mission de planifier et

d'ordonnancer les travaux de maintenance, de faire les collectes d'information et les suivis de l'exécution des travaux. La mission du système opérant est d'exécuter les travaux, de remettre des rapports d'intervention et de discuter avec les membres du système de décision les différentes difficultés rencontrées au cours des travaux et des éventuelles améliorations pouvant être apportées au système global.

La figure 2.13 présente une schématisation des flux d'information entre les différents acteurs du système de gestion de la maintenance. Il faut toutefois mentionner que, vu la taille réduite des équipes dans les PME manufacturières, il est difficile de distinguer le système de décision du système opérant.

Le système de décision, tel qu'il a été défini ci-dessus, doit gérer les informations qui lui sont destinées pour bien s'éclairer quant aux stratégies de maintenance à adopter selon la mission de l'entreprise. Cependant, le système de décision doit gérer les données pour transmettre la bonne information au système opérant.

Pour faciliter la tâche de l'opérant, et pour qu'il puisse transmettre des rapports d'intervention précis, ce dernier doit utiliser des procédures et des schémas clairs et détaillés avec des repères topologiques des composants (Afnor [1], [11]). Le schéma en sa possession devra être conforme à l'appareil dépanné, c'est-à-dire mis à jour, à chaque fois que des modifications de fabrication sont apportées.



**Figure 2.13:** Le flux d'information à travers le service de maintenance

Sur son rapport, l'intervenant doit signaler sans ambiguïté tous les composants changés, le mode de défaillance et toutes les indications utiles sur les causes probables et les conditions d'apparition de la défaillance. Cependant, de nouvelles approches ont vu le jour pour aider la personne intervenante à réaliser le processus auquel elle est affectée. Ces méthodes, comme la télé-maintenance, la maintenance productive totale ou la maintenance centrée sur la fiabilité seront présentées dans ce qui suit.

## 6. LES APPROCHES CONTEMPORAINES

### 6.1. La télé-maintenance

La télé-maintenance est une forme évoluée de maintenance (Hayes et al. [11]). Elle est basée sur le principe suivant : les capteurs, mesurant des grandeurs intimement liées à l'état de la machine, sont reliés à une centrale de surveillance qui enregistre toutes les alarmes et les mesures. Des tableaux synoptiques visualisent la localisation de l'information. Cette technique permet d'une part, le suivi et l'enregistrement des données sur chaque machine pour des fins de comparaison et d'autre part, la détection d'aléas de fonctionnement. L'agent de surveillance qui constate une évolution d'une dégradation ou l'apparition d'un défaut, a la responsabilité de mettre hors service, de consigner la partie lésée de l'installation et d'alerter les agents d'intervention. Cette technique voit son application dans les chaînes de production automatisées ou auto-programmables.

Avec l'évolution fulgurante de la technologie lors de la dernière décennie, la télé-maintenance a pris une place de plus en plus grande dans les entreprises manufacturières. Cette technologie permet de faire le contrôle et le suivi de l'évolution de l'état des machines de production à l'interne ou à l'externe.

### 6.2 La Maintenance Productive Totale (TPM)

Nakajima [5,6] définit la T.P.M comme une approche où tous les employés participent à la maintenance préventive par des activités d'équipe. C'est la définition qui est adoptée d'emblée dans la littérature sur la T.P.M. Il ajoute que le terme «Total» de TPM a trois significations : le rendement global des installations, un système global de réalisation et une participation de tout le personnel. La TPM vise à modifier la manière de penser des employés vis-à-vis de la maintenance et à améliorer leur niveau de connaissance.

La T.P.M a été définie en cinq points clés :

1. le fonctionnement optimal des installations;
2. un système exhaustif de maintenance préventive, incluant la maintenance autonome et la détection des micro-dégradations par un programme de propreté;
3. une approche multidisciplinaire (design + production + maintenance);
4. l'implication de tous les employés et à tous les niveaux;
5. la réalisation des activités de maintenance préventive par petits groupes autonomes.

L'implantation du concept de la T.P.M doit s'effectuer progressivement, tel qu'exposé par Nakajima [5]. Il propose une période de deux à trois ans aux membres de l'usine (incluant travailleurs et administrateurs) pour adopter cette philosophie. Il conseille d'essayer ce programme dans le cadre d'un projet-pilote avant de généraliser l'expérience.

L'aspect principal à considérer, lors de l'implantation de la T.P.M, est le facteur humain. Peu de problèmes sont à prévoir du côté technique. Il est donc crucial de bien planifier et gérer le facteur humain pour garantir la réussite d'un tel changement. Les prérequis à la TPM semblent être plus du côté culturel d'entreprise et du potentiel d'apprentissage des employés, que du côté technique de la maintenance. Les méthodes d'implantation proposées sont semblables mais non génériques.

### 6.3. La Maintenance Basée sur la Fiabilité

La RCM (Reliability Centred Maintenance) a vu le jour dans l'industrie aéronautique au cours des années 60. A la fin des années 50, le coût des activités de maintenance dans cette industrie était devenu exorbitant et a justifié une recherche spéciale sur l'efficacité de ces activités. En conséquence, un groupe de travail des forces armées américaines a pris en charge l'étude de nouvelles alternatives de l'entretien préventif. Ce groupe de travail a développé une série de directives pour les compagnies aériennes. Le premier ensemble a été émis en 1967 et a servi de base, entre autres, au programme d'entretien pour le Boeing 747. D'autres directives ont donné naissance à la maintenance basée sur la fiabilité (RCM), définie par Moubray [12], comme un processus qui détermine les besoins en maintenance du composant dans son contexte opérationnel.

Par la suite, la RCM2 a été présentée par Moubray [12]. Elle ne présente pas une variation significative des principes initiaux de la RCM à un niveau théorique bien qu'il ait découvert quelques petites lacunes dans la logique (notamment le manque des principes initiaux de la RCM dans la considération explicite de l'impact potentiel d'une panne sur l'environnement, et la logique concernant le traitement pertinent des pannes cachées). Cependant :

1. les questions de RCM ont été raffinées pour améliorer la clarté et la convivialité. Ceci permet d'appliquer plus facilement les principes de la RCM;
2. le processus intègre une approche de gestion du changement pour le développement et la mise en place de nouvelles stratégies d'entretien du matériel;
3. il est bien davantage qu'un ensemble de principes d'ingénierie; il est conçu pour renforcer et mettre en valeur les qualifications des hommes de maintenance et des opérateurs.

Le processus contient une partie formation et une partie mise en place. Cette dernière se compose de plusieurs étapes (Moubray [12]):

1. présenter l'approche aux décideurs dans l'organisation;
2. choisir le matériel approprié pour l'analyse initiale et estimer les avantages potentiels de cette analyse;
3. choisir l'équipe appropriée pour conduire l'analyse;
4. mener le processus d'apprentissage pour les membres d'équipe;
5. former l'équipe et conduire l'analyse;
6. conduire l'audit technique et managérial de l'analyse;
7. développer les programmes de maintenance révisés;
8. mettre en application les programmes de maintenance révisés;
9. évaluer les avantages obtenus;
10. répéter les étapes 2 à 9.

Les étapes 2 et 3 sont critiques pour le succès du projet d'implantation de la RCM.

## 7. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, nous avons défini la fiabilité et la défaillance d'un système. Il est important de connaître les grandeurs et les mécanismes qui en résultent pour pouvoir implanter un système de maintenance efficace et rentable. Puis, nous avons défini le système de gestion de la maintenance avec ses différents aspects préventifs et correctifs. Nous avons dressé la typologie de ce dernier et nous l'avons positionné par rapport au système de production.

## CHAPITRE 3: LES DIFFERENTES POLITIQUES DE MAINTENANCE

### 1. INTRODUCTION

Depuis que l'homme a réussi à fabriquer des outils, puis des machines, il a toujours été amené à réaliser des actions correctives. L'entretien traditionnel consistait majoritairement dans cette réalisation de dépannages et de réparations. Dans une logique de maintenance, nous déterminerons délibérément les actions préventives suivant la politique de maintenance choisie, alors que nous subirons les actions correctives de cette politique. Nous nommerons «risque  $\alpha$ » la probabilité du correctif résiduel, complément inexorable de toute politique préventive.

La maintenance préventive à appliquer à un équipement relève d'un choix délibéré dont nous étudierons les critères. La figure 3.1. illustre la linéarité du coût du préventif en fonction du temps passé à le mettre en œuvre. Dans l'hypothèse où le préventif est efficace, le temps passé à corriger les défaillances décroît, ainsi que les coûts associés au correctif résiduel. La somme des deux coûts est une «courbe en baignoire».

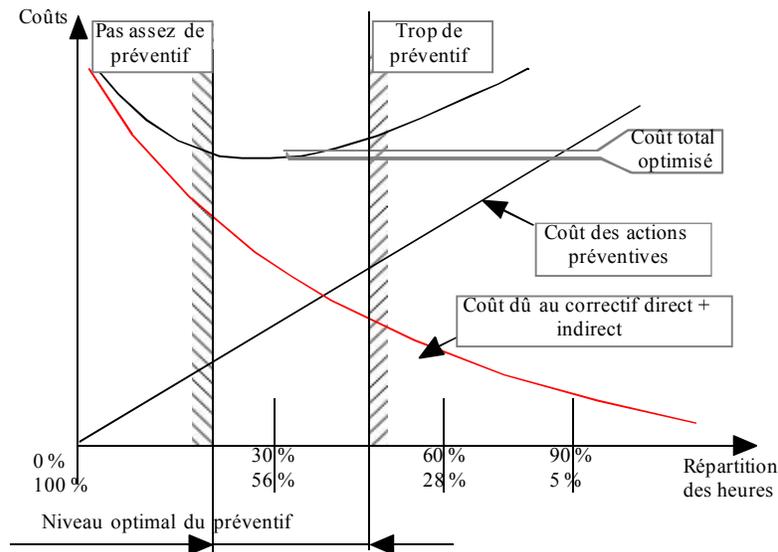


Figure 3.1. Coût économique de la complémentarité préventif/correctif

Le graphe illustre bien, pour un équipement donné, l'existence d'un optimum économique. Il prouve également que **«faire de la maintenance, ce n'est pas forcément faire du préventif à tout prix»**.

La figure 3.2. illustre la variation de la charge totale de travail en fonction du pourcentage (préventif/correctif). Cette figure met en évidence la tendance décroissante de la charge du travail en fonction du préventif jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le correctif devient quasiment incompressible.

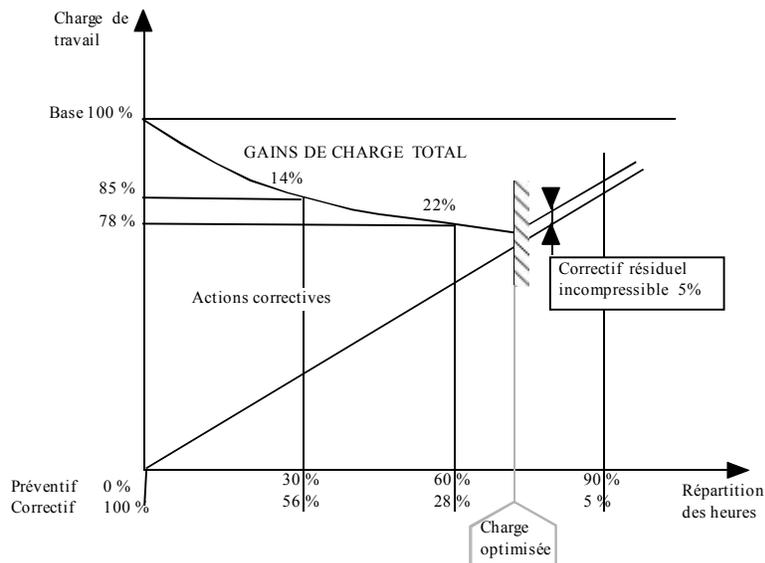
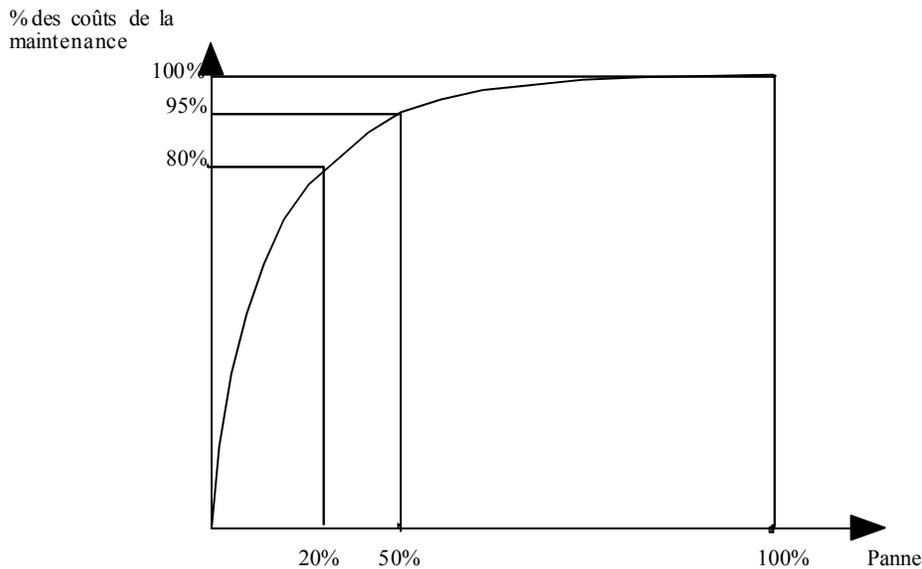


Figure 3.2: Promouvoir le préventif, c'est réduire la charge de travail

## 2. LA MAINTENANCE PREVENTIVE

Cette politique de maintenance s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise. Ce sont les matériels appartenant à la catégorie A d'une courbe ABC (coûts/nombre de pannes, Figure 3.3).



*Zone A : Elle correspond à la zone de priorité puisqu'elle contient 20% des pannes représentant 80% des coûts*

*Zone B : Dans cette tranche, les 30% des pannes ne coûtent que 15% supplémentaires*

*Zone C : Les 50% des pannes restantes ne reviennent qu'à 5% des coûts*

**Figure 3.3 :** Courbe ABC des pannes

Il convient donc d'organiser un système de maintenance visant à minimiser ces arrêts. Ainsi, on aura à pratiquer deux formes de maintenance dite préventive :

- **La maintenance préventive systématique** qui s'adressera à des éléments de la catégorie A et ne revenant pas trop cher en changement ; le but est de maintenir le système dans l'état de ses performances initiales. Pour cela, il est procédé lors de ces interventions à différentes opérations qui peuvent être : remplacement (de l'huile, des filtres, des roulements, des paliers..), réglage (des jeux, pressions, etc.)

- **La maintenance préventive conditionnelle** qui conviendra pour des matériels coûtant chers en remplacement et pouvant être surveillés par des méthodes non destructives (analyses de vibration, de l'huile, de la température, etc.). En effet, l'idée de la maintenance préventive conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement, ou d'usure mettant en danger ses performances.

La mise en pratique de cette maintenance nécessite de décomposer les sous-systèmes ou machines en éléments maintenables. Ces éléments doivent être visités ou changés régulièrement. La périodicité de ces visites s'établit par l'étude des lois de

durée de vie. Des gammes d'entretien seront élaborées de façon à préciser le travail à exécuter par l'équipe de maintenance, un rapport sera rédigé mettant en relief les résultats des diverses mesures et les observations.

La mise en place de la maintenance préventive rend service :

- **au service sécurité** (diminution des avaries en service ayant pour conséquence des catastrophes),
- **au service maintenance** (meilleure planification, efficacité),
- **au service fiabilité** (amélioration, connaissance des matériels),
- **à la production** (moins de pannes en service).
- **au gestionnaire** (action sur les coûts de non maintenance et ceux de maintenance).
- **au client** (utilisation, moins de pannes),
- **à l'enquêteur** (traçabilité, connaissance des avaries),
- **au service qualité** (meilleurs service),
- **au service logistique** (stock de rechanges),
- **au service méthode** (meilleure planification de la production).

Elle agit sur :

- **la planification des tâches dans le service maintenance** (moins d'imprévus, charge de travail plus régulière, moins de surcoûts dus à l'emploi de personnes intérimaires),

Gain = f (préventif)

- **la sécurité** (moins de pannes ayant de conséquences catastrophiques),  
Sécurité = f (préventif),

Cela implique une connaissance de  $R(t)$  et  $F(t)$

Sécurité = f ( $R(t)$ )

Pour un  $F(t)$  donnée, on en déduit un temps d'intervention

- **L'amélioration de la fiabilité**,  $R(t)$  et de  $\lambda(t)$ , le taux de défaillance est artificiellement réduit.

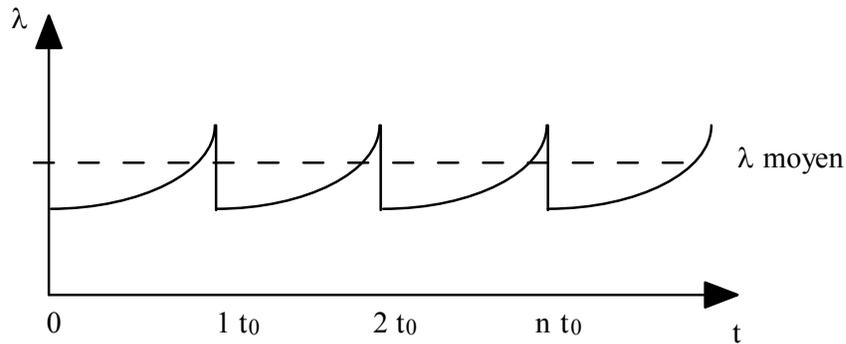


Figure 3.4: Amélioration de la fiabilité

Si on pratique une maintenance systématique toutes les « $t_0$ » heures de fonctionnement alors, la courbe de fiabilité aura l'allure suivante :

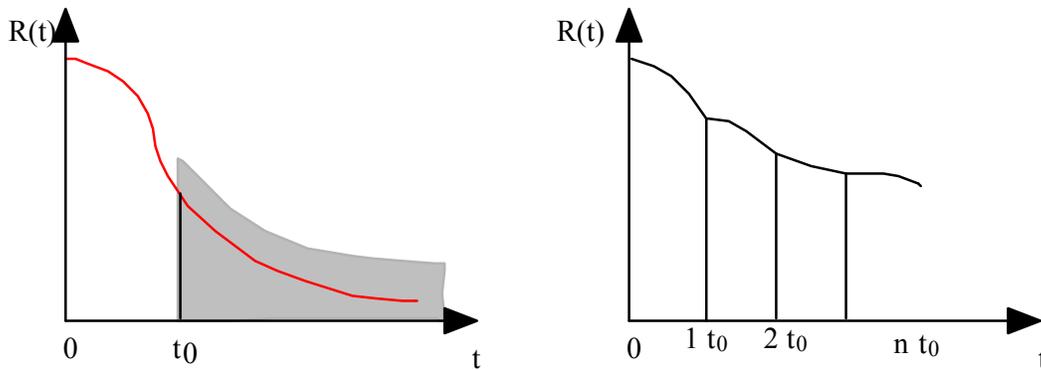


Figure 3.5: Action de la maintenance préventive sur la fiabilité

- **sur les pannes** en production, diminution des arrête imprévus, meilleures MDT et MTTR ce qui implique une meilleure disponibilité « $D_s$ »,

$$D_i = \frac{MUT}{MUT + MDT} \tag{3.14}$$

$D_s$  = disponibilité asymptotique d'un système «série»

$$D_s = \frac{1}{\sum \frac{1}{D_i} - (n-1)} \tag{3.15}$$

- **sur les coûts**, augmentation des coûts directs de maintenance préventive. Pour optimiser les politiques de maintenance, il est nécessaire de comparer le coût de maintenance préventive « $C_p$ » aux coûts de la défaillance en service « $C_d$ ».  
Si on a une politique préventive, il faut décider de la fréquence des changements, de la planification, du renouvellement d'équipement.
- **sur la qualité**, (*Régularité de la production*)  
 $Q = f(\text{préventif})$   
 $Q$  : qualité de produit sortant d'un système maintenu.

Deux principales difficultés sont inhérentes à l'instauration de la maintenance préventive :

1. Intervenir sur un système en bon fonctionnement. Par nature, prévenir sur une panne implique d'intervenir sur un système en bon fonctionnement, inactif ou actif. Dans ce dernier cas surtout, l'intervention est souvent mal perçue par les partenaires de production qui ont de «leur système» une perception à court terme (l'en-cours à livrer). D'où une indispensable concertation sur les modalités de l'intervention préventive.

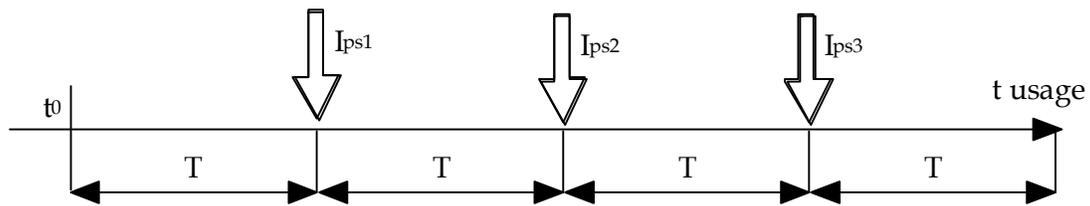
2. La difficile justification économique de l'action préventive. L'intervention préventive a un coût noté  $C_p$ . La défaillance survenue a également un coût, notée  $C_d$ . Lorsque  $C_d > C_p$ , il est facile de justifier a posteriori une politique préventive. Mais a priori? Dans ce cas, la défaillance évitée devient virtuelle. Son coût également. Mais combien aurait coûté la défaillance que l'on a (probablement évitée) ?

D'où l'intérêt de mettre en mémoire, puis d'exploiter les coûts d'interventions correctives et préventives relatives à un équipement pour justifier la politique préventive à partir de graphes d'évolution annuels.

### 2.1 La maintenance préventive systématique

«[...] activités déclenchées suivant un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage» et aussi «les remplacements des pièces et des fluides ont lieu quel que soit leur état de dégradation, et ce de façon périodique».

Ces définitions sont illustrées par la figure 3.6. Nous noterons  $T$  la période d'intervention préventive systématique.



$I_{ps}$  : Intervention préventive systématique

**Figure 3.6:** Périodicité des interventions préventives systématiques

Les interventions  $I_{ps}$  consistent le plus souvent en un changement de composant, visites préventives, réglages, étalonnages, etc.

Souvent elles se rapportent :

- à l'unité de production (remise à niveau par arrêt annuel par exemple),
- à un système (révision limitée ou générale),
- à un module ou sous ensemble par échange standard (carte électronique, vérin moteur, moteur électrique, etc. ).
- à un composant «sensible» (filtre, lampe, balai de moteur CC, joint flexible, etc.)
- à un fluide (lubrifiant dégradé, etc.).

En ce qui concerne les interventions «lourdes», elles sont précédées d'une expertise des points à prévision de défaillances potentielles.

L'avantage majeur de la maintenance systématique réside dans sa facilité de gestion. Un programme informatique peut sortir le vendredi soir le listing des  $I_{ps}$  de la semaine suivante. La charge de travail est ainsi connue longtemps à l'avance. Les  $I_{ps}$  sont programmées dans la mesure du possible pendant des temps de «non-réquisition» du matériel concerné. Quand ce n'est pas possible, elles doivent générer des arrête programmés de production minimum, par échange standard de modules par exemple.

La défaillance a lieu avant une échéance, nous pourrons soit fonctionner en dégradé jusqu'à l'échéance (gestion dite collective), soit refaire partir  $T$  de la fin de l'action corrective (gestion dite individuelle).

### 2.1.1 Détermination de la période $T$ d'intervention systématique

Sous le même vocable de maintenance systématique, voire de maintenance préventive, sont regroupés les actions de nature très variable, que nous allons étudier en fonction de la valeur de  $T$  (période d'intervention)

Tableau 3.1: Périodicité des interventions de la maintenance préventive

Valeur de T	Nature des actions systématiques	Critères du choix de T
Période courte 1/2 jour à une semaine	- Surveillance "active" - Visite préventive, ronde - Consignes permanentes/poste	- Préconisation fournisseur - Expérience - Habitudes empiriques
Période moyenne T = k. MTBF compris entre 1 semaine et 1 an	- Echange standard de module ou de composant - Actions ponctuelles sur un composant "fragile"	- Réglementaires - Préconisation - T optimisé par calculs, essais ou expériences
Période longue 1 an à 10 ans	- Révision limitées générales décennales - Arrêts périodiques, annuels	- Réglementaire - Empiriques (liée aux contraintes sociales : congès annuels par exemple)

Les travaux ont tous en commun leur caractère systématique et préventif. Là on arrête la comparaison :

- Les travaux à période courte concernent les opérateurs sur site. La «surveillance active» comprend les nombreuses mini-interventions dont peut prendre l'initiative un opérateur vigilant : resserrer des écrous, compléter un niveau de lubrifiant, détecter une fuite, retendre une courroie, etc. Ce «soin» de nature préventive évite bien des défaillances ultérieures;
- Les travaux à périodes moyennes concernent les techniciens de la maintenance. C'est à ce niveau que la détermination des périodes T est importante;
- Les travaux à période longue sont souvent pour partie sous-traités à plusieurs prestataires extérieurs, bien que gérés par les «méthodes-maintenance» en interne.

### 2.1.2. L'optimisation économique de la période T

C'est une réflexion sur la criticité économique d'une défaillance qui va faire choisir de la prévenir, à partir d'un historique de phase corrective par exemple.

Cette même criticité économique estimée permet d'optimiser le choix de T. Nous noterons  $\theta_T$  la valeur de T optimisée suivant les critères économiques.

#### a. Première méthode : simulation économique

##### ✓ Prérequis

- Connaissance de la loi de distribution  $f(t)$  des défaillances à prévenir, donc du taux de défaillance  $\lambda$  et du requis  $a$  associé à la période d'intervention T.
- Estimation du coût de l'intervention corrective  $C_{ic}$  et du coût de l'intervention préventive  $C_{is}$

##### ✓ Méthode

- On choisit une durée d'application de la maintenance systématique (3 ans, par exemple).
- On fait varier T pour des valeurs réduites de la MTBF ( $0.5 < k < 0.9$ ) et l'on calcule pour chaque valeur de T le nombre d' $I_{ps}$  sur la durée choisie.
- Pour chaque valeur de T, on estime le coût direct des n interventions préventives n  $C_{is}$ ).
- Pour chaque valeur de T, on estime la probabilité  $F(t)$  d'avoir n' interventions correctives de coût n'  $C_{ic}$ .
- Pour chaque valeur de T, on fait le total n  $C_{is} + n' C_{ic}$

On choisit alors la valeur de  $\theta = T$  optimisée induisant le coût minimal sur la durée considérée. A partir du taux de défaillance  $\lambda$ , il est possible d'évaluer le gain de cette politique préventive par rapport à une politique corrective (éventuellement pratiquée et évaluée dans une phase précédente).

#### b. Deuxième méthode : loi de Weibull et abaque d'optimisation

L'utilisation de la loi de Weibull permet de donner des éléments de réponse concernant le choix entre la mise en œuvre d'une politique de maintenance corrective ou préventive systématique. En effet elle permet de répondre aux questions suivantes :

- existe-t-il une période d'intervention systématique T telle que la maintenance systématique soit plus économique que d'attendre la panne ?
- si oui, qu'elle est cette période optimisée  $\theta_T$

✓ **Situation du problème et prérequis :**

Soit un système réparable dont un constituant «fragile» est interchangeable.

A quelle période  $\theta$  doit-on effectuer son remplacement préventif sachant que l'on connaît :

- la loi de comportement  $R(t)$  du constituant
- $p$ , le coût direct de l'intervention corrective, qui est, par hypothèse, égal au coût de l'intervention systématique liée au remplacement du constituant défectueux
- $P$ , le coût indirect des conséquences de la défaillance ?

On notera  $r = P/p$  le ratio de «**criticité économique**» de la défaillance. Le domaine de validité de l'outil que nous présentons est  $2 < r < 100$

✓ **Evaluation de chacun des coûts**

➤ *Coût  $C_1$  d'une intervention corrective*

Le coût d'une intervention corrective est  $p + P$ .

Le coût moyen par unité d'usage (pour comparaison) devient :  $C_1 = \frac{P + p}{m_\infty}$

$m_\infty$  = MTBF de composant =  $E(t)$  de la loi de Weibull connue.

$m_\infty$  est la durée de vie moyenne des composants fonctionnant sans limite de temps.

➤ *Coût  $C_2$  d'une intervention préventive*

Si  $\theta$  est la période de remplacement systématique du composant, le coût aura deux termes :

- le coût de l'intervention  $p$  ;
- le coût du correctif résiduel lié au risque de défaillance avant  $\theta$  et évalué par sa probabilité  $F(t)$  avec  $t < \theta$ . Soit  $P F(t)$  ou  $P (1 - R(t))$

Le coût moyen par unité d'usage est donc :

$$C_2(\theta) = \frac{p + P \times (1 - R(\theta))}{m(\theta)} \quad (2.16)$$

$m(\theta)$  étant la durée de vie moyenne des composants ne dépassant pas  $\theta$  puis que changés à cette date :

$$m(\theta) = \int_0^{\theta} R(t).dt \quad (2.17)$$

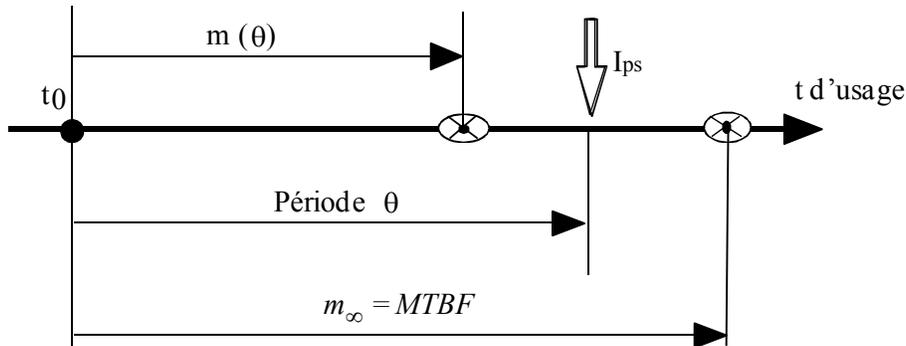


Figure 3.9: Périodicité optimale des interventions

✓ Critères de choix d'une politique de maintenance

Il est évident qu'il conviendra d'effectuer des opérations préventives si l'on trouve une solution telle que  $C_2(\theta) < C_1$  que l'on étudiera sous la forme :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} < 1 \quad (2.18)$$

✓ Principe de l'optimisation de  $\theta$

Le principe consiste à étudier les variations du rapport  $C_2(\theta) / C_1$  lorsque  $\theta$  varie :

- si le rapport reste  $> 1$ , il n'y a pas de solution ;
- si le rapport a un minimum  $< 1$ , la valeur de  $t = \theta$  correspondant au minimum est la solution optimisée.

Formons le rapport et étudions ses variations :

$$\frac{C_2(\theta)}{C_1} = \frac{p + P \times (1 - R(t))}{m(\theta)} \times \frac{m_{\infty}}{p + P} \quad (2.19)$$

$R(\theta)$  est modélisable par une loi de Weibull à deux paramètres ( $\gamma=0$ ):

$$R(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta}{\eta}\right)^\beta} \text{ et } m_\infty = \eta \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.20)$$

Posons :  $x = \frac{\theta}{\eta}$  et  $r = \frac{P}{p}$

Après transformation le rapport devient :

$$\frac{C_2(x)}{C_1} = \frac{1 + r \times (1 - e^{-x^\beta})}{\int_0^x e^{-t^\beta} dt} \times \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)}{1 + r} \quad (2.21)$$

$\frac{C_2(x)}{C_1}$  est dépendant de deux paramètres :

- $\beta$  : paramètre technique, qui caractérise la forme de la distribution;
- $r$  : paramètre économique, caractérise le rapport des coûts indirects/directs (criticité de la défaillance).

✓ **Exemple de courbe de variation du rapport  $C_2(x)/C_1$**

Nous allons tracer la courbe représentative des variations du rapport dans le cas suivant :

- données de fiabilité (Weibull) :  $\beta = 3, \gamma = 0, \eta = 10$  mois (avec une MTBF = 8.9 mois);
- données économiques estimés :  $r = P/p = 10$  puis 5 et 3.

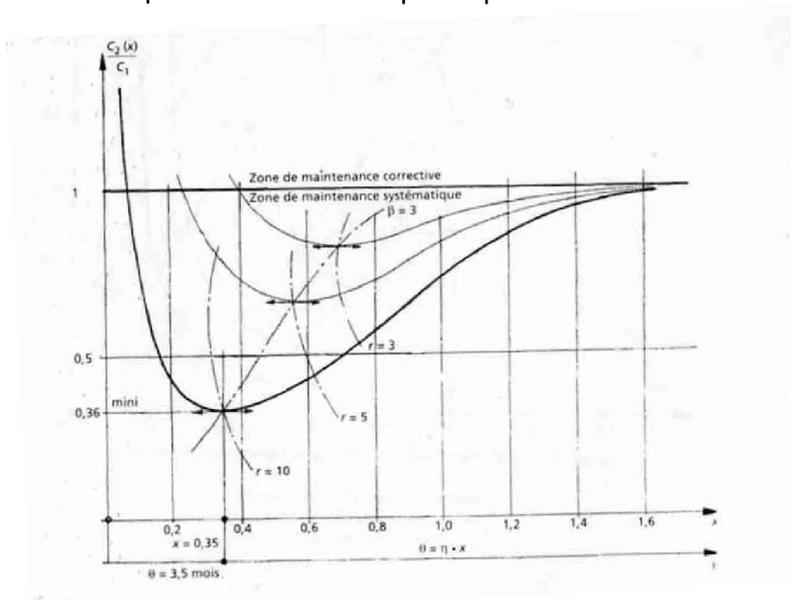


Figure 3.10: Variation du rapport  $C_2(x)/C_1$

La valeur  $\text{mini} = 0.36 < 1$  exprime le gain d'une politique de maintenance préventive effectuée à  $x_0 = 0.35$ , donc à la période d'intervention systématique mois  $\times 0.35 = 3.5$  mois.

Rappelons que la MTBF de cet exemple était de 8,9 mois, ce qui montre que le défaut majeur de la maintenance systématique même optimisée reste l'importance «gaspillage de potentiel» d'utilisation du composant changé.

✓ **Abaques d'optimisation de la période d'intervention systématique**

➤ principe de l'établissement de l'abaque :

La courbe précédente ne nous intéresse que par son minimum, repéré par ses coordonnées  $x$  et  $C_2(x)/C_1$  et paramétré par les deux variables de  $\beta$  et  $r$ . Nous allons donc ne tracer que chaque point minimum obtenu pour des séries de valeurs de  $\beta$  (1,2 à 4) et de  $r$  (2 à 100). Il restera à interpoler ces courbes en fonction des deux paramètres de l'étude à mener.

➤ abaque ( $r, \beta$ ) en gestion individuelle (Figure 3.11)

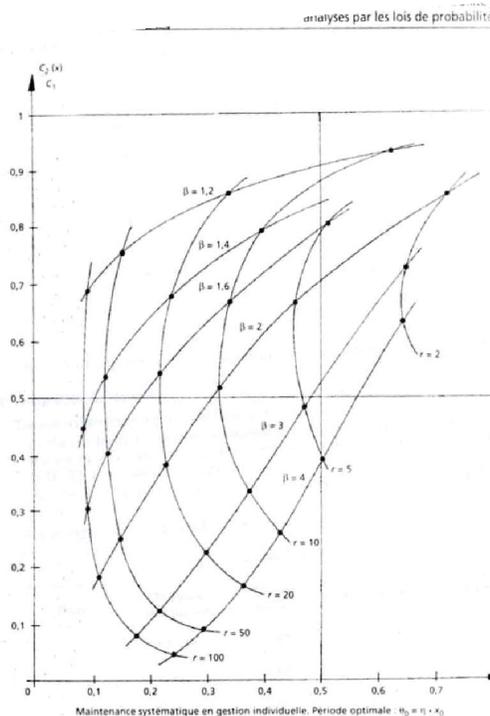


Figure 3.11: Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion individuelle)

➤ Utilisation de l'abaque

L'intérêt de cet outil réside dans sa rapidité d'utilisation. A partir de  $r$  et de  $\beta$ , par interpolation des courbes du réseau, nous déterminons graphiquement les coordonnées du point «mini» à l'intersection des deux courbes interpolées :

- L'ordonnée  $C_2/C_1$  donne la valeur du gain par rapport à une politique corrective ;
- l'abscisse  $x_0$  se corrige par la formule de changement de variable :  $\theta = \eta x_0$

➤ Remarque : gestion individuelle et gestion collective

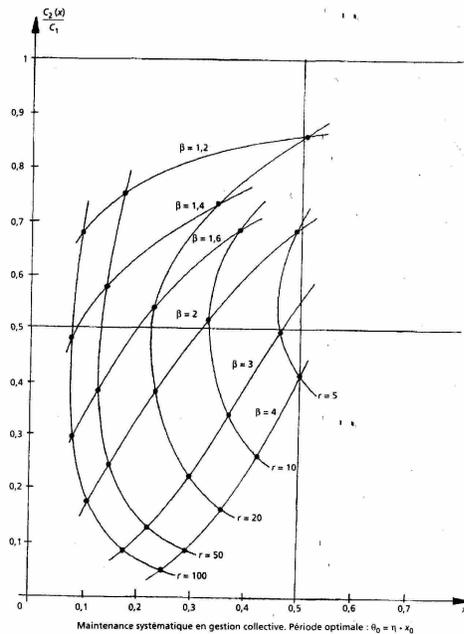
L'étude précédente a été menée dans le cas le plus fréquent de la gestion individuelle de la maintenance systématique. Ce qui signifie qu'en cas de défaillance résiduelle, le remplacement correctif du composant défaillant initialise une nouvelle période  $\theta$ .

En gestion collective, par opposition, l'échéancier primitif subsiste: il n'est pas corrigé en cas de défaillance résiduelle. Dans ce cas, l'expression du coût de la politique préventive devient :

$$C_2(\theta) = \frac{p + (p + P) \times E(\theta')}{\theta'} \quad (2.22)$$

La démarche d'établissement de l'abaque «gestion collective» est identique à la précédente

➤ Abaque ( $r, \beta$ ) en gestion collective (voir figure 3.12)



**Figure 3.12:** Abaque d'optimisation de la maintenance systématique (gestion collective)

➤ Incidences du choix de la valeur de  $T$

Si  $T$  décroît, nous intervenons plus souvent, donc nous avons :

- plus de consommation des modules, plus de coûts directs (pièces et main d'œuvre),
- plus d'occasion de gêner la production,
- plus de gaspillage de potentiel d'utilisation du module

Mais aussi moins de risque de défaillance avant  $T$ , donc une plus faible probabilité de subir les coûts indirects (conséquences économiques d'une défaillance fortuite).

Si  $T$  croît, les implications précédentes sont naturellement inversées. D'où une méthode «de bon sens» pour déterminer  $T$  en fonction du risque  $\alpha$  de correctif résiduel.

Remarquons que le raisonnement relatif à l'incidence économique du choix de  $T$  est le même que celui de la détermination d'une période de garantie.

### 2.1.3. Gestion de la maintenance systématique par la méthode ABAC - ABAD

➤ Problème à résoudre :

Rappelons que l'avantage majeur de la maintenance systématique est d'être facile à gérer. Or nous venons de voir comment l'on peut optimiser une période d'intervention systématique «individualisée». Si l'on applique à un système les  $n$  périodes  $T$  optimisées

trouvées pour chaque composant et pour chaque module, l'on arrive à une planification aberrante, car contraire à l'objectif initial de simplicité !

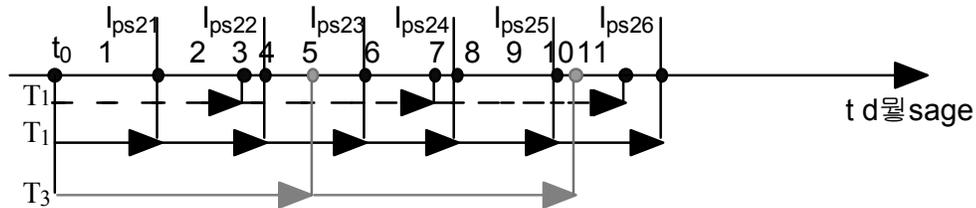


Figure 3.13: L'individualisation de la maintenance systématique par la méthode ABAC-ABAD

Cette figure calculatrice, construite à partir de seulement trois périodes  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$  montre des interventions préventives incessantes, perturbant la production.

➤ Solution : la méthode ABAC-ABAD

L'idée de base est de regrouper ces différentes  $I_{ps}$ , à partir d'un «pas» sous-multiple d'une durée de cycle prédéterminée : 1 an ou 52 semaines en unités calendaires, ou 8.000 heures en durée d'usage par exemple, cela afin de limiter le nombre des interventions. Ces regroupements de périodes à des échéances prédéterminées implique de modifier légèrement les périodes  $T$  que l'on a individuellement optimisées.

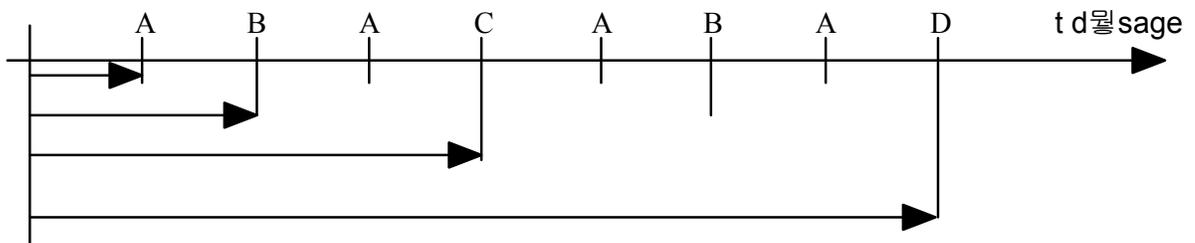


Figure 3.14: Principe de la méthode ABAC - ABAD

Nous avons ainsi des programmes à 4 (ou 8, ou 16) types d'intervention.

OA correspond au «pas», OD correspond souvent à un cycle de révision générale ou limitée.

- Ips de type A : listing du regroupement des périodes T voisines de OA
- Ips de type B : A + regroupement des périodes voisines de OB
- Ips de type C : A+ B + regroupement des périodes voisines de OC
- Ips de type D : A + B + C + regroupement des périodes voisines de OD.

Il est toujours possible d'individualiser (par exception à une règle) la prise en charge préventive d'un module ou d'un composant «sensible» dont le comportement est bien connu. L'objectif en la matière étant de réduire le nombre d'interventions Ips, surtout s'il s'agit d'arrêts programmés.

### Exemple :

Les visites préventives d'un équipement sont fixées ainsi :

- opération 1 : toutes les 500 heures de fonctionnement relevées sur le compteur ;
- opération 2 : toutes les 1000 heures ;
- opération 3 : toutes les 2000 heures ;
- opération 4 : toutes les 4000 heures ;
- opération 5 : toutes les 8000 heures ;

**Tableau 3.2:** Echancier de visites préventives systématiques

<b>Heures de marche</b>	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	...	8000
<b>Type de visites</b>	A	B	A	C	A	B	A	D		E
<b>Opérations</b>	1	1+2	1	1+2+3	1	1+2	1	1+2+3 +4		1+2+3 +4+5

#### 2.1.4 Synthèse : avantages et inconvénients

La maintenance systématique a un grand avantage : elle est facile à gérer par le fait que les activités sont programmées. La charge de travail est ainsi connue à l'avance, ainsi que la nature des travaux préventifs et de consommations s'y rapportant (gestion des stocks). Les arrêts de production, s'ils s'avèrent indispensables, sont également «négociables» à l'avance avec la production.

Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle s'applique à des défaillances «catalectiques» (soudaines et complètes) aussi bien qu'aux dégradations, à condition

d'exploiter un historique de ces défaillances. En diminuant le nombre des événements «fortuits», elle est aussi un facteur de régularisation des activités dans l'entreprise (moins d'improvisation = plus de sécurité). Toutefois, elle présente également des inconvénients :

- de façon inhérente à la méthode, elle génère un inévitable «gaspillage de potentiel» d'utilisation d'un module ou d'un composant. Pour une courroie de transmission ou un joint, ce n'est économiquement pas grave. Lorsqu'il s'agit d'un sous-ensemble coûteux, c'est plus discutable. Nous verrons au paragraphe suivant «la maintenance conditionnelle» un meilleur moyen de résoudre ce problème ;
- le risque de «correctif résiduel» n'est pas toujours facile à évaluer. Faute de données opérationnelles suffisantes, les agents des méthodes sont souvent réduits à fixer les périodes d'intervention par empirisme, sans réellement maîtriser le risque de panne fortuite. Qui, dans tous les cas, est «non nul» !
- comme toute action préventive, l'intervention sur un bien «qui marche» peut être mal perçue
- enfin ce que coûte un plan de préventif systématique est visible. Ce qu'il apporte l'est moins...

## 2.2 La maintenance conditionnelle et prévisionnelle

### 2.2.1 Définition (Norme AFNOR):

« Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées [...] suivant des critères prédéterminés **significatifs de l'état de dégradation** du bien ou du service.»

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les remises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les remises nécessaires.»

Maintenance prévisionnelle : « 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. Elle est parfois improprement appelée maintenance prédictive».

La figure 3.15. illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle (notée  $I_{pc}$ ).

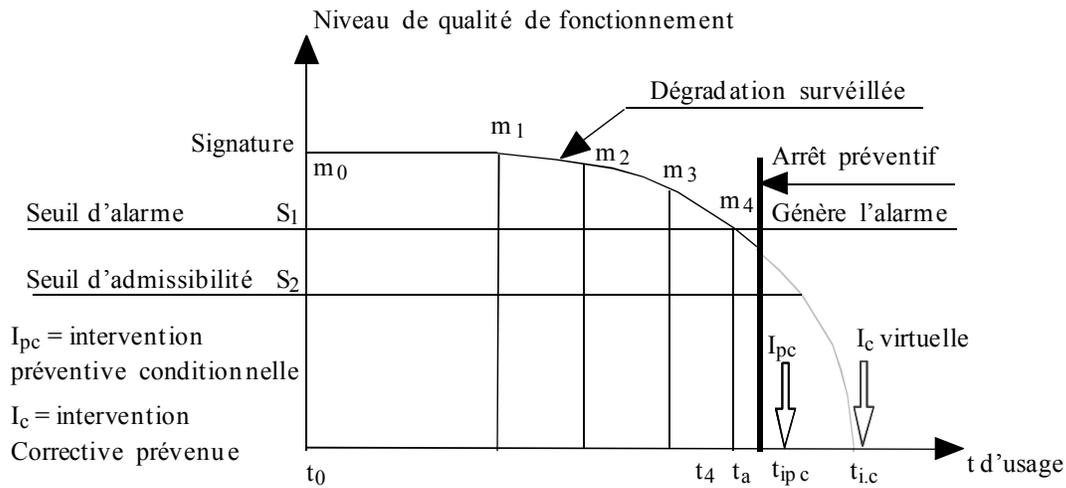


Figure 3.15: Principe de la maintenance conditionnelle

- La «signature» est une prise de référence de l'état de «bon fonctionnement» à l'origine
- Les mesures (cas le plus fréquent) peuvent être de simples observations visuelles (état constaté), des images (spectres, radios, etc.). Elles peuvent être remplacées par des alarmes préréglées (fusible, etc.), ou des inspections préventives in situ. Les mesures  $m_i$  peuvent être continues ou périodiques, espacées de  $\Delta t$  de telle manière que la dégradation à prévenir ne puisse échapper à la surveillance :

$$\Delta T < t_{\text{admissibilité}} - t_{\text{alarme}}$$

- Les mesures peuvent ne pas commencer à  $t_0$  (sauf signature) si l'on connaît la loi de dégradation. Les mesures peuvent être collectées par rondes ou «monitorées» à la centrale surveillance.
- L'arrêt sera généré automatiquement par l'alarme (cas d'un fusible), ou différé par décision volontaire jusqu'à  $I_{pc}$  programmé et organisée.
- L'intervention  $I_{pc}$  sera programmée à partir de l'alarme, suivant un temps de «réaction» du service maintenance à prédéterminer. Son coût direct  $CI_{pc}$  sera par nature (choix de dégradation à prévenir) très inférieur au coût (direct + indirect) de la défaillance évitée :

$$CI_{pc} \ll C_{ic}$$

---

### 2.2.2 Méthodologie de la mise en œuvre

La méthodologie est proposée en neuf étapes successives qui permettent de poser le problème de la maintenance conditionnelle à partir d'une défaillance à prévenir avant de choisir les matériels nécessaires, d'organiser la surveillance et de préparer l'Ipc

1. Sélection des défaillances à prévenir
2. Sélection d'un (ou n) paramètre physique
3. Choix des capteurs
4. Choix du mode de collecte des informations
5. Détermination des seuils
6. Choix du traitement de l'information
7. Définition des procédures après alarme
8. Organisation de l'intervention conditionnelle Ipc
9. Bilan d'efficacité de retour d'expérience

### 2.2.3 Les outils de la maintenance conditionnelle

Un démontage, un remplacement des pièces ou de sous-ensembles coûtent cher. Il constitue une perte de temps productif, un coût d'intervention du personnel de maintenance, un coût de pièce ou de sous-ensemble, un risque de mauvais montage, ...

La maintenance conditionnelle vise à en réduire au maximum la fréquence, tout en limitant les risques de défaillance. Le principe de la maintenance conditionnelle est de ne changer un élément que lorsqu'il présente des signes de vieillissement ou d'usure tels qu'ils mettent en cause, à brève échéance, ses performances.

Même si les interventions sont ainsi retardées, elles sont programmées en tenant compte des impératifs de production.

On s'appuie sur des mesures physiques qui sont :

- Mesure des vibrations et du bruit.
- Mesure des températures.
- L'analyse des huiles.

➤ Analyse des vibrations

Lorsque les machines sont en bon fonctionnement elles vibrent avec une fréquence bien déterminée. Ainsi leur spectre de fréquence de leurs vibrations a un profil particulier lorsqu'elles sont en état de «bon fonctionnement». Par ailleurs, dès que les phénomènes d'usure, de fatigue, de vieillissement apparaissent ces fréquences se modifient. L'analyse de vibration permet de détecter les perturbations du système. Ainsi elle devient un élément important de la maintenance conditionnelle.

Lors de l'analyse de vibration plusieurs paramètres peuvent être mesurés et sont porteurs de renseignement, tels que l'amplitude de vibration, la vitesse et l'accélération.

**Amplitude** : Cet indicateur sert à mesurer le faux rond de rotor des machines tournantes à l'aide des capteurs de proximité, véritables indicateurs de vibrations de l'arbre plutôt que des capteurs de contact fixés sur l'enveloppe extérieurs.

**Fréquences** : L'analyse de la fréquence permet d'identifier la provenance du défaut. Une modification dans le temps de certaines fréquences est un signe de défaut. Cette analyse peut se pratiquer à l'aide d'un analyseur de fréquence à balayage par exemple.

**L'angle de phase** : L'angle de phase permet de déterminer les positions du point haut du rotor et par suite, les positions de déséquilibre résiduel de ce dernier. Ainsi l'angle de phase constitue un paramètre important de diagnostic et de l'équilibrage des machines tournantes.

On distingue trois types des capteurs de vibrations permettant de suivre d'une façon permanente des divers indicateurs de l'état de fonctionnement des machines (voir tableau 2.3).

Tableau 3.3: Les différents capteurs de vibration

Capteur	Fonction	Avantages	Inconvénients
<b>Les capteurs de proximité</b>	Les capteurs de proximité permettent de mesurer le mouvement de l'arbre ainsi déterminant la provenance de vibrations	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesurer par moyen sans contact qui n'influence pas le mouvement vibratoire.</li> <li>- Le système modulaire, partie la moins coûteuse, le capteur n'exige pas son remplacement qu'en cas d'erreur mécanique.</li> <li>- Excellente réponse en fréquence, convient pour la plupart des environnements des machines.</li> </ul>	Le capteur de proximité est très sensible à la composition spécifique du matériau constituant l'arbre du moteur et il exige une alimentation extérieure, quelquefois difficile à installer.
<b>Les capteurs de vitesse</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Signal élevé dans les fréquences moyennes en fonction des environnements et de la température.</li> <li>- Absence d'alimentation extérieure.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- encombrement important</li> <li>- l'aspect de l'appareil compact nécessite un remplacement intégral en cas d'incident :</li> <li>- la présence des pièces mobiles dans l'appareil mécanique risque de se détériorer même par un usage normal</li> <li>- ne mesure que le mouvement dynamique.</li> </ul>
<b>Accéléromètre</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- facile à installer, il indique une bonne réponse en hautes fréquences</li> <li>- léger et petit</li> <li>- fort signal avec les hautes fréquences.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- grande sensibilité à la fréquence d'entrée</li> <li>- étalonnage difficile et un coût élevé</li> <li>- alimentation extérieure nécessaire</li> <li>- exige un certain filtrage pour les applications lors du suivi des indicateurs de l'état de fonctionnement des machines.</li> </ul>

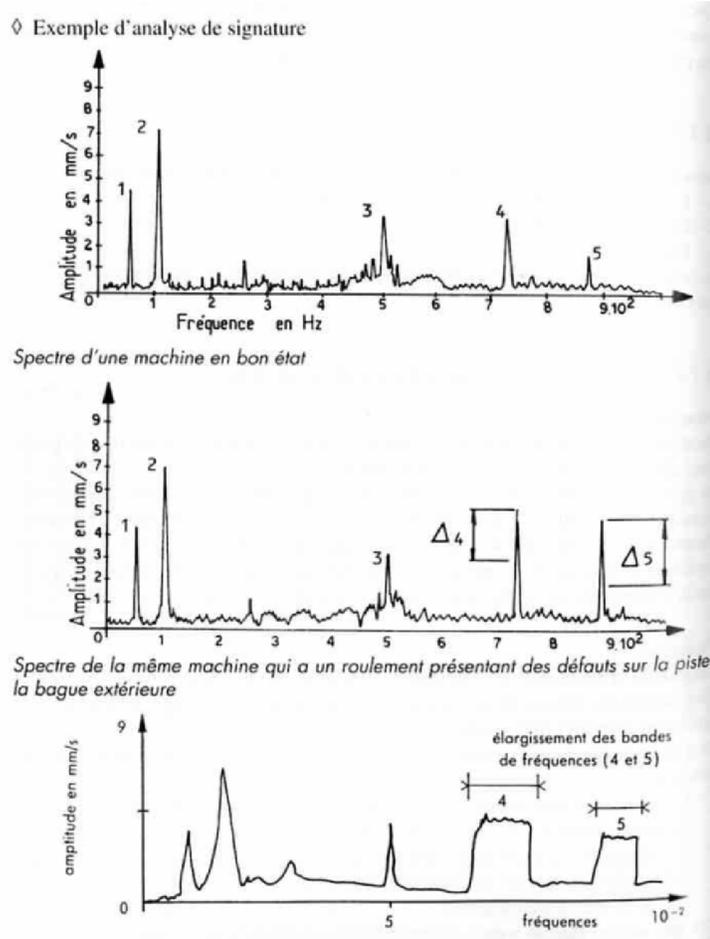


Figure 3.16: Exemple d'analyse de signature

➤ Analyse des températures

La mesure de la température d'une machine est importante car une variation de la température sur une machine tournante est souvent signe d'une dégradation et peut donc provoquer l'arrêt de fonctionnement et même la détérioration de la machine.

Plusieurs techniques permettent de déterminer ces mesures telles que la thermographie infrarouge.

**La thermographie infrarouge** est une technique qui permet de mesurer les luminances aux grandeurs radio métriques, d'établir la cartographie et de suivre son évolution au cours de temps. Le principe consiste à mesurer le rayonnement électromagnétique émis spontanément par les objets dès que leur température dépasse 0.

---

La thermographie infrarouge est utilisée en maintenance industrielle lorsque les dégradations du matériel est au niveau de l'utilisation. Cette technique a pour objectif principal de quantifier l'urgence de l'intervention.

Les avantages de cette méthode sont :

- une analyse rapide.
- absence de contact physique avec les objets à mesurer : objets chauds, en mouvement, sous tension électrique, inaccessible et polluants.

Les secteurs d'application de la thermographie sont :

- la pétrochimie
- l'électricité.
- le nucléaire.
- l'automobile.
- la verrerie,
- la papeterie

➤ Analyse d'huile

Les analyses d'huiles en service permettant d'une part de déterminer les moments adéquats de renouvellement d'un organe lubrifié en étudiant l'évolution et le degré de dégradation ou de la contamination d'huile entre deux vidanges, d'autre part de détecter sans démontage ni arrêt de matériel, les premiers symptômes de l'usure anormale d'un organe en étudiant les particules d'usures par le frottement des pièces en contact.

Deux facteurs principaux interviennent pour modifier les caractéristiques d'un lubrifiant et le rendre inapte à sa fonction :

1. La dégradation qui se produit généralement par oxydation ou usure sous l'action de la température et de l'oxygène ou de la cassure de la chaîne moléculaire entraînant une altération des caractéristiques de lubrifiant ainsi la formation des dépôts donc pour améliorer la durée de vie de lubrifiant on doit maintenir les réservoirs d'huiles à une température bien déterminée.
2. La contamination qui est provoquée soit par des débris d'usures, soit par des particules solides ou par des polluants solubles tels que les hydrocarbures et les solvants capables d'altérer les propriétés physiques et chimiques du lubrifiant.

La méthode d'analyse de la contamination des huiles présente plusieurs avantages :

- La réduction des vidanges en vérifiant périodiquement la qualité du lubrifiant et en contrôlant son taux de contamination.
- L'optimisation de la consommation d'huile.
- La minimisation du coût des pièces de rechanges.

### 3 LA MAINTENANCE CORRECTIVE

La maintenance corrective est, d'après la norme AFNOR X60-010 (AFNOR [1]), la maintenance effectuée après apparition d'une défaillance. Celle-ci étant de nature aléatoire, les tâches correspondant à cette forme de maintenance sont subies, et ne sont pas planifiables.

Ces tâches comprennent les opérations suivantes :

- détection et signalisation des anomalies,
- localisation de la panne (effet) et diagnostic (cause),
- réparation,
- test, puis remise en production,
- rapport d'intervention (éventuellement à l'aide d'un outil informatisé de saisie). Ce rapport est indispensable pour renseigner les bases de données sur les statistiques de fiabilité / disponibilité et sur les coûts.

L'efficacité des actions de maintenance corrective est liée à de nombreux facteurs, touchant à la fois à la **maintenabilité** des équipements, à la **compétence** et à la **disponibilité** des personnes, et à l'**organisation** de la **logistique de maintenance**.

Toute faiblesse dans ces facteurs se traduit par une perte de temps d'intervention, donc par une perte de production et un surcroît de coût.

En ce qui concerne la localisation des pannes et le diagnostic, quelques observations essentielles peuvent être formulées :

- une bonne analyse est basée sur une méthode de diagnostic préalablement définie, et nécessite une qualité d'information élevée (documents techniques, outils de recherche des pannes, etc.).
- la logique de recherche des défaillances d'un équipement n'est pas la même que sa logique de fonctionnement.
- pour un dépannage rapide, les informations suivantes sont notamment nécessaires :
  - visualisation des états en cours de la machine
  - visualisation des états antérieurs à l'anomalie

- historique des interventions déjà effectuées sur cette machine
- documentation technique et fonctionnelle de la machine
- outils d'aide au diagnostic et / ou procédures d'intervention préétablies, voire logiciel du type système expert.

Ces informations et ces outils doivent être mis à la disposition de l'agent de maintenance autant que possible « au pied de la machine défaillante » : c'est pourquoi des systèmes de terminaux associés à des réseaux locaux sont aujourd'hui mis en place dans les ateliers où une haute disponibilité est nécessaire (assemblage automobile, production de grande série en flux continu, etc.).

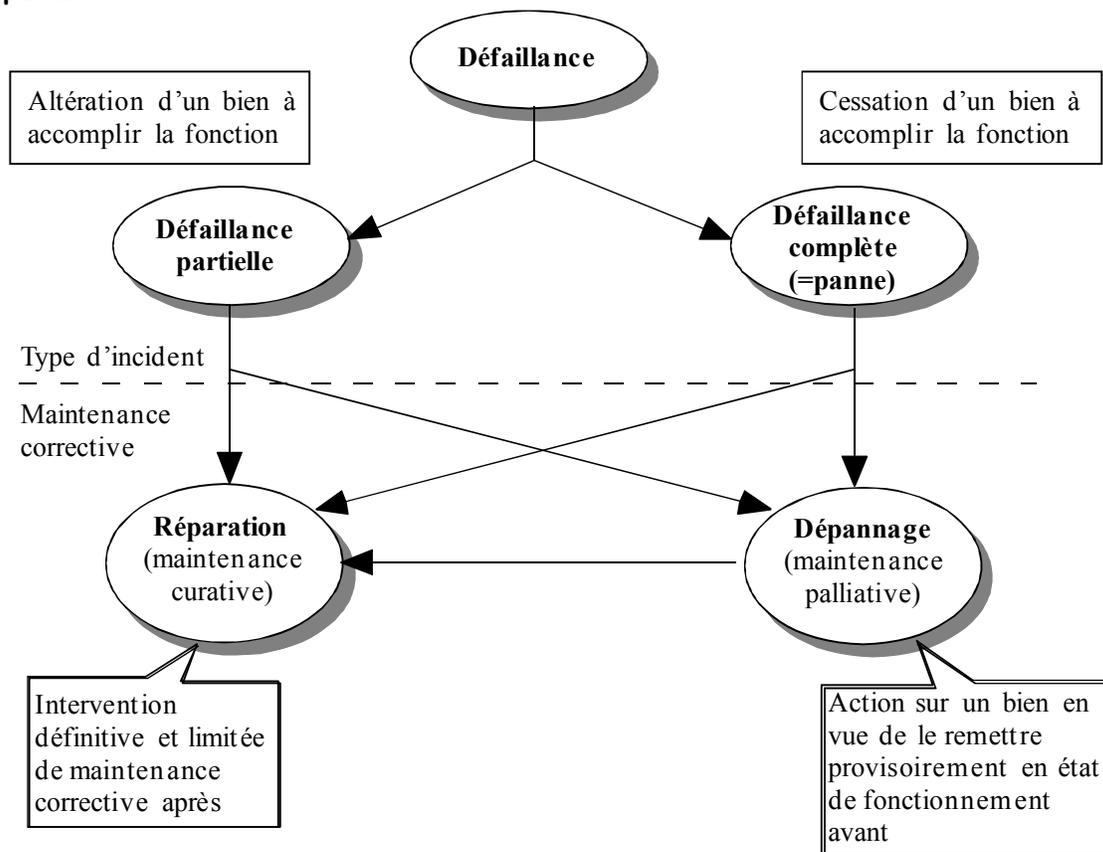
Enfin, un langage commun entre agents de maintenance et opérateurs de fabrication est essentiel pour un dépannage rapide.

**Tableau 3.4:** *Besoins associés à la réparation d'une machine*

Opération de maintenance	Besoin associé	Nature du besoin		
		Information	Matériel	Organisation
Identification de la machine en panne + Diagnostic de la panne	Localisation de la machine	X		
	Dossier technique	X		
	Outil de diagnostic		X	
Recherche des opérations de maintenance déjà effectuées sur cet équipement	Historique des incidents et opérations effectuées.	X		
	Pièces de rechange utilisées			X
Consultation de la gamme des opérations de maintenance (estimation du travail)	Manuel de maintenance de la machine	X		
Recherche des pièces de rechange dans le stock Actualiser l'inventaire	Pièces de rechange		X	
	Système de gestion de stock	X		X
Procéder à la réparation (après diagnostic), tester, remettre en route	Outillage de dépannage et de test		X	
Actualiser le dossier d'entretien machine. Réapprovisionner des pièces	Dossier d'entretien machine	X		X
	Système de gestion de stock	X		X

La maintenance corrective ne consiste pas nécessairement à effectuer la réparation complète d'un équipement défectueux (**maintenance curative**). En effet, une défaillance peut être partielle, et provoquer seulement l'altération d'un bien à accomplir la fonction requise, et non sa cessation (panne). D'autre part une réparation peut être parfois différée, pour diverses raisons.

C'est pourquoi une action peut être entreprise en vue de remettre l'équipement défaillant provisoirement en état de fonctionner. Il s'agit alors de dépannage, plutôt que de réparation, et l'action entreprise relève alors d'une opération de **maintenance palliative**.



**Figure 3.18** : Les différentes formes de la maintenance corrective (palliative et curative)

Bien que la maintenance préventive attire plus d'intérêt aux industriels, il est évident qu'on aura toujours des pannes donc on fait toujours recours à la maintenance corrective.

On a vu ici que la maintenance corrective peut être organisée d'une façon rationnelle et logique, certainement pas autant que la maintenance préventive, puisqu'elle ne peut pas être programmée à une date  $t$  comme le cas de la préventive

#### 4 CHOIX D'UNE POLITIQUE DE MAINTENANCE OPTIMISEE

La maintenance corrective engendre une perte importante d'heures de production, que pour être variable cela nécessite d'avoir des pièces de rechanges en stock, que les équipes de maintenance attendent la panne et sont rapidement disponible. En général ce type de gestion de la maintenance occasionne des coûts importants, diminue la disponibilité ainsi que la sécurité.

Par conséquent il doit être utilisé que lorsque d'autres méthodes préventives ne peuvent pas être appliquées, c'est en particulier le cas pour la prévention de panne dite «aléatoire» à taux de défaillance constant. Dans ce cas il est impératif de tout mettre en œuvre pour réduire la conséquence de la défaillance, les règles de bonne maintenabilité doivent être utilisées (Figure 3.18 et Figure 3.19).

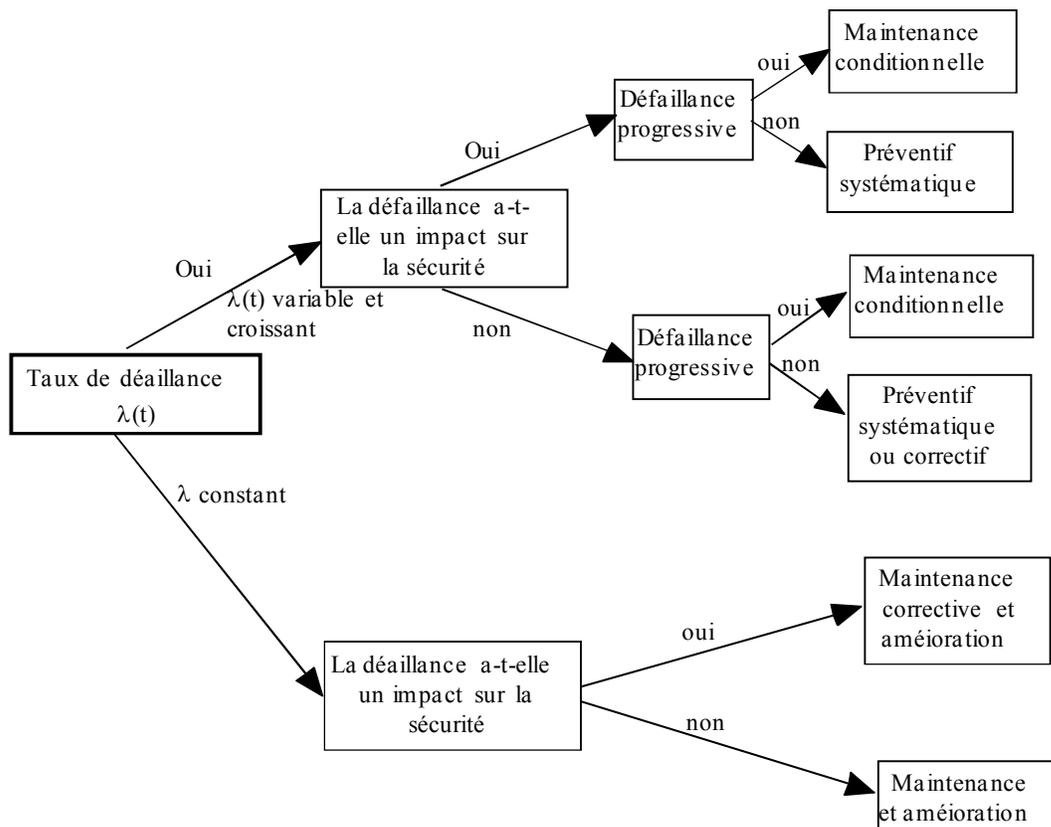
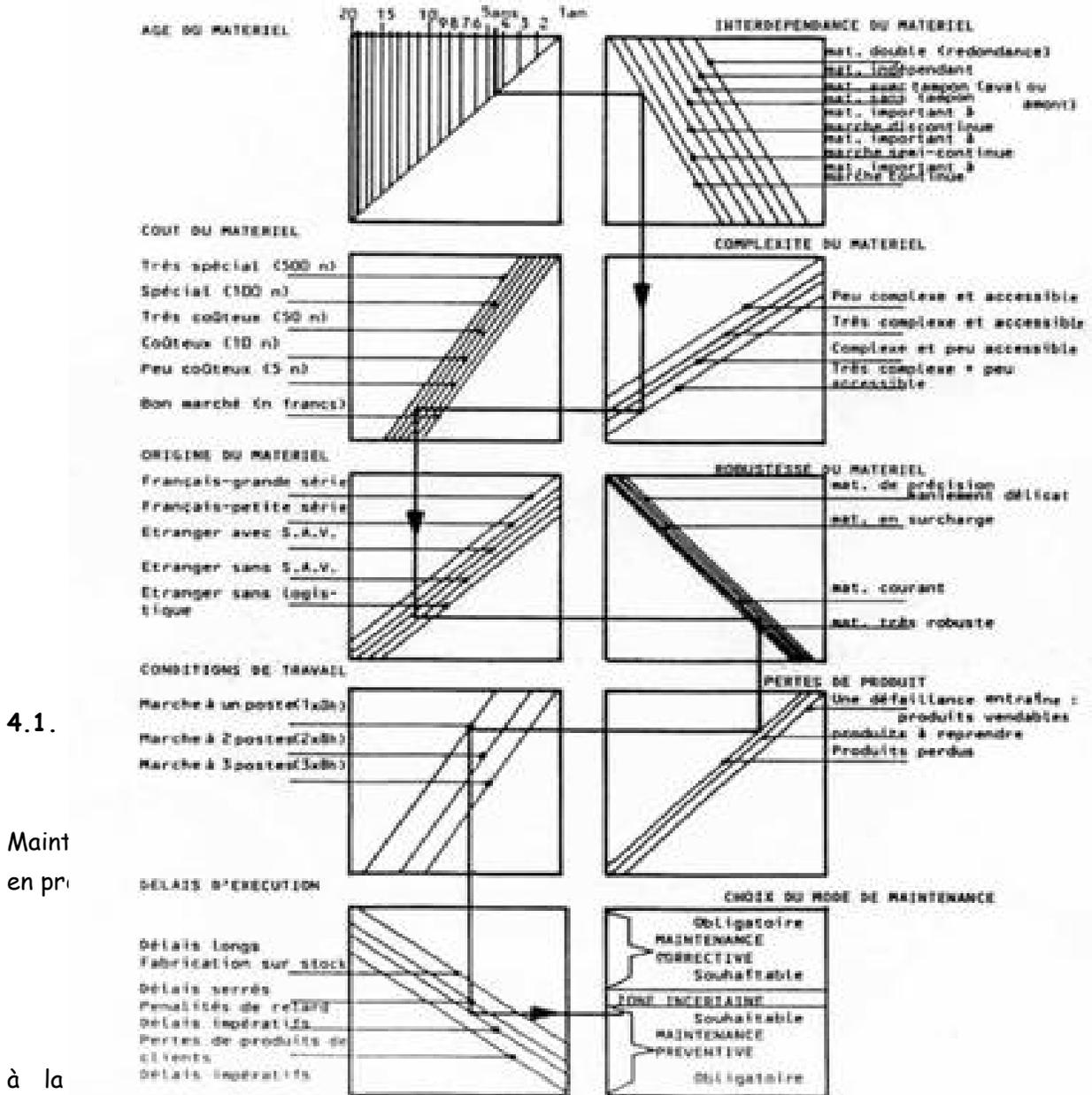


Figure 3.18: Arbre de décision d'une politique de maintenance



4.1.

Maint en pr

à la dysfo  
paragraphe 2.1.1.).

De cette analyse, il se dégage certains critères qui peuvent aider à choisir une politique de maintenance convenable.

---

**4.2. Politique de changement et critères :**

On se rend compte que l'on ne pourra pas tout optimiser à la fois. Il y aura des choix et des décisions à prendre.

En effet, pour un élément donné, si on veut maximiser la fiabilité (Problème de sécurité), le temps moyen d'utilisation ne sera pas optimum.

Une politique (P) de maintenance pourra être choisie suivant un ou plusieurs critères à optimiser.

En final, on peut dire que :

$$P=f(Q, G_{dS}, L_{cc}, C_T, D, S)$$

Où :

S: critère de sécurité

$C_T$ : critère coût lié à la maintenance et à la non maintenance

$L_{cc}$  : coût du cycle de vie,

D : critère disponibilité,  $D_i$  et  $D_s$

Q : qualité de produit sortant d'un système maintenu.

$G_{dS}$  : gestion des stocks de rechanges.

**4.3. Etude de cas :**

Cette étude a pour but de choisir une politique de maintenance parmi les 4 options proposées. Voir Annexe 1 pour l'étude de ce cas



## **CHAPITRE 4:** **Les Outils de la Maintenance**

---

Ce chapitre est un rappel du cours de contrôle et Fiabilité vu en 2<sup>ème</sup> année GI.

1. Les concepts de la Sûreté de Fonctionnement (Chapitre 3 Cours Contrôle et Fiabilité)
2. La Méthode MAC (Chapitre 7 Cours Contrôle et Fiabilité)
3. La Méthode AMDEC (Chapitre 9 Cours Contrôle et Fiabilité)

## CHAPITRE 5: Les fonctions de la maintenance

### 1 LA FONCTION METHODES MAINTENANCE

#### 1.1 Rôle du service Méthodes-Maintenance

##### 1.1.1 Fonctions opérationnelles du service maintenance

Monchy [12] propose la classification schématique suivante (Figure 4.1) :

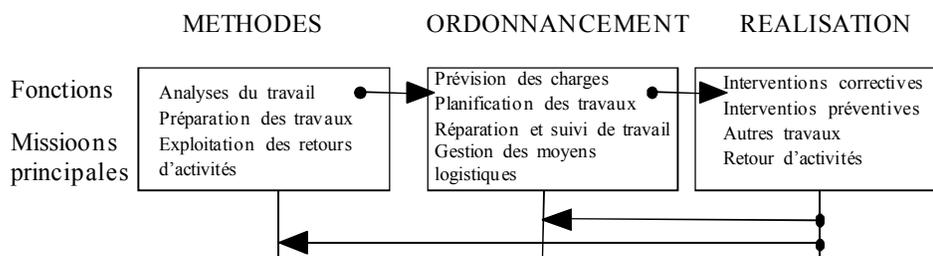


Figure 5.1 : Les trois fonctions opérationnelles de la maintenance

Les méthodes sont caractérisées par les verbes d'action **savoir**, **analyser**, **prévoir**, **anticiper** et **améliorer**.

L'ordonnancement par les verbes **planifier**, **coordonner** et **synchroniser**.

La réalisation par les verbes **effectuer**, **vérifier** et **rendre compte**.

La maintenance doit être à l'écoute des besoins de ses clients internes, la production en étant le principal. Il est naturel que le service ordonnancement prenne en compte le planning d'activité de la production et que le service méthodes soit associé à ses problèmes de qualité et de performance.

### 1.1.2. Champ des responsabilités des méthodes-maintenance

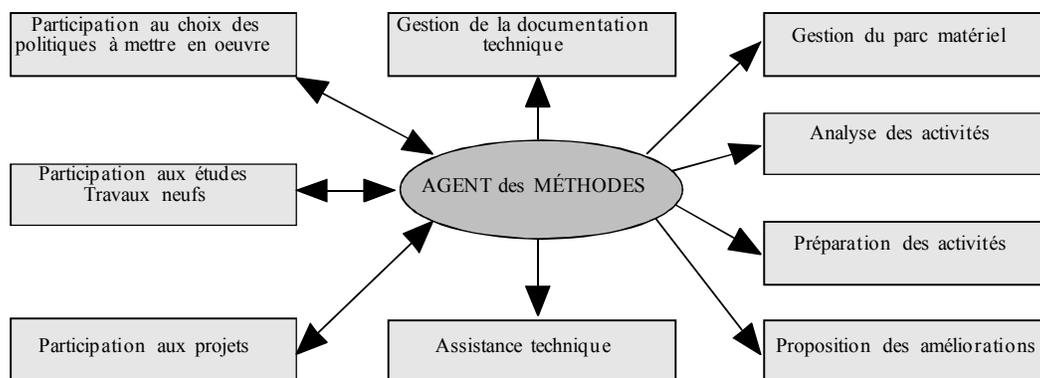
Pour sortir du cercle vicieux de l'entretien, il est indispensable de prendre du recul par rapport aux actions de routine du terrain, de les mesurer, de les analyser, de les critiquer afin de proposer des améliorations. La position du bureau des méthodes au sein du service maintenance est stratégique :

- c'est le relais des politiques, des orientations et des projets à mettre en œuvre;
- c'est le centre des ressources documentaires;
- c'est la plaque tournante émettrice et réceptrice de la plupart des flux d'information du service maintenance;
- c'est le centre de gestion des activités techniques, mais aussi de leur remise en cause;
- c'est le pôle de proposition des actions d'amélioration

Dans le cas de l'utilisation de l'outil GMAO, c'est le lieu privilégié de l'exploitation du système.

Pour assurer ces fonctions l'entreprise doit disposer d'un agent des méthodes polyvalent et généraliste, à la fois homme de bureau et de terrain.

Les domaines de responsabilités de l'agent des méthodes sont illustrés sur la Figure 4.2. :



**Figure 5.2:** Les domaines de responsabilité de l'agent des méthodes

## 1.2. L'analyse des temps de maintenance

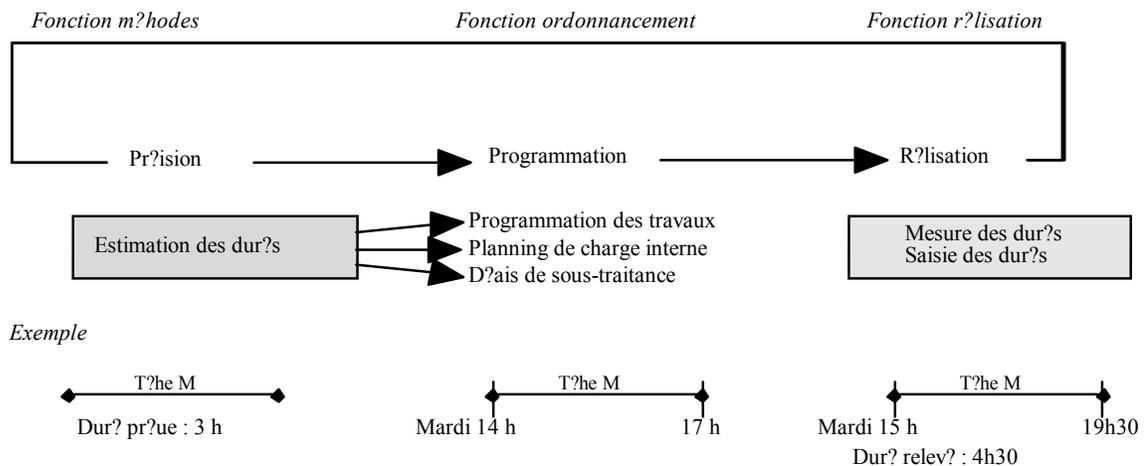
### 1.2.1. Temps de maintenance et classification

La maintenance a la spécificité de devoir maîtriser à la fois les **temps-machines** (alternance de temps de bon fonctionnement et de temps d'arrêt) et le **temps d'activité** de ses techniciens d'intervention.

- Les *temps-machines* concernent les états successifs caractérisant la «disponibilité» et la «non-disponibilité» des systèmes. Pour ces temps, des saisies automatiques de dates et de durées ou de relevés de compteurs associés à des systèmes d'imputation des causes d'arrêt seront nécessaires.
- Les *temps caractérisant une intervention humaine* posent un problème de saisie beaucoup plus délicat. Comme leur connaissance est aussi indispensable que la connaissance des temps-machines, un effort d'explication destiné aux techniciens est souvent nécessaire, avec ou sans GMAO.
- La maîtrise des temps précédents, résultant de la performance intrinsèque de l'équipement (fiabilité) et de performance humaine associée aux arrêts (maintenabilité et logistique de maintenance), permet de gérer la maintenance de l'équipement à partir de l'analyse des causes d'indisponibilité et d'indicateurs.

### 1.2.2. Temps d'activité humaine

La maîtrise des temps d'activité de tous les techniciens de maintenance est à la base de la pyramide de la gestion d'un service de maintenance. Sans estimation de «temps alloués», pas de planification des activités internes ou externalisées. Sans estimation de temps, pas de coûts prévisionnels, donc pas de gestion prévisionnelle. Sans relevés de temps passés, pas de coûts de maintenance, donc pas de gestion possible du budget. Sans relevés exacts de temps passés, pas d'analyse des activités, donc pas de proposition d'amélioration.



**Figure 4.3:** Temps prévus, programmés, passés et relevés

**\* Les difficultés liées à l'obtention des temps passés :**

1. Face au problème de la traçabilité des temps, une grande méfiance subsiste, résurgence de l'époque Taylorienne, lorsque les gens étaient payés à la pièce. Certes anachronique, cette méfiance pénalise encore parfois l'organisation des saisies des «temps passés», soit par une opposition systématique de principe soit par une incompréhension de l'objectif qui amène à fausser volontairement les saisies. Les «temps relevés» ne sont pas automatiquement les «temps réellement passés».
2. Pour être exploités, les temps portés sur les BT manuels doivent être lisibles : ce n'est pas toujours le cas !
3. Autre problème, quel temps porter lorsqu'une opération corrective comporte plusieurs phases distinctes : observation in situ, diagnostic, préparation, dépose, intervention proprement dite, essais, etc. et que l'on a attendu 20 minutes que le magasinier trouve la pièce mal référencée.
4. Enfin, lors de mini-interventions correctives, doit-on passer 10 minutes à saisir les paramètres d'une action de 2 minutes ?

Temps non relevés, erronés, incomplets, non homogènes, illisibles, etc. Trouver des parades à ces difficultés n'est pas mineur, car sans la maîtrise des temps passés, l'édifice «gestion de la maintenance» s'écroule.

**Remarque :** L'utilisation d'une GMAO facilite la gestion des temps de la maintenance, mais ne résout «automatiquement» aucune des difficultés précédentes.

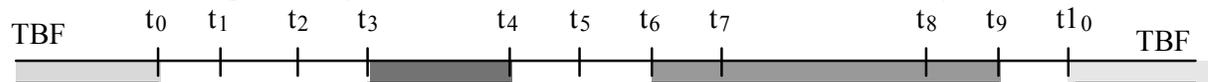
**a. Nature des durées d'intervention de maintenance :**

Les temps de maintenance comprennent les temps de maintenance préventive et les temps de maintenance corrective. Ceux-ci comprennent les temps actifs et les temps annexes. Les temps actifs de maintenance corrective comprennent :

- temps de localisation de la défaillance,
- temps de diagnostic
- temps de dépannage ou de réparation,
- temps de contrôle et d'essais finals

Les temps annexes de maintenance comprennent :

- temps administratifs (temps de saisie, de traitement de document, etc.),
- temps logistiques ou durées d'attente des ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance,
- temps techniques annexes (exemple : phase de refroidissement d'un équipement),
- temps de préparation de travail (études, méthodes, ordonnancement, etc.)

**\* Chronologie des phases d'une intervention corrective «moyenne»**

**Figure 5.4:** Chronologie des temps actifs et annexes de maintenance

Avant  $t_0$  et après  $t_{10}$  : durées de bon fonctionnement notées TBF.

$(t_0-t_1)$  : de l'émergence à la détection d'une panne.

$t_1$  : émission DT, demande de travail

$t_2$  : accusé de réception; la DT est enregistré au service maintenance

$t_3$  : prise en charge par un technicien disponible.

$(t_3-t_4)$  : tests, localisation, diagnostic, expertise

$(t_4 - t_5)$  : préparation de l'intervention, consignation, procédures de sécurité

$(t_5 - t_6)$  : programmation, attente d'approvisionnement.

$t_6$  : lancement de l'OT, ordre de travail

$(t_6 - t_7)$  nettoyage, accès, dépose sous-ensemble

$(t_7 - t_8)$  démontage et intervention proprement dite

$(t_8-t_9)$  : remontage et repose

$(t_9-t_{10})$  : essais, contrôles, réglages, déconsignation.

$t_{10}$  : l'équipement est opérationnel (TBF)

---

**Remarque :**

Les valeurs relatives de ces temps «en série» sont très variables suivant la nature des technologies défaillantes.

**\* Quel temps faut-il saisir pour mesurer des TTR (time to repair) ?**

Il semble logique de mesurer le temps de réparation par le temps «actif» de maintenance au sens de la norme. Mais dans ce cas, il faut effectuer une saisie double  $(t_3-t_4) + (t_6-t_{10})$  alors que la réparation est caractérisée par  $(t_7-t_8)$  seulement.

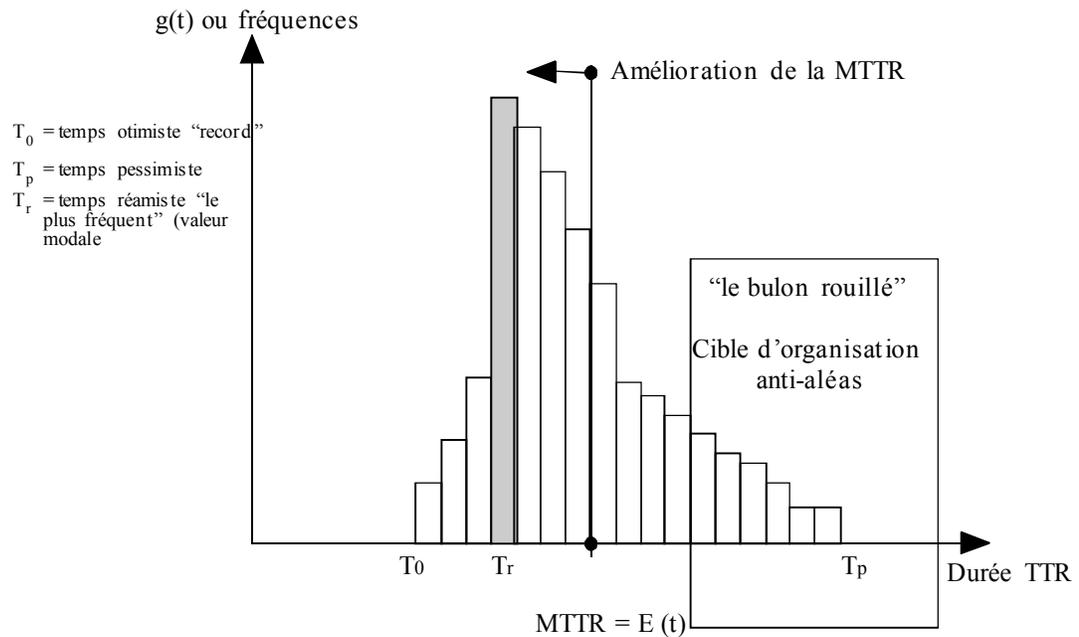
Une réflexion interne consensuelle est nécessaire de façon à définir la «règle du jeu» accepté et comprise par tous les techniciens d'intervention. En effet, ce temps servira de base à l'évaluation de l'ordre de travail et à l'estimation de la MTTR indispensable à l'évaluation de la disponibilité de l'équipement.

**b. Analyse de maintenabilité : distribution des durées d'intervention****\* Hypothèses**

Soit une intervention  $I_c$  réalisée  $N$  fois et connue par retour d'expérience (par exemple, le changement du disque d'embrayage sur une voiture  $V$ )

**\* Allure de la distribution  $g(t)$** 

L'histogramme des TTR et la fonction de distribution  $g(t)$  se s'en déduit par lissage du polygone des fréquences (cas d'un grand échantillon) ont toujours la même allure, caractérisée par une dissymétrie forte entre les temps minimaux dits «optimistes» et les temps maximaux dits «pessimistes» comme l'indique la Figure 4.5.



**Figure 5.5:** Allure de la distribution des durées d'intervention

La MTTR est approximée par la moyenne statistique des durées mises en classes ou se calcule par l'espérance mathématique de la variable TTR lorsque l'on utilise une loi de probabilité.

Cette courbe est très riche d'enseignements :

1. Améliorer la disponibilité d'un équipement est un objectif habituel de la maintenance. Il passe par l'amélioration de la maintenabilité, paramétrée par la MTTR. Travailler vite n'est jamais la solution. Le gain sur la MTTR serait faible. De plus, la réactivité attendue des interventions de maintenance ne doit pas se faire au détriment de la qualité.

L'expérience montre que c'est par la réduction des temps les plus longs que l'on va améliorer significativement la MTTR. En observant tous les aléas qui pénalisent les interventions et en anticipant par une meilleure préparation, par un « lancement » efficace, par l'organisation rationnelle de la logistique de soutien (documents de travail, outillages adaptés et disponibles, rechanges disponibles, etc.).

Il suffit de suivre une intervention sur le terrain pour cibler de gisements d'amélioration : déplacements inutiles, attente de moyen de levage, outillage inadapté, accès scabreux et improvisés, nettoyages longs faute d'entretien régulier, schéma

non à jour, rechanges absents du magasin, etc. (exemple du boulon rouillé).

2. Une bonne prévision des temps n'est jamais faite pour être exacte, mais telle qu'elle soit mi-optimiste et mi-pessimiste. La MTTR obéit à ce critère probabiliste, et c'est elle qui doit être portée comme «temps alloué», et non le temps réaliste  $T_r$  car la valeur modale est distincte de la moyenne pour toutes distributions dissymétriques.
3. La maintenabilité intrinsèque est un critère déterminant, puisque le gain de performance inclus à l'origine vise la zone des aléas potentiels. Le gain est obtenu par l'accessibilité bien pensée, par l'alarme de localisation de défaut intégré, par la modularité qui permet un échange standard rapide, etc.

**Bilan** : mieux vaut passer du temps à organiser une intervention, à anticiper les difficultés pour pouvoir travailler bien plutôt que de vouloir travailler vite ! Malgré l'impatience du client qui attend...

### c. Estimation des durées d'intervention

#### \* Méthode d'estimation d'une «durée prévue» à partir de la loi $\beta$

##### **Hypothèse :**

Si l'on doit prévoir une durée d'intervention, elle appartient à la population distribuée selon le modèle décrit (Figure 4.5). Pour une intervention préparée (contenu, moyens et ressources définis), la MTTR et l'écart-type sont estimés par les formules :

$$MTTR = \frac{T_0 + 4 T_r + T_p}{6} \text{ et } \sigma = \frac{T_p - T_0}{6} \quad (3.23)$$

Ces formules sont déduites de la loi  $\beta$  à deux paramètres  $p$  et  $q$ . Elles sont applicables sous certaines conditions généralement vérifiées pour les distributions du type étudié. Ces relations sont également utilisées pour l'estimation des durées de tâches et à l'évaluation du délai pour l'; méthode PERT.

Ces formules sont applicables «à priori» (estimation de  $T_0$ ,  $T_r$ ,  $T_p$  a priori) ou «a posteriori» par retour d'expérience de taille  $N$ . Si  $N$  données  $> 50$ , le préparateur estime le temps optimiste  $T_0$  tel que 10% des temps lui soient inférieurs, le temps pessimiste  $T_p$  tel que 10% des temps lui soient supérieurs et le temps le plus fréquent  $T_r$ .

La MTTR ainsi facilement estimée est telle qu'il y a la même probabilité de ne pas

l'atteindre que de la dépasser, ce qui caractérise une bonne prévision.

### \* Autres méthodes de prévision des durées d'intervention

- L'estimation « au jugé » est basée sur l'expérience du technicien. Celui-ci donnera spontanément le temps réaliste  $T_r$  et non le temps moyen MTTR cherché.
- Les méthodes déduites du MTM (Method Time Measurement) sont basées sur la décomposition en mouvements élémentaires donnant des standards de temps prédéterminés. Certains standards «MTM degrés supérieurs» sont adaptés à quelques tâches répétitives de maintenance.
- Les standards de temps sont développés en interne par exploitation statistique des retours d'expérience. Ils permettent des interpolations et des corrections par facteurs d'environnement.
- La technique des «blocs de temps» utilise la vidéo pour connaître certains temps opératoires, mais elle est surtout utilisée pour analyser puis optimiser des successions d'opérations dans le cadre d'une réorganisation.
- Le chronométrage est mal vécu : à l'impression d'être jugé s'ajoute un changement d'allure, volontaire ou non, qui fausse le résultat.
- La méthode des observations instantanées permet d'estimer des temps d'états différents d'un processus continu à partir d'observations instantanées réalisées par campagne.

### Exemple :

L'exemple simple de la Figure 4.6 illustre le principe de la méthode des observations instantanées à partir d'une succession de Marche/Arrêt dont on veut quantifier la proportion.

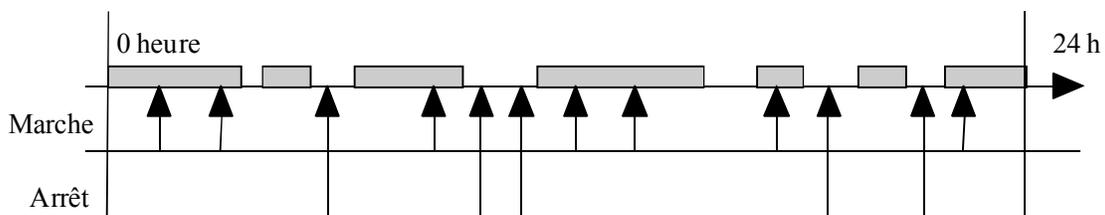


Figure 5.6. : Principe de la méthode des observations instantanées

Douze observations ont été faites à des instants pris «au hasard», donnant  $p = 7$  Marche et  $q = 5$  Arrêt, soit une estimation de l'engagement de  $7/12 = 0.58$  soit 58%

pour l'état Marche. Sur 24 heures, l'équipement aura donc fonctionné 14 heures.

### 1.2.3 Temps d'état des équipements : disponibilité/indisponibilité

#### \* Vocabulaire d'après CEN WI 319-003

Temps requis		Temps non requis		Temps requis		Temps non requis	
<b>MTI</b>	/	Etat vacant	Etat d'attente	<b>Etat de fonctionnement</b>	Etat d'incapacité externe		
Etat indisponible		Temps disponible					

**Figure 4.7:** Définition des différents états d'un équipement de production

- *Etat d'indisponibilité :*

état d'un bien caractérisé soit par une panne, soit par une incapacité interne (maintenance préventive par exemple). La case MTI (moyenne de temps d'indisponibilité) correspond à l'état de génération de coûts d'indisponibilité propre  $C_i$  : le système étant requis, il y a perte de production.

- *Etat vacant :*

état d'un bien qui est disponible et en état de non-fonctionnement pendant un temps non requis.

- *Etat d'attente :*

état d'un bien qui est disponible et en état de non-fonctionnement pendant un temps requis.

- *Etat d'incapacité externe :*

état d'un bien disponible, mais qui manque de ressources externes nécessaires.

A chaque état correspond un temps.

#### \* Vocabulaire d'après l'AFNOR X 60 - 020

La Figure 4.8 met en évidence une difficulté de la saisie des temps d'indisponibilité : un compteur relèvera l'alternance MTBF et des MTA, ce qui est insuffisant pour discriminer les trois temps de non-production de natures différentes. Il est nécessaire d'ajouter un boîtier d'imputation des causes d'arrêt.

En effet, la responsabilité de la maintenance, n'est engagée que pour les temps

propres d'indisponibilité, nommés MTI, le système étant requis. Ces temps d'indisponibilité propre serviront de base aux estimations des coûts de défaillance. De plus, à l'intérieur de cette indisponibilité propre, il est nécessaire de dégager les temps actifs et les temps annexes de maintenance pour estimer la MTTR et pour identifier les anomalies.

Temps requis	Temps non requis	Temps requis			Temps non requis
<b>MTI</b>		Etat vacant	Etat d'attente	<b>Etat de fonctionnement</b>	Etat d'incapacité externe
Etat indisponible	Temps disponible				

**Figure 5.8:** Les temps d'indisponibilité

**Remarque :**

Un cas intéressant relatif aux systèmes non requis concerne les systèmes de sécurité en stand by : sollicités, ils peuvent se révéler indisponibles, donc non opérationnels. Leur état est donc «masqué», ce qui représente un danger potentiel. L'analyse des modes de défaillances hors services se nomme «opérationnal readiness».

**\* Conclusion**

La connaissance de tous ces temps d'état à partir des mesures objectives va permettre la tenue d'un tableau de bord de gestion technique de chaque équipement sensible.

Par graphes d'évolution et par ratios comparatifs. Ce tableau de bord est un outil majeur d'analyse et de proposition d'améliorations, à la condition que tous les acteurs se mettent d'accord sur une règle du jeu (quel temps porter?) consensuelle.

## 1.3 Analyse des coûts de la maintenance

### 1.3.1 Aspect économique de la maintenance

Le chef de l'entreprise confronté à ses échéances financières sait que les coûts directs de la maintenance représentent un poste de dépenses important et bien visible. Le fait que la maintenance soit en même temps un **gisement de productivité** est un fait avéré, mais moins visible. En effet, les coûts indirects, conséquences d'une maintenance

insuffisamment performante «s'évaporent» de la comptabilité analytique, mais se retrouvent inexorablement dans le coût de la production.

La maintenance est donc un champ d'action privilégié de la recherche d'amélioration des coûts de production, et c'est la seule source significative de compétitivité indépendante des conditions extérieures : elle ne repose que sur le professionnalisme de l'entreprise relativement à la maîtrise de l'ensemble de son système de production.

*Le maintien de la production en quantité et en qualité passe par l'efficacité de la maintenance de l'outil de production.*

### 1.3.2 Coûts de la maintenance corrective

Soit :

$$C_d = C_m + C_i$$

$C_d$  : le «coût de défaillance», résultant des coûts directs et indirects d'une ou d'un cumul de défaillances relatives à un équipement.

$C_m$  : le «coût direct de la maintenance» de caractérisation simplifiée «pièces et main d'œuvre».

$C_i$  : «coût d'indisponibilité» caractérisant le coût cumulé de toutes les conséquences indirectes induites par l'indisponibilité propre de l'équipement.

#### a. Coûts directs de maintenance $C_m$

Ils peuvent se rapporter à une intervention corrective ( $C_{mc}$ ), préventive ( $C_{mp}$ ) ou externalisé. Dans ce dernier cas, la facture du prestataire du service permet la valorisation directe de l'intervention.

#### \* Coûts prévus et coûts réalisés

Comme les temps, les coûts ont un double aspect «prévision» puis «réalisation»:

- les coûts prévus sont des estimations d'engagement de dépenses liées à une activité,
- les coûts réalisés sont obtenus à partir de la valorisation des BT (bons de travail comportant les paramètres d'une intervention).

#### \* Constitution des coûts directs de maintenance ( $C_{mc}$ et $C_{mp}$ )

##### - Coût de la main d'œuvre

C'est le produit «temps relevé x taux horaire» ou :  $TTR \times \tau_1$

- Le temps relevé doit coïncider avec le temps passé TTR. il est saisi sur le bon de

travail (BT) après vérification par le chef d'équipe.

- Le taux horaire  $\tau$ , exprimé en dinar/heure, est fourni par le service comptable.

- Frais généraux du service maintenance

Ce sont les frais fixes du service, estimés à l'année et ramenés à l'heure d'activité. Ils comprennent les appointements des cadres, des employés de bureau, les loyers et assurances, les frais de chauffage, d'éclairage, de reprographie, de communication, etc.

- Coûts de possession des stocks, des outillages, de machines

Aux frais de magasinage sont ajoutées les pertes et dépréciations dues au stockage.

- Consommation de matières, produits et fournitures utilisées

L'exécution des tâches de maintenance exige de nombreuses fournitures, connues sur factures.

- Consommation de pièces de rechange

C'est un poste important en maintenance, évalué à partir des factures d'achat qu'il faut actualiser (pièce dormante pendant plusieurs années, mais stratégique) et corriger par la prise en compte des frais de transport, du coût de passation de commandes, des frais de magasinage et de l'éventuelle dépréciation.

- Coûts de contrats de maintenance

La maintenance de certains matériels spécifiques est parfois externalisée : le montant du contrat est négocié, généralement à l'année.

- Coût des travaux sous-traités

Ils sont connus par la facture du prestataire, puis éventuellement majorés par un taux de «participation du service» sous forme de prêt de matériel, renseignements et assistance, contrôle, etc.

**\* Total des coûts directs de la maintenance**

Il est possible de regrouper les coûts de maintenance sous quatre rubriques :

- $C_{mo}$  dépenses de main-d'œuvre,
- $C_f$  dépenses fixes au service maintenance,
- $C_c$  dépenses de consommables,

---

-  $C_e$  : dépenses externalisées

$$C_{m0} + C_f + C_c + C_e = C_m$$

### Exploitation

Lorsque le coût direct de maintenance est imputé à une somme d'interventions, le cumul des  $C_m$  permet une ventilation afférente à un équipement, à un type de matériel, à un secteur ou à un type d'activité (correctif par niveau, préventif, révision, modernisation, rénovation, etc.). L'utilisation d'une GMAO facilite considérablement ces mises en familles adaptées à des analyses économiques pertinentes.

#### **b. Coûts indirects d'indisponibilité $C_i$**

Ces coûts indirects d'indisponibilité intègrent toutes les conséquences économiques induites par un arrêt propre d'un équipement requis. Ils sont parfois nommés coûts de perte de production ou coût de non-maintenance. Ils sont difficilement chiffrables (perte de l'image de marque de l'entreprise suite à une défaillance) mais ils sont réels.

##### o Constitution des coûts d'indisponibilité $C_i$

Les conséquences d'une défaillance fortuite sur un équipement requis peuvent porter sur les éléments suivants :

- La perte de production  $C_p$ . Il est bien évident que, pendant un arrêt en fin de ligne de production (montage, par exemple), les produits non fabriqués ne sont donc pas non vendus, mais sont vendus par la concurrence. C'est le poste principal qu'il est possible d'estimer par la formule :

$$C_p = \tau_2 \times T_i$$

$T_i$  est le temps d'indisponibilité propre relevé pendant une période où l'équipement défaillant est requis. A défaut, le temps d'arrêt de production  $T_A$  peut être utilisé. Mais dans ce cas existent des coûts de perte de production pendant  $T_A$  non imputables à l'équipement (temps d'attente et temps d'indisponibilité pour causes externes).

$\tau_2$  est le taux horaire, exprimé en dinars/heure, déterminé pour l'équipement considéré. Il dépend majoritairement de la criticité de l'équipement à l'intérieur de l'ensemble du système de production. Des péréquations permettent de répartir les

pertes globales estimées sur l'année en les ramenant à l'heure d'activité de production et à chaque équipement sensible affecté d'un coefficient de criticité. Ce taux par équipement doit être fourni à l'agent des méthodes chargé de l'optimisation de la politique de maintenance. Lorsque le taux  $\tau_2$  intègre tous les critères de perte suivants, la formule devient :

$$C_i = \tau_2' \times T_i$$

en sachant que  $C_i$  est toujours minoré.

- Le coût de la main-d'œuvre de production inoccupée pendant  $T_i$ ,
- Le coût d'amortissement (non réalisé) du matériel arrêté, le coût du matériel excédentaire.
- Le coût des arrêts induits. Particulièrement en flux tendu sur une ligne de production, faute de stocks tampons, l'arrêt d'une unité perturbe rapidement les unités amont (saturation) et aval (pénurie). Les systèmes actuels et leur organisation sont à la fois très performants et très vulnérables à la panne.
- Le coût des rebuts et de la non-qualité,
- Les frais de redémarrage de la production. Souvent, le redémarrage d'un process (hors  $T_i$ ) induit une période de perte de matière ou de qualité qui oblige à éliminer les produits fabriqués.
- Les coûts induits en cas d'accident corporel. Une panne fortuite traitée dans l'urgence est malheureusement parfois génératrice d'accidents du travail en interne ou de dommage corporel au niveau des usagers.
- Les coûts induits par les délais non tenus. Pénalités de retard, perte de client ou dégradation de l'image de marque de l'entreprise.

### **c. Coûts de défaillance $C_d$**

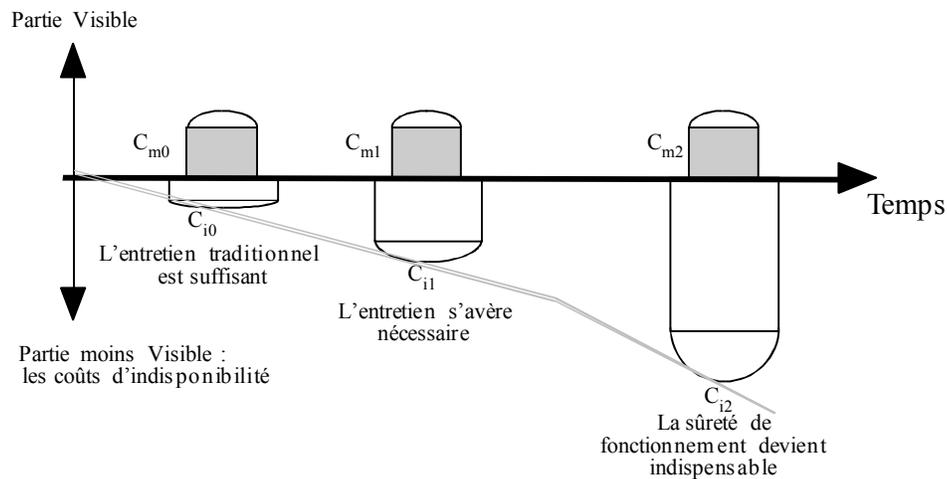
Rappelons que le coût d'une défaillance ou le coût d'un cumul de défaillances relatives à un équipement est donné par :

$$C_d = C_m + C_i$$

L'estimation du coût de défaillance et son suivi périodique n'ont d'intérêt que pour quelques équipements clés dont les répercussions des indisponibilités sont économiquement sensibles.

- Evolution des  $C_d$  et du besoin de maintenance

Nous allons envisager l'évolution du ratio  $r = C_i/C_m$  dont la croissance de 0 à 1, 10, 100 traduit le besoin de maîtriser le comportement des systèmes par la maintenance et, au-delà, d'utiliser les techniques de la sûreté de fonctionnement pour assurer une bonne indisponibilité à l'origine.



**Figure 5.9:** Evolution des coûts d'indisponibilité

L'image traditionnelle de «l'iceberg des coûts» de la Figure 4.9 montre que les coûts directs  $C_m$  liés aux défaillances sont d'une part bien «visibles», d'autre part sensiblement constants.

Par contre, les coûts  $C_i$  des conséquences des défaillances subissent une forte croissance sur les équipements sensibles utilisés «en série» et gérés en flux tendus. Ils ne se révélant qu'à posteriori, et seulement de façon partielle, tout au moins sur le plan comptable.

**Remarque :**

Dans un même atelier, deux machines voisines peuvent engendrer l'une des  $C_i = 0$ , l'autre des  $C_i$  critiques. La sélection des équipements en fonction de leurs coûts d'indisponibilité estimés est donc un prérequis au choix de la politique préventive à leur appliquer.

- Optimisation des coûts de défaillance  $C_d$

$C_m$  et  $C_i$  varient en sens inverse, dans la mesure où la réduction des temps d'indisponibilité est le résultat d'une maintenance préventive plus efficace.

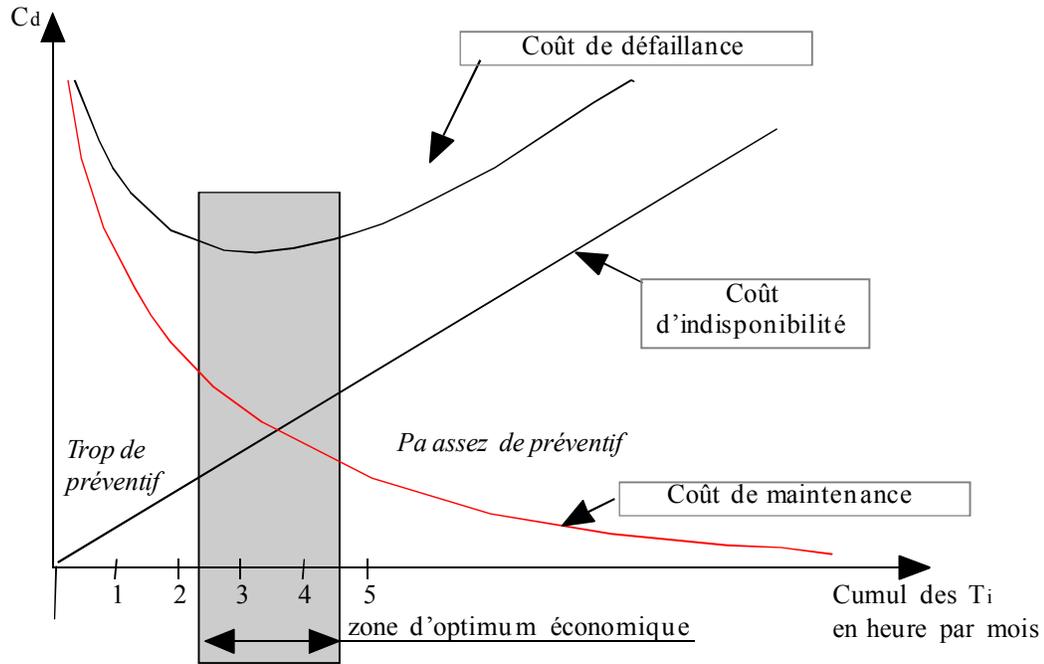


Figure 5.10: Quel soin préventif apporter à un équipement?

La Figure 4.10. met en évidence la proportionnalité  $C_i = \tau \times T_i$ , les  $T_i$  étant relevés en heures d'indisponibilité par semaine ou par mois. Les coûts directs de maintenance sont dans ce cas surtout préventifs, le graphe montrant l'existence d'une «limite» de disponibilité intrinsèque qui demande trop de coûts directs pour être approchée. Dans notre exemple, vouloir avoir moins de 2.5 heures d'indisponibilité par mois exigerait trop de soins préventifs.

### 1.3.3 Coûts de maintenance préventive

Les coûts de maintenance préventive ( $C_{mp}$ ) varient logiquement à l'inverse des coûts directs de maintenance corrective ( $C_{mc}$ ). En fait, la stratégie de maintenance permet de choisir librement le niveau de soin préventif à organiser sur un équipement. Dans ce cas, les coûts correctifs deviennent des coûts résiduels.

**a. Cas de la maintenance systématique**

Le coût total annuel de la maintenance d'un équipement peut se simuler sous la forme :

Coût total = Coût du préventif systématique + Coût des défaillances résiduelles

$$C_{total} = \frac{t}{T} C_{mp} + C_d \lambda t$$

t est la période de référence (1 an, par exemple) exprimé en heures

T est la période d'intervention systématique

t/T est le nombre d'Ips pendant la période de référence.

$\lambda$  est les taux de défaillance résiduelle, en panne/heure,

$C_{mp}$  est le coût d'une Ips

$C_d = C_{mc} + C_i$  est le coût d'une défaillance résiduelle.

En règle générale, il appartient aux agents des méthodes de programmer les interventions préventives sans perturber la production. Les interventions seront donc réalisées en dehors du «temps requis», soit en profitant d'un arrêt programmé (voir fortuit) de production ou d'une révision, soit en utilisant des plages d'intervention en dehors de l'horaire de production (exemple des équipes VSD, vendredi, samedi, dimanche).

Sauf exception, les coûts de maintenance préventive systématique ne seront donc associés à aucun  $C_i$ . Ils sont constitués de la même façon que les coûts de la maintenance corrective «pièces et main d'œuvre».

**b. Cas de la maintenance conditionnelle**

Dans le cas de la maintenance conditionnelle, remarquons :

- que le temps de réaction après alarme ne permet pas forcément de prendre des dispositions pour ne pas subir de temps d'indisponibilité en temps requis, donc les  $C_i$  correspondants. Dans ce cas existera un «coût résiduel de défaillance prévenue» bien inférieur cependant au coût de la maintenance prévenue.
- que la mise en œuvre initiale passe par un «investissement» sous forme de chaînes d'acquisition de données ou d'appareils de mesure ou de monitoring parfois coûteux.

**1.4. La préparation des actions de maintenance corrective****1.4.1. Introduction**

La préparation du travail est une des missions du bureau des méthodes de maintenance. Elle a pour vocation première d'être « une aide à la réalisation » dans le but de réduire les durées d'intervention des techniciens et les durées d'immobilisation des équipements. Ceci permettra d'améliorer leur disponibilité, donc la productivité de l'entreprise. La réduction des MTTR s'obtiendra par une anticipation de tous les temps improductifs et de tous les aléas susceptibles de faire durer une intervention.

Les tâches de maintenance corrective sont spécifiques :

- elles sont d'ampleurs très variables : du petit dépannage de quelques minutes à des réparations lourdes requérant des équipes complètes,
- elles peuvent être urgentes, ou dangereuses, ou techniquement délicates ou tout à la fois,
- elles sont effectuées par des techniciens spécialistes connaissant bien les matériels
- elles sont effectuées par des techniciens parfois soumis à la pression des coûts d'indisponibilité
- elles sont parfois répétitives et parfois inédites
- elles sont par nature fortuites, ce qui ne signifie pas qu'elles sont inattendues ni préparées.

L'agent méthode doit avoir tous ces éléments à l'esprit pour adapter le contexte et le dimensionnement de sa préparation au contexte. Le dernier point est spécialement important : nul ne peut « prédire » la date d'une panne catalectique, mais est toujours possible de « prévoir » sa nature et sa probabilité (AMDEC par exemple) et de la préparer. Un constructeur automobile livre avec l'auto une roue de secours, un cric et un mode opératoire mais ne fournit pas la date de la prochaine crevaison !

#### **1.4.2. Définition de la préparation**

La préparation est une tâche d'anticipation de difficultés rencontrées sur le terrain effectuée par un technicien qui connaît le terrain : l'agent des méthodes. Elle consiste à prévoir les paramètres d'exécution d'une tâche, à identifier les problèmes potentiels, à définir les besoins puis à rédiger les documents de préparation.

La préparation d'une tâche peut se faire avant la défaillance (cas d'une défaillance attendue avec préparation anticipée) ou après la défaillance (cas d'une défaillance non prévue avec une « préparation à chaud »).

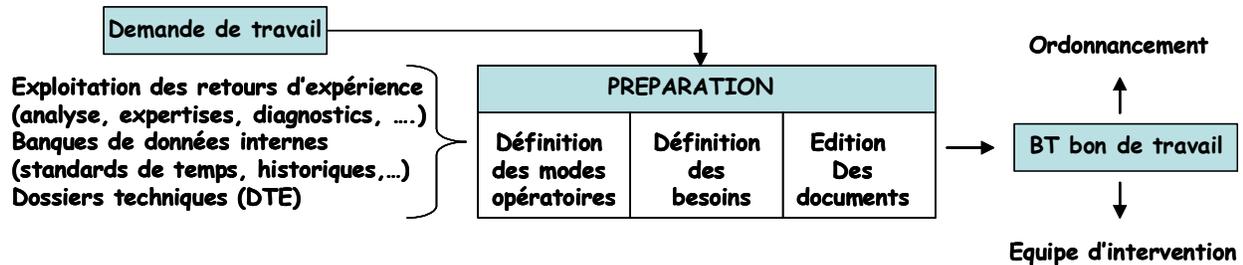


Figure 5.11 : Situation et rôle de la réparation du travail de maintenance corrective

Suite à la défaillance détectée et à l'émission d'une Demande de Travail DT, s'il ne s'agit pas d'un simple dépannage, le rôle du préparateur est d'aller sur le site. Seule l'observation in situ des faits techniques lui permettra de réaliser une « expertise » préalable à la définition des mesures de sécurité et des opérations de remise à niveau.

#### 1.4.3. Rentabilité de la préparation

Le problème de la rentabilité de la préparation est de même nature que celui de la maintenance préventive : ce qu'elle coûte est bien visible, ce qu'elle économise ne l'est pas, car une intervention bien préparée et exécutée « sans problème » paraît naturelle.

Analysons les gémissements de gaspillage de temps que cette préparation a évité :

- temps de recherche DTE, de schémas, de plans, d'historiques, etc. ;
- temps de recherche et de choix d'outillage, voire de leur confection ou de leur adaptation
- temps de recherche de matières et de produits ;
- temps d'attente au magasin pour la pièce de rechange parfois manquante : temps de la course avec un véhicule pour la chercher chez un distributeur voisin ou non ;
- temps de parcours entre le site, les magasins, les bureaux, etc. ;
- temps d'attente d'instructions ;
- temps d'hésitation sur le mode opératoire, temps de démontage s'avérant inutile.

Cette liste des gaspillages de temps (donc de coûts) n'est malheureusement pas

exhaustive et l'observation in situ d'interventions non préparées est défiante sur le rapport temps de travail productif/temps non productif.

## 2. LES FONCTIONS ORDONNACEMENT, LOGISTIQUE ET REALISATION

### 2.1. Le rôle de l'ordonnancement en maintenance

Le service maintenance est caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature en durée, en urgence et en criticité. L'absence d'une bonne organisation débouche vite sur une anarchie totale. L'ordonnancement se situe entre la fonction méthode, chargée de la définition des tâches à effectuer et des moyens à mettre ne œuvre, et la fonction réalisation chargée de leur exécution.

#### 2.1.1. Missions de l'ordonnancement

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

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

Cela peut s'exprimer sous la forme : prévoir un instant  $t$  et un endroit  $x$  où un personnel  $p$  muni d'un outillage  $o$  et des matières  $m$  exécutera la tâche  $M$  en harmonie avec d'autres travaux connexes. Cette fonction stratégique est peu visible (effectif dédié faible) est souvent peu étudiée, mais elle repose sur des méthodes à connaître. Son absence ou son insuffisance est par contre fort visible : tâches préventives négligées, gaspillage de temps en recherche des moyens indispensables, améliorations toujours reportées à plus tard, techniciens parfois inoccupés associés à des heures supplémentaires évitables, etc.

#### 2.1.2. Difficultés inhérentes à l'ordonnancement en maintenance

La diversité des actions de maintenance complique leur programmation :

- d'une durée de quelques secondes en auto-maintenance à des milliers d'heures pour des chantiers lourds de type arrêt périodique d'unité de production.
- du systématiques planifié 6 mois à l'avance au correctif fortuit, au mauvais endroit et au mauvais moment.
- de l'urgence à faire sans délai à l'amélioration dépourvue de délai et toujours remise à demain.

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

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

## 2.2. Terminologie de l'ordonnancement

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

Capacité de charge :

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

Exemple :

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

\* Surcharges.

Nous distinguons les surcharges de nature permanente ou de nature conjoncturelle.

Solutions envisageables pour les surcharges permanentes

1. Repenser la politique de maintenance, sachant :
  - que le préventif diminue naturellement la charge corrective, mais aussi la charge totale;
  - que le développement continu des «améliorations» diminue les taux de défaillance, donc la charge corrective;
  - que le développement des méthodes-ordonnancement optimise les temps d'opération et les aléas logistiques.
  - que les effets de ces politiques ne seront pas immédiats!
2. Externaliser les travaux éloignés des pôles de compétences des techniciens (recentrage sur le «métier»).
3. Supprimer certains travaux,
4. Augmenter la productivité des techniciens par la motivation : il ne faut pas que le gain de productivité se fasse au détriment de la qualité des interventions,
5. Transférer les travaux de niveaux 1 et 2 sur la production, dans une logique TPM.
6. Embaucher du personnel pour augmenter la capacité tout en sauvegardant le savoir-faire interne relatif au maintien de la production.

Solutions envisageables pour paliers les surcharges ponctuelles

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

---

## CHAPITRE 6: Gestion des opérations de Maintenance

---

### 1. INTRODUCTION

La gestion des pièces de rechange est un aspect essentiel de la gestion de l'entretien. D'une part, les frais liés au stockage des pièces de rechange peuvent atteindre des milliers de dinars. D'autre part, un manque de pièces de rechange à un moment critique peut induire des frais directs et indirects importants.

Suite au diagnostic effectué au magasin, nous avons constaté des anomalies au niveau de la méthode d'approvisionnement et de la détermination des quantités à commander, pour cela nous avons décidé d'entreprendre un certain nombre d'actions, Ces actions sont :

- Analyse du stock des pièces de rechanges ;
- Choix des méthodes de gestion les plus économiques ;
- Répartition des responsabilités et des tâches pour une gestion efficace de stock.

### 2. CHOIX DE LA METHODE D'APPROVISIONNEMENT ECONOMIQUE

Le problème de gestion des stocks consiste à maintenir un approvisionnement suffisant pour satisfaire une demande connue (cas déterministe) ou probable (cas probabiliste) de la manière la plus rentable. Il s'agit de déterminer une politique qui permettra de minimiser les coûts.

En général, l'entreprise n'a aucun contrôle sur la demande et elle ne peut agir que sur le flux de réapprovisionnement pour atteindre le résultat désiré. Elle doit donc répondre aux deux questions suivantes :

- Quand doit-elle passer une commande d'approvisionnement ?
- Quelles quantités doit-elle commander ?

Les solutions peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Solutions qui consistent à passer à des dates fixes des commandes de quantité variable → Modèle P comme périodicité.
- Solutions qui consistent à passer à des dates variables des commandes de quantité fixe → Modèle Q.

Dans ce qui suit, nous allons proposer une classification des politiques de gestion des stocks. Dans tous les cas on fera l'hypothèse que la livraison des commandes est instantanée.

- **Méthode ABC** : Méthode préliminaire :

La gestion des stocks ayant un coût (plus ou moins élevé selon le degré de contrôle désiré), les entreprises qui détiennent des centaines voire des milliers d'articles en stock peuvent se trouver dans l'impossibilité de gérer de la même manière tous ces articles. Elles doivent alors effectuer un choix quant aux articles qu'il faudrait gérer en priorité et au niveau d'analyse nécessaire pour ces articles.

Le choix peut s'effectuer en recourant à la loi de Pareto (ou analyse ABC ou loi 20/80).

**Définition :**

C'est une méthode d'analyse efficace qui est souvent préliminaire à toute autre et permettant de mettre en évidence l'essentiel, objet par la suite de tous les efforts.

C'est une courbe de classement où nous aurons en abscisse le cumul des éléments observés et en ordonnée le cumul des facteurs à dégager (le coût, temps, investissements, etc.) et qui permet généralement d'isoler 15 à 20% des éléments observés représentant 75 à 80% du facteur à dégager. Ainsi, les efforts peuvent se consacrer à 15 ou 20% seulement des éléments observés tout en englobant 75 à 80% de la valeur du potentiel.

En se basant sur ce principe et en l'appliquant aux stocks, la méthode ABC classe les produits stockés en trois catégories :

Les articles de la classe A :

Ils sont inclus dans les 20 premiers pour cent du nombre d'articles en stock et représentent une valeur (monétaire) se situant entre 60 et 80% de la valeur totale des stocks.

Les articles de la classe B :

Ils sont inclus dans les 15 à 40% suivants du nombre total d'articles en stock et représente une valeur se situant entre 15 et 20% de la valeur totale des stocks.

Les articles de la classe C :

Ils constituent la majeure partie du nombre des articles (soit 40 à 75% des quantités) mais leur valeur est plus faible : 5 à 20% du total de la valeur des stocks.

## 2.1. Nécessité d'une gestion sélective

Puisqu'il existe, pour l'activité du service maintenance plusieurs centaines d'articles différents, les pièces en stock n'ont généralement pas la même importance du point de vue du volume des consommations et de la trésorerie immobilisée.

Face à une telle diversité, il ne peut y avoir de réponses uniformes quant au choix de la méthode d'approvisionnement économique. Il convient donc de passer par une analyse objective afin de distinguer des classes homogènes de pièces de rechange et de permettre ainsi la mise en œuvre des règles de gestion appropriées.

Le critère de classification est la classification ABC (déjà vue) selon la valeur du stock.

### Analyse ABC

Il faut suivre ces étapes :

- 1- Calculer la valeur de stock de chaque article ;
- 2- Trier les données suivant l'ordre décroissant des valeurs de stock ;
- 3- Calculer la valeur relative du stock par article ;
- 4- Calculer les valeurs cumulées du stock en pourcentage.

## 2.2. Application de la méthode

Pour appliquer cette méthode, nous il faut faire l'inventaire des pièces de rechange en stock et l'historique de leur consommation.

Ce travail nous permet d'obtenir le tableau 6.1 des différentes classes des pièces en stock.

**Tableau 6.1** : Exemple d'identification des classes suivant la valeur du stock

	CLASSES		
	A	B	C
Valeur du stock (DT)	279831.8342 DT	52226.091 DT	17510.952 DT
% de la valeur totale du stock	80.05%	14.84 %	5.11 %
% du nombre total d'article	9.04 %	11.5 %	79.41 %

Les articles des classes A et B trouvés à partir de l'analyse ABC selon la valeur du stock sont caractérisés généralement par :

- Une consommation discontinue ;

- Une valeur de consommation annuelle élevée ;
- Un nombre d'articles qui n'est pas élevé.

Pour ces raisons, nous avons décidé de choisir la méthode de **point de commande** pour gérer ces articles.

Cette méthode consiste à commander une quantité fixe, dite quantité économique d'approvisionnement, dès que le stock tombe au-dessous d'un niveau appelé **point de commande**. C'est une méthode qui a l'avantage de lier le déclenchement de l'approvisionnement à la consommation réelle de l'article ; elle présente donc une grande sécurité.

### Gestion de la classe C

Les articles de classe C sont caractérisés généralement par :

- Une consommation continue;
- Une consommation annuelle faible en valeur;

Nous proposons pour la gestion des articles de la classe C d'utiliser la méthode du **plan d'approvisionnement** qui consiste à commander une quantité variable à des dates fixes. L'intervalle entre deux commandes successives est appelé "**période d'approvisionnement économique**". La quantité commandée, lors de chaque approvisionnement, est la différence entre un niveau appelé « **plafond** » ou « **niveau de recombêtement** » et le stock existant.

### 2.3. Méthode de calcul [7]

Pour le calcul des paramètres de gestion, il faut minimiser le coût annuel global de stockage. Ce coût total regroupe plusieurs composantes : le coût d'achat, le coût de passation de commande et le coût de détention. En minimisant le coût total annuel de stockage donné par la formule :

$$C_{total\_annuel\_de\_stockage} = \underbrace{\left( \frac{S \times u}{C_{d'acquisition}} \right)}_{C_{d'acquisition}} + \underbrace{\left( \frac{S}{Q} \times a \right)}_{C_{de\_passation}} + \underbrace{\left( \frac{Q}{2} \times u \times T \right)}_{C_{de\_detention}} \quad (7.1)$$

Nous obtenons les paramètres de la méthode de point de commande.

### Paramètres de la méthode du point de commande

$$Q_e = \sqrt{\frac{2 \times S \times a}{u \times T}} \quad (7.2)$$

$$P.C = S \times \frac{d}{12} + ss \quad (7.3)$$

Pour déterminer les paramètres de la méthode du plan d'approvisionnement, nous minimisons le coût total annuel de stockage donné par la formule :

$$\text{Cout\_total\_annuel\_de\_stockage} = \left[ \underbrace{S \times u}_{\text{Cout\_d'acquisition}} \right] + \left[ \underbrace{\frac{12 \times a}{p}}_{\text{Cout\_de\_passation}} \right] + \left[ \underbrace{\frac{S \times p}{24} \times u \times T}_{\text{Cout\_de\_detention}} \right] \quad (7.4)$$

### Paramètres de la méthode du plan d'approvisionnement [7]

$$p = 12 \sqrt{\frac{2 \times a}{u \times S \times T}} \quad (7.5)$$

$$A = \frac{S}{12} d + ss \quad (7.6)$$

$$N = \frac{S}{12} \times (p + d) + ss$$

(7.7)

Où :

- **Q<sub>e</sub>** : quantité économique d'approvisionnement ;
- **P.C** : point de commande, c'est un seuil de commande qui correspond à un stock destiné à couvrir les besoins pendant le délai de livraison d. Plus ce seuil est placé haut, pour d donné, moins on s'expose à une rupture mais inversement plus on alourdit le stock moyen ;
- **S** : consommation annuelle ;
- **a** : coût variable de passation d'une commande constitué par tous les frais engagés pour se procurer un article depuis l'émission de la commande jusqu'à la réception de l'article : coût d'approche et de transport, frais de paiement bancaire, lancement de la commande, téléphone, etc. ce coût par article, est calculé sur la base d'un nombre moyen d'article par commande ;
- **u** : coût unitaire de l'article ;

- **T** : taux par unité monétaire et par an du coût de possession du stock constitué par l'intérêt financier des capitaux immobilisés et par les charges de stockage : frais liées au magasinage, frais liées au personnel (estimées à 11 %) ;
- **d** : délai total d'obtention ou d'exécution d'une commande (en mois). Ce délai est la somme du délai interne administratif et du délai de livraison du fournisseur.
- **ss** : stock de sécurité ou de protection, correspond à la différence  $(P.C. - \bar{y})$ , avec

$y$  = demande totale considérée pendant le délai d'attente  $d$ , et

$\bar{y}$  = moyenne de cette demande.

Ce stock de sécurité est noté sous la forme :  $ss = K * \sigma(y)$  ; avec :

$\sigma(y)$  : Écart type de la demande  $y$ , et

$K$  : multiple de cet écart type, souvent appelé : facteur de protection

Par exemple pour une protection de rupture de stock de **99 %**,  $k = 2,328$  d'après la table des probabilités de la loi de Gauss

Pour 95 %,  $k = 1,645$  et pour 90 %,  $k = 1,285$ .

- **p** : période d'approvisionnement (en mois) ;
- **N** : niveau plafond ;
- **A** : niveau d'alerte (équivalent au point de commande).

---

## CHAPITRE 7: La Gestion de la maintenance Assistée par Ordinateur

---

### 1. DEFINITION

*G.M.A.O.* signifie **G**estion de **M**aintenance **A**ssistée par **O**rdinateur. Il s'agit d'un logiciel spécialisé pour réaliser la gestion d'un service technique. La *Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur* est constituée d'une base de données (historique) qui est alimentée par le personnel de maintenance via un formulaire. Chaque *GMAO* est personnalisée selon les besoins spécifique d'exploitation de l'historique ou le fonctionnement d'un site.

#### **Caractéristiques générales :**

Un logiciel de *GMAO* permet de construire une base de données dans laquelle on retrouvera :

- Les articles du magasin,
- Les fournisseurs,
- La gestion des entrées et sorties des articles,
- La gestion des achats,
- La gestion des actifs (équipements et sous ensembles),
- La gestion des interventions correctives,
- La gestion des interventions préventives,
- La gestion des demandes d'interventions,
- Les analyses financières et le suivi des indicateurs de maintenance,
- La gestion des contacts clients et la facturation

### 2. INTERET DE LA MAO

- la diminution de la consommation globale d'énergie (un matériel bien

- 
- entretenu consomme moins d'énergie);
  - la réduction du temps consacré à la maintenance préventive (meilleure planification);
  - la diminution des heures supplémentaires (panne réparée en dehors des heures normales);
  - la diminution du temps consacré au correctif;
  - la diminution des pertes de production due aux pannes;
  - la diminution du temps consacré à la gestion administrative du service maintenance
  - prolongation de la durée de vie des matériels due à une maintenance préventive mieux faite;

### 3. ELABORATION D'UN PLAN MAO

L'élaboration d'un plan dans ce domaine consiste à structurer le système d'information et d'organisation du service maintenance en vue de divers objectifs fondamentaux.

#### **\* Création de systèmes d'élaboration de la politique de maintenance**

- Définition des politiques de maintenance,
- Programme de base de la maintenance,
- Gamme de maintenance.

#### **\* Fiches de maintenance**

Création de systèmes liés au déclenchement des interventions préventives ou correctives:

- diagnostic, recherche de l'origine de la panne et peut-être de sa cause,
- gestion des demandes des travaux correctifs et d'amélioration,
- déclenchement des interventions préventives.

#### **\* Création de modules liés à l'exécution des travaux**

- préparation des interventions,
- planification des interventions et des ressources,
- lancement,
- suivre l'exécution des travaux,
- créer une banque de données maintenance (historique).

La mise en place de tels systèmes se fait par deux démarches complémentaires;

- une sur le site «production» :

- \* connaissance des réseaux d'informations,
- \* des données liées au matériel,
- \* des rapports d'intervention,
- \* connaissance des stocks pièces de rechange,
- \* connaissance des limites des interventions,

- une au niveau de la direction ou de siège:

- \* connaissance des informations provenant des autres sites de production,
- \* des normes en vigueur dans la société,
- \* des objectifs liés à la maintenance, (amélioration de la disponibilité, extension de l'expérience pour s'autres unités).

Une stratégie informatique devra en découler en proposant des priorités :

- codification (nomenclature),
- création de banques de données,
- utilisation des moyens informatiques existants, acquisition de nouveaux,
- suivi des résultats.

#### 4. INVENTAIRE DES LOGICIELS DE MAO

Le souci croissant de gagner en efficacité, rapidité et technicité fait que la maintenance assistée par ordinateur prend une ampleur croissante. De nombreux logiciels se sont développés et sont en cours de production. Pour mieux choisir, il est nécessaire de classer ces logiciels. On peut proposer comme catégorie les secteurs suivants :

- la G.M.A.O «industrie» : gestion de maintenance assistée par ordinateur côté industrie; (Ratios techniques, magasinage, fiche machines, suivi de projet, PERT, planification);
- la G.M.A.O. partie tertiaire : gestion des bâtiments (planification, aspect comptabilité);
- la G.M.A.O service après vent : suivi de clientèle, analyse des retours clients;
- l'aide au diagnostic algorithmique: arbre de défaillances, arbre de maintenance,

---

etc.

- le monitoring : analyse des signaux, des alarmes, préventif conditionnel;
- l'aide au diagnostic Système Expert
- la fiabilité : statistique, analyse de données.

## **5. SYSTEME EXPERT**

### **5.1. Généralités**

Les systèmes experts peuvent aider les industriels à résoudre des problèmes faisant appel aux spécialistes. Ils ne les remplacent pas en totalité, mais dupliquent leurs connaissances et ainsi font profiter à un plus grand nombre, compétences et savoir faire de ces dit «experts». Ainsi ces systèmes doivent contenir toutes les connaissances du domaine et être capables d'avoir une méthode de résolution analogue au raisonnement humain.

### **5.2. Système expert et maintenance**

Pour améliorer la maintenabilité, il est nécessaire de faciliter le diagnostic des pannes et de diminuer les temps d'immobilisation. Dans cette optique, le système expert est un auxiliaire précieux.

Le S.E. offre l'avantage de s'appuyer sur les méthodes du raisonnement humain et surtout de pouvoir s'enrichir en fonction de la propre expérience des utilisateurs.

Il doit :

- être apte à résoudre les problèmes (trouver la cause de la panne)
- être capable d'expliquer les résultats;
- être capable d'apprendre par expérience;
- être capable de restructurer ses connaissances;
- de transgresser une règle;
- de juger la pertinence d'une donnée;
- de juger sa compétence et de résoudre un problème,

### **5.3. Architecture d'un Système Expert**

Il comprend :

\* la base de connaissance

Elle est élaborée par les dits «experts» qui établissent des règles de type «Si» prémisse «alors» conclusion.

Par exemple : «Si» trop de graisses «alors» le roulement est chaud.

D'autres relations logiques peuvent être utilisées telles que :

- l'appartenance à une classe;
- la représentation d'objet par des propriétés standards;
- la description de scénarios types;
- la gestion des règles.

\* la Base de faits

Elle peut être donnée symbolique ou numérique.

Par exemple :

- «Roulement bruyant»
- Élément de nouveau en état de fonctionner»

\* Moteur d'inférence

Il permet en partant de données contenues dans «la base de fait» et des règles de «la base de connaissances» de déduire des nouveaux faits et de tirer des conclusions.

(Exemple de conclusion : la panne provient d'un mauvais graissage)

Une mise à jour de la base de connaissance peut être exécutée en liaison avec l'utilisateur à l'aide d'un langage conventionnel. Le moteur d'inférence peut travailler en chaînage avant ou arrière mixte.

\* Représentation schématique d'un système expert

\* Chaînage avant

Le moteur d'inférence (M.I) travaille en mode déductif. Les règles sont activées par les données ou faits d'entrées. Le raisonnement progresse vers une conclusion.

\* Chaînage arrière

Le moteur d'inférence travaille en mode «vérification d'hypothèses». A partir d'une hypothèse, il cherche les faits pouvant la confirmer ou non.

\* Chaînage mixte

Les deux modes de travail avant et arrière sont utilisés pour trouver une solution.

---

\* Types de Systèmes experts

Un des classements de Système Expert, se fait par le niveau du moteur d'inférence, qui est directement lié aux possibilités de raisonnement du S.E.

\* Moteur d'inférence (M.I) niveau O

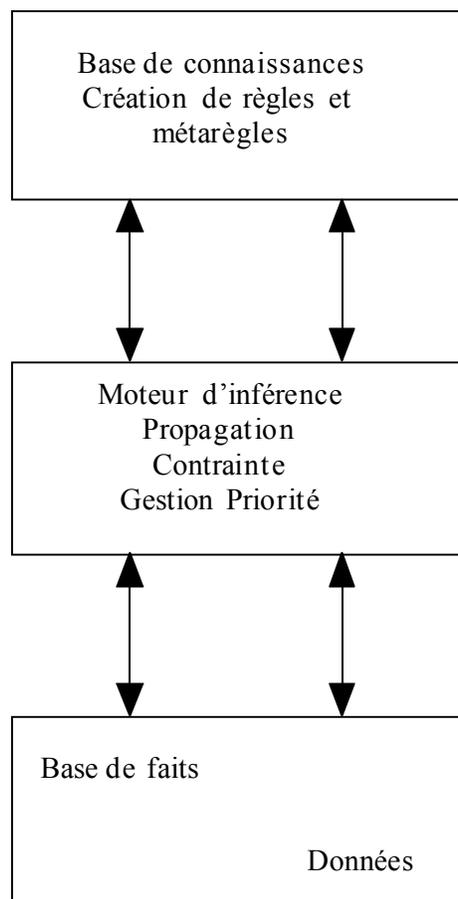
Le raisonnement s'appuie sur la logique des propositions, qui peuvent être :

- vrais;
- fausses;
- incertaines.

Les règles utilisées sont de type : Si «prémisse 1» et «prémisse 2», alors conclusion.

\* Moteur d'inférence niveau O +

En plus des propositions des expressions arithmétiques et logiques avec variable (booléenne du type integer, real string) sont utilisées.



**Figure 7.1** : Conception d'une MAO

\* Exemple

«Si» P(x) «alors» conclusion.

\* Moteur d'inférence niveau 1

Il peut en plus traiter des relations de type prédicats entre faits. Un prédicat est ce que l'on affirme ou que l'on nie.

On a ainsi des règles de la forme :

Si «X Relation Y» combinée avec des «ET», «OU» «NON» si la prémisse est complexe.

#### 5.4. Logiciel d'aide à la décision en matière de politique de maintenance ou concepts du logiciel «Prevent»

Concepts :

Maintenir en état de bon fonctionnement les moyens de production est bien entendu le souci premier de tout service de maintenance, mais ceci pas à n'importe quel prix. L'homme de maintenance est obligé de décider dans un univers technico-économique et de choisir une politique adaptée. L'introduction de la maintenance préventive semble être une solution intéressante. Il n'en demeure pas moins que cette introduction systématique suppose une étude sérieuse.

En effet, si les éléments techniques et scientifiques de l'approche du préventif ne sont pas connus, à savoir :

- \* lois de vieillissement non modélisées,
- \* étude sur les défaillances non établies,
- \* coûts entraînés par les défaillances en service non connues,
- \* pannes tout à fait aléatoires,
- \* absence de phénomène d'usure,

la mise en place du préventif ne sera pas optimisée, les dépenses dues au changement des éléments maintenables seront trop élevées ou inefficaces.

\* Problématique du préventif

Il s'agit de :

- changer un élément bon en le croyant mauvais,
- intervenir trop tard (panne déjà arrivée).

---

Ce logiciel permet de choisir la meilleure politique de maintenance, en tenant compte de ces éléments (diffusés par MaintConsult: Bureau d'études français à St Etienne)

«PREVENT PLUS» utilise :

- les dates de pannes,
- les temps entre défaillance, «TBF»

Pour modéliser le comportement des modèles par des lois de type Loi de Weibull à 2 ou 3 paramètres. Il prend en compte le type d'échantillon complet, censuré à droite, censuré multiple en déterminant de la meilleure façon:

- les paramètres d'une loi de vieillissement ETA, BETA, GAMMA.
- le MTBF, le MTTR
- le taux de défaillance LAMBDA

Des tests type Khi-Deux ou Kolmogorov-Smirnov viennent valider le modèle. De plus, des graphiques permettent de visualiser  $R(t)$ . Les décisions en matière de maintenance demandent, d'une part, la prise en compte des données économique sur le coût des défaillances ou coût induit par elles, d'autre part, le coût de changements préventifs.

Ces éléments sont largement exploités dans PREVENT PLUS au travers de divers modèles issus de la recherche opérationnelle et permettent ainsi de choisir la meilleure politique de maintenance :

- le temps optimal d'intervention,
- le préventif systématique à l'âge,
- le préventif systématique périodique,
- le préventif conditionnel,
- la maintenance corrective.

Le gain obtenu en pourcentage des différentes décisions est mis en évidence. «PREVENT PLUS» peut aussi constituer une banque de données de Fiabilité réaliste. L'Algorithme de calcul d'une GMAO est présenté dans la figure 7.1.

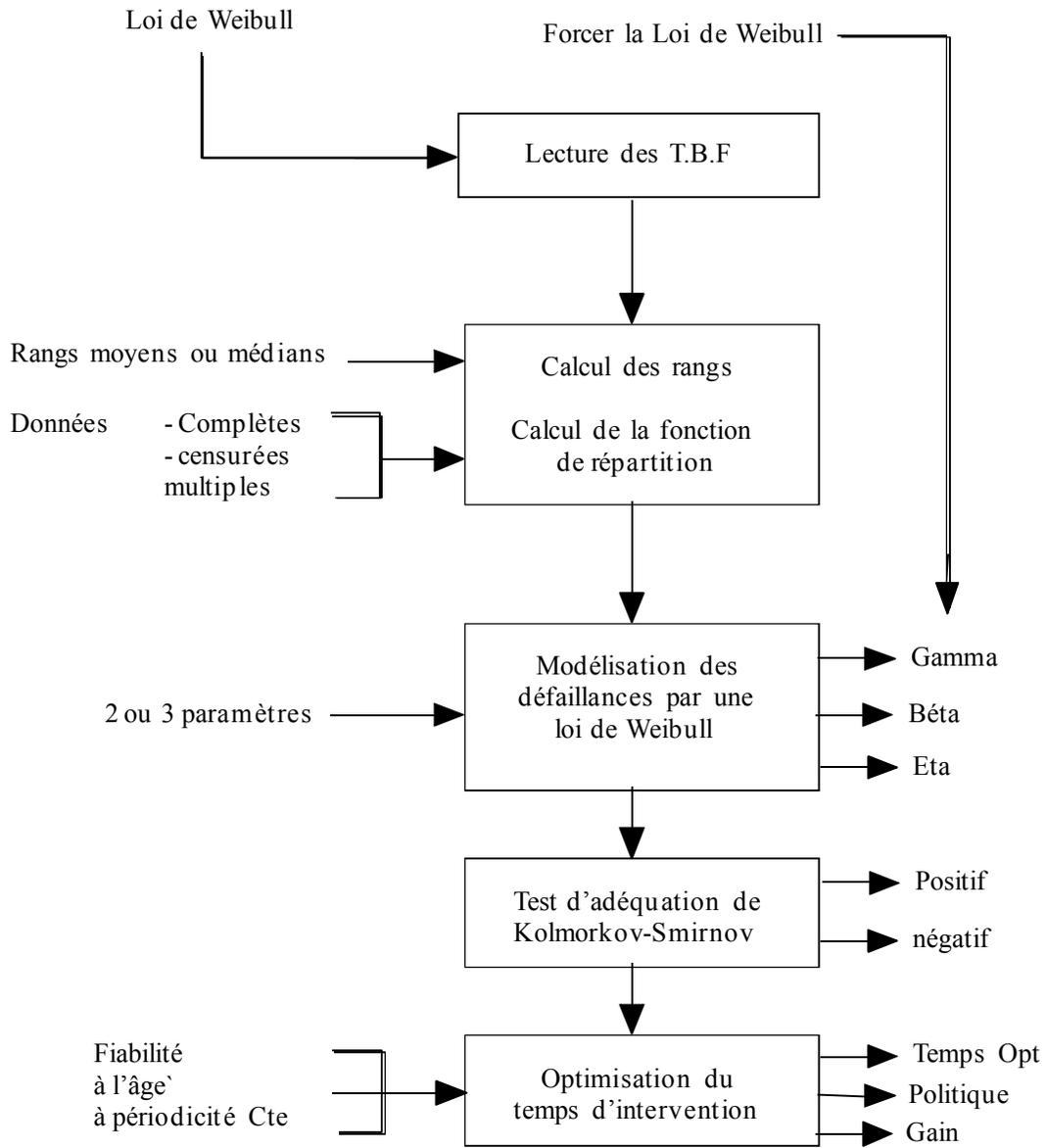


Figure 7.2: Algorithme de calcul dans une GMAO

## 6. CONDUITE D'UN PROJET GMAO

Les démarches pour la mise en place d'une GMAO peuvent être résumées comme suit :

### 6.1 Réalisation du cahier des charges (surtout définir le besoin)

- Volume de l'inventaire matériels à maintenir et documents d'équipement à informatiser ;
- Degré de sophistication du logiciel (plus il est performant plus il est complexe à utiliser) ;
- Statistiques: calculs à réaliser, niveau de diagnostic souhaité, exportation du fichier vers Excel par exemple, etc.
- Personnes qui sont appelées à l'utiliser: situation géographique, niveau en informatique, service de rattachement ;
- Définir les éditions que l'on souhaite réaliser ;
- Niveau de complexité de l'environnement industriel: simple ou multi site, un ou plusieurs magasins, etc.
- Mise en réseau souhaitée (SQL, SAP, etc.)
- Définir le budget à allouer (hard (matériel) et soft (logiciel), formation, maintenance)
- Définir le temps alloué à la mise en place (installation, formation, soutien extérieur) ;
- Définir le préventif à suivre (plan de maintenance) ;
- Définir le suivi magasin à réaliser ;
- Définir les documents (et leurs contenus) utiles au déroulement du processus de maintenance (Avis, DT, AT, etc.) y compris sécurité (permis de feu, consignations CO2, etc.) ;
- Recenser les outils en place (GMAO existante, saisie papier ou Excel des interventions), définir s'il faut les exploiter ;
- Définir le suivi informatique pour la bonne exploitation du logiciel (mise en place, maintenance hard et soft) ;
- Définir les moyens de sauvegarde et d'archivage;

## 6.2 Choix du logiciel

- Développement spécifique ou achat d'un logiciel ;
- Orientation vers 1 logiciel ou un ensemble de logiciel (GMAO, graissage, gestion stock) avec les interfaces nécessaire ;
- Choisir un prestataire de service informatique si l'entreprise ne dispose pas de compétence informatique en interne ;

## 6.3 Mise en place

- Installation hard et soft
- Essais

## 6.4 Formation du personnel

- Formation générale à l'informatique (système d'exploitation Windows par exemple) ;
- Formation spécifique au logiciel ;
- Remise d'un cours à chaque personne ;
- Veiller à ce que les personnes exploitent leurs nouvelles connaissances très rapidement après la formation, prévoir période d'accompagnement ;

## 6.5 Utilisation / Exploitation de la GMAO;

Au préalable:

- Saisie de l'inventaire COMPLET du matériel ;

Utilisation de la GMAO:

- Saisie des Demandes d'Intervention et des Ordres de Travaux ;
- Saisie des comptes rendus d'intervention et clôture ;
- Saisie des alarmes pour les interventions préventives ;
- Autres saisies ;
- Réalisation / éditions des statistiques (indicateurs, Pareto, etc.) ;
- Archivages/sauvegardes ;

## 7. CONDITIONS DE REUSSITE D'UN PROJET GMAO

Les recommandations les plus importantes sont les suivantes :

- Exprimer clairement ses objectifs:  
Une GMAO, Pour quoi faire ? Pour qui ? Pour quel résultat attendu ?
- Exprimer le besoin en termes de fonction strictement utiles et éliminer les fonctions inutiles,
- Travailler en groupe multidisciplinaire pour réaliser de façon formelle une analyse des besoins et pour rédiger un cahier des charges fonctionnel faisant l'objet d'un consensus entre tous les utilisateurs potentiels.
- Ne pas sous-estimer les moyens préliminaires à mettre en œuvre avant toute décision finale
- Une erreur ou omission commise pendant la phase de rédaction du cahier des charges est pratiquement irrécupérable une fois l'achat du produit réalisé. Cela a pour effet de contribuer à des délais et coûts supplémentaires pour apporter des corrections ou pour définir des fonctionnalités nouvelles au logiciel
- Demander aux fournisseurs présélectionnés de fournir des références de clients où ses applications de GMAO fonctionnent. Il ne faut pas hésiter à se déplacer sur des sites où fonctionnent ces logiciels pour connaître les jugements des clients exploitants.
- Vérifier la pérennité des produits et les capacités du fournisseur à évoluer dans le temps
- Vérifier la capacité des vendeurs à en assurer la maintenance et l'assistance
- Prévoir une période de formation de tous les personnels (des ouvriers au plus haut responsable technique de l'entreprise)
- Vérifier l'adéquation de l'organisation au logiciel et éviter la situation inverse. En effet le changement de culture que nécessite la GMAO conduit à des efforts s'inscrivant dans la durée et doit constituer un enjeu stratégique durable de l'entreprise. C'est également vrai pour l'implantation de nouvelles politiques de maintenance telles que la Totale Productive Maintenance (TPM), la Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF).
- Choisir de préférence un chef de projet indépendant des services de production et de maintenance qui pourra assurer la pérennité de l'application GMAO et

sera le "champion" de la GMAO ou le leader pour reprendre la terminologie anglo-saxonne.

Un des points le plus difficile à régler est de faire perdre les habitudes anciennes. En effet, il faut se heurter très souvent au scepticisme des utilisateurs qui ont souvent ce commentaire " cela fait 10 ans que l'on fonctionne avec nos méthodes et on ne voit pas pour quelles raisons nous serions amenés à en changer "

Le retour d'expérience des entreprises ayant opté pour un progiciel de GMAO se caractérise par deux attitudes très distinctes :

Lorsque les entreprises (petites PME/PMI) ne disposent pas des capacités d'expertises ou des compétences nécessaires au sein de leurs employés, les décideurs sont amenés, dans la majorité des cas, à faire un choix souvent subjectif en fonction des arguments des propositions qui leur sont faites par les vendeurs de progiciels de GMAO. Les risques alors deviennent importants: le produit ne peut répondre que partiellement au besoin de l'entreprise. Il est peut être cher à exploiter et à maintenir. Les retards de production induits par des mauvais fonctionnements du logiciel peuvent conduire la société à voir son image de marque dégradée et à s'exposer à des pertes de parts de marché.

Quand l'entreprise dispose des moyens internes ou de sous-traitance pour élaborer le cahier des charges fonctionnel, ceci le met partiellement à l'abri de mauvais choix fonctionnels relatifs à ses besoins. L'avantage de cette méthode qui prend du temps et est coûteuse dans la phase de spécification est de pouvoir disposer de réponses multiples suite à des appels d'offres basés sur le cahier des charges fonctionnel client. La décision d'achat définitif étant faite souvent par un comité ad-hoc permet grâce à une appréciation multidisciplinaire de minimiser les risques ultérieurs

Si l'utilisation de traitement de texte s'est banalisée dans tous les secteurs de l'activité économique malgré les réticences initiales devant la nouveauté d'un écran, d'un clavier et d'une souris, l'introduction dans les entreprises d'un outil de GMAO ne dérogera pas à la règle.

Il faut préparer le personnel à ce changement graduel de mentalité dans ses activités, se fixer des objectifs à court terme et surtout les informer régulièrement sur les gains de productivité obtenus avec l'outil de GMAO. Il est

---

fondamental que les personnes qui alimentent en données les progiciels de GMAO en perçoivent les retombées et constatent que les efforts qu'ils leur sont demandés sont stratégiques pour l'entreprise.

Ce n'est qu'à ce prix que les efforts entrepris auprès de toutes les catégories de personnels seront couronnés de succès. La meilleure preuve d'une GMAO bien implantée se constate quand l'informatique est défaillante et qu'il n'est plus possible d'avoir accès aux fonctionnements des équipements d'une installation industrielle. L'ensemble du personnel est alors privé de son outil de management de ses investissements et le fonctionnement risque de se voir paralysé pendant quelques heures

Un progiciel de GMAO répondant à tous les besoins d'une entreprise se doit être aussi indispensable que le téléphone ou que la caisse à outils du mainteneur.

## 8. PRESENTATION D'UN LOGICIEL DE GMAO : [NEWMaint](#)

### 8.1. Qualités d'un logiciel de GMAO

Le logiciel doit être **simple, convivial**, il doit correspondre à la logique de fonctionnement du service maintenance.

Le logiciel de GMAO doit pouvoir fonctionner en réseau (Windows NT, 2000, Novell, etc.) de façon à pouvoir évoluer avec les besoins du service. Internet est en général la solution des techniciens mobiles. C'est aussi aujourd'hui la solution pour la mise en route de solution à faible investissement, il est ainsi possible de juste payer les heures d'utilisation. Une formation doit être prévue pour apprendre rapidement les commandes du logiciel et la méthodologie de mise en œuvre dans le service maintenance. Un contrat de maintenance annuel qui donne droit à une aide téléphonique et aux évolutions des logiciels doit être souscrit.

Pour des raisons de budget ou de faible disponibilité des techniciens, il peut être utile de démarrer avec une solution légère, puis de l'étoffer en fonction des besoins et des moyens. [NewMaint](#) dispose d'une version EVOLUTION qui permet de démarrer le projet d'informatisation du service maintenance pour ensuite éventuellement l'étendre vers une version en réseau mono ou multi sites très performante.

## 8.2. Fonctions d'un logiciel de GMAO

### 8.2.1. Gestion du patrimoine de l'entreprise

OptiMaint s'adapte et assure le suivi de tous les actifs (type industriel ou tertiaire). La gestion des actifs doit être à la fois simple et puissant pour que les utilisateurs renseignent et trouvent facilement les informations désirées.

La gestion des actifs permet de :

- Structurer l'ensemble des caractéristiques des moyens à maintenir dans une base de données
- Définir tous les niveaux d'imputation et d'analyses techniques et financières

Pour s'adapter aux besoins, OptiMaint permet de définir les champs de saisie obligatoires et de supprimer de l'affichage les champs qui n'intéressent pas l'entreprise. Pour s'adapter parfaitement l'utilisateur peut créer ses propres champs de saisie. Le tableau de bord (la fiche équipement) est très riche en informations. La disponibilité maximale des actifs dépend de l'organisation et de la planification des interventions. OptiMaint permet d'optimiser toutes les interventions au titre de la maintenance préventive, curative, conditionnelle, etc.

### 8.2.2. LA MAINTENANCE CURATIVE

Elle est très souvent gérée dans l'urgence. Avec OptiMaint, la saisie des bons de travaux et des fiches activités est rapide et simple.

La maintenance curative peut se faire à partir soit d'une demande d'intervention, d'un bon de travail ou tout simplement sans aucune demande au préalable (Figure 7.3).

---

**SCHEMA MAINTENANCE CURATIVE**

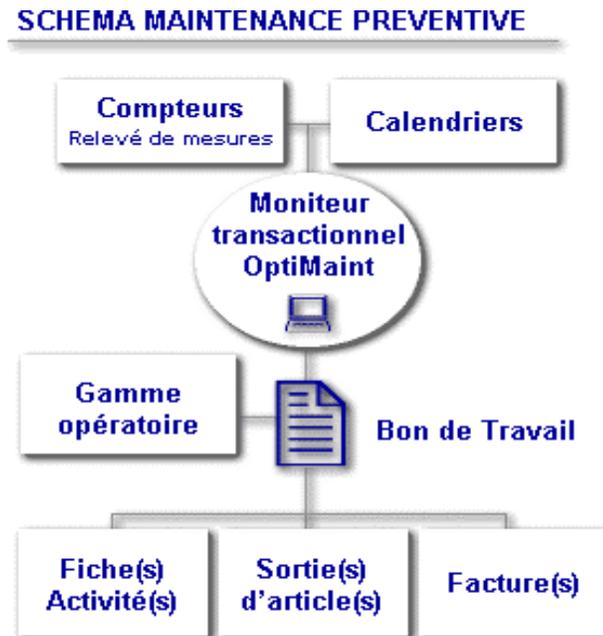
---



Figure 7.3 : Gestion de la maintenance curative par une GMAO

### 8.2.3. LA MAINTENANCE PREVENTIVE

OptiMaint génère automatiquement les bons de travaux pour toutes les interventions qui doivent être réalisées régulièrement en fonction, par exemple d'une planification calendaire ou selon des compteurs (Figure 7.4).



**Figure 7.4:** Gestion de la maintenance préventive par une GMAO

Les bons de travaux peuvent s'imprimer automatiquement sur l'imprimante du destinataire et/ou être envoyés par email.

#### 8.2.4. La Maintenance Conditionnelle

En fonction des relevés de mesures et de conditions préalablement définies, OptiMaint génère automatiquement les bons de travaux.

#### 8.2.5. Gestion des achats

OptiMaint permet de gérer tous types d'achats (Figure 7.5).

La commande peut être établie directement sans aucune étape au préalable.

Mais elle peut être également générée depuis :

- la suggestion de réapprovisionnement qui tient compte du stock et éventuellement du préventif
- une ou des demandes d'achat
- ou un bon de travail

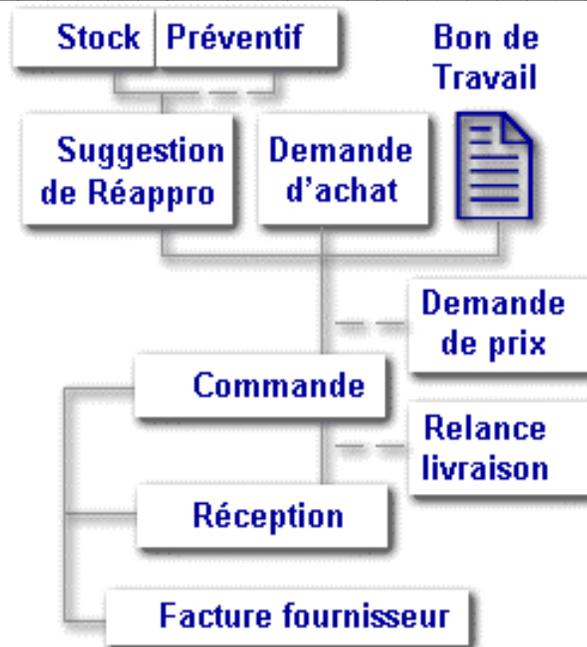


Figure 7.5: Gestion des achats curatifs par une GMAO

OptiMaint permet de relancer des livraisons en retard par courrier, fax ou email. Lors de la réception, un contrôle quantité/qualité avec une gestion des litiges est possible en vue d'une cotation fournisseur. La facture générée depuis la commande ou le ou les bons de réception peut faire appel à une phase de validation.

Il est possible d'avoir un échange de données automatique avec les différents logiciels d'achats, de stock, ERP ... ce qui évite des doubles saisies, toujours source d'erreur et de perte de temps !

### 8.2.6. Gestion de stock

OptiMaint prend en charge la gestion globale de tous les stocks avec la possibilité de renseigner (Figure 7.6) :

- les paramètres de gestion des stocks (unité de stock, stock minimum, maximum, point de commande ...)
- les caractéristiques commerciales des articles (fournisseurs, PMP, TVA, délai de livraison, remise ...)
- les aspects techniques avec la possibilité de définir des champs de saisie propres à l'entreprise afin de personnaliser OptiMaint aux besoins

OptiMaint permet également une gestion documentaire sur toutes les fiches articles, équipements, fournisseurs etc.

Il est possible d'avoir un échange de données automatique avec différents logiciels d'achats, de stock, ERP ... ce qui permet d'éviter des doubles saisies, toujours source d'erreur et de perte de temps !

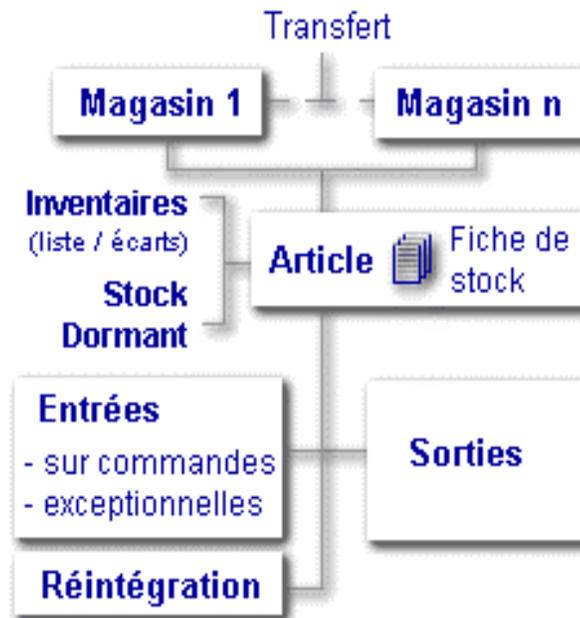


Figure 7.6 : Gestion des stocks par une GMAO

### 8.2.7. Gestion du budget

OptiMaint permet de définir des budgets annuels (avec possibilité de détailler par mois) pour (Figure 7.7) :

- un centre de frais (atelier, centre de coûts etc.)
- ou un équipement

Pour chacun de ces niveaux, on peut détailler ou non le budget par :

- main d'œuvre
- articles
- et factures au titre du :
  - préventif
  - curatif
  - et divers

(avec la possibilité de détailler par rubrique).

OptiMaint gère automatiquement l'affectation des coûts par rapport à un budget.

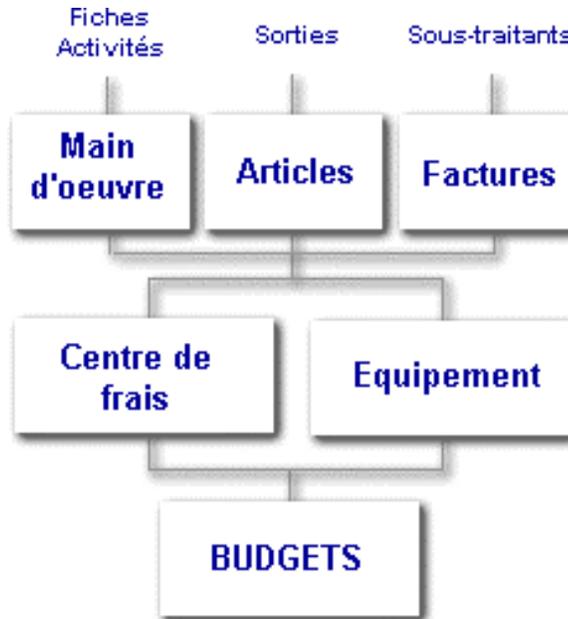


Figure 7.7 : Gestion du budget par une GMAO

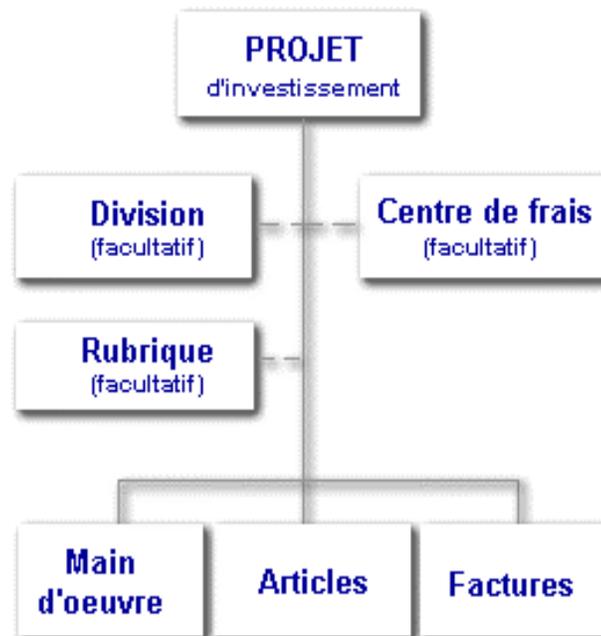
### 8.2.8. Gestion des projets d'investissement

OptiMaint assure la gestion des nouveaux projets d'investissement (travaux neufs) hors budget de fonctionnement (projets d'amélioration, de conception etc.). Tout nouveau projet, peut être rattaché à une division (secteur, etc.) ou un centre de frais (atelier, centre de coût, etc.) au titre éventuellement d'une rubrique (Figure 7.8).

Il est possible de définir les budgets pour la main d'œuvre, les articles et les sous-traitants ou tout simplement un budget global.

La terminologie d'OptiMaint est personnalisable. Il est possible de remplacer le mot "Centre de frais" par "Atelier". Ainsi, tous les écrans et les rapports d'impression seront personnalisés !

Il est possible d'avoir un échange de données automatique avec les logiciels d'achats, de stock, ERP ... ce qui permet d'éviter des doubles saisies, toujours source d'erreur et de perte de temps !



**Figure 7.8** : *Gestion de projets d'investissement par une GMAO*

## CHAPITRE 8: Les Indicateurs de la Maintenance

---

### 1. INTRODUCTION

Plusieurs indicateurs peuvent être utilisés pour caractériser la fonction maintenance. Ces indicateurs sont présentés dans la suite de ce chapitre ainsi que leur interprétation.

### 2. LES DIFFERENTS INDICATEURS

#### 2.1. Le Taux de Rendement Synthétique (TRS)

Le TRS mesure les gains de productivité, il calcule le rendement réel des équipements.

$$\text{TRS} = \frac{\text{Temps de marche}}{\text{Temps d'ouverture}} \times \frac{\text{Quantité réalisée} \times \text{Temps de cycle}}{\text{Temps de marche net}} \times \frac{\text{Quantité acceptée}}{\text{Quant. fabriquée}}$$

- Disponibilité : pannes importantes.
- Cadence de production : Aléas, maîtrise des procédés, changements d'outils, défauts d'utilisation, petites pannes, micro-défaillances.
- Qualité : effets de ralentissement et des arrêts, maîtrise des procédés, erreurs humaines.

Avec les définitions suivantes :

- Temps de marche : (ou temps brut de fonctionnement) temps d'ouverture diminué des temps de panne et des temps de changement d'outil.
- Temps d'ouverture : temps pendant lequel l'utilisateur du bien exige que le bien de production soit en état d'accomplir une fonction requise.
- Quantité réalisée x temps de cycle : temps idéal de fabrication s'il n'y avait pas eu d'aléas ou de pannes.
- Temps de marche net : (ou temps net de fonctionnement) temps brut de fonctionnement diminué des temps de micro arrêts et de ralentissements.
- Quantité acceptée : quantité de produits fabriqués sans défauts.
- Quantité fabriquée : quantité totale de produits fabriqués conforme ou non.

## 2.2 Coûts de la Maintenance

Le budget de la maintenance est-il bien dimensionné et bien utilisé ?

*Importance économique de la maintenance :*

$$\frac{\text{Coût de la maintenance}}{\text{Valeur des immobilisations brutes actualisées}}$$

Ce ratio (ordre de grandeur 4 à 5 %) mesure le poids de la maintenance par rapport au capital à maintenir.

*Impact économique de la maintenance :*

$$\frac{\text{Coût de la maintenance}}{\text{Chiffre d'affaires}}$$

Cet indicateur caractérise le poids de la maintenance dans une tonne de fonte ou une heure de vol d'avion. *Implication économique de la maintenance :*

$$\frac{\text{Coût de la maintenance}}{\text{Valeur ajoutée produite}}$$

Ordre de grandeur 6 à 12 %.

## 2.3. Performances des équipements [3]

Mesure des résultats de présentation de la maintenance par rapport aux attentes des clients internes et externes.

*Disponibilité des équipements :*

De nombreux indicateurs FMD sont possibles, Par exemple :

$$D = \frac{\sum T_i}{T_o}$$

ou très simplement le taux de défaillance  $\lambda$  en panne / heure.

*Pertes de production :*

$$\frac{\text{Cout de la maintenane}}{\text{Cout de defaillanc}}$$

Ce ratio de criticité économique est délicat à mesurer à cause des coûts indirects qu'il est cependant nécessaire d'estimer.

*Taux d'insatisfaction des clients :*

A évaluer par un indice prenant en compte les DT, les délais non tenus, la non qualité des interventions, etc.

#### **2.4 L'efficacité du service maintenance [3]**

Mesure l'efficacité interne des équipes et de l'organisation en place.  
Part de dépannage par rapport à l'activité globale

$$\frac{\text{Heures de depannage}}{\text{Heures totales d'activite}}$$

Ce ratio, inférieur à 30 % dans nombreux secteurs, est la mesure indirecte de la part ou de l'efficacité du préventif.

#### **2.5 Productivité du personnel de maintenance**

$$\frac{\text{Temps effectif de travail}}{\text{Temps de presence}}$$

Ce ratio mesure la qualité de la logistique et de l'organisation (gaspillage de temps en déplacement, en attente, en recherche des moyens nécessaires, etc.)

Réactivité : délai aux réponses aux DT/ Délai moyen

Il mesure la qualité de l'ordonnancement pour les travaux lourds et la réactivité de l'organisation face aux urgences.

A partir de la sélection de l'un quelconque de ces indicateurs, il doit être possible de « naviguer » pour déterminer sa tendance annuelle, trimestrielle, mensuelle,

hebdomadaire ou quotidienne et focaliser sur le niveau inférieur pour analyser les causes d'une dérive.

## 2.6 Ratios de Maintenance normalisés (AFNOR X 60-020)

En janvier 1986 l'AFNOR a introduit un certain nombre de « ratio de maintenance et de gestion des bien durables » destinés :

- En interne « à fixer des objectifs économiques et techniques, suivre les résultats pour apprécier les écarts et les analyser ».
- En externe « à aider les responsables d'entreprise pour se situer et comparer leurs coûts et performances entre sociétés d'un même secteur économique ».

Cette norme expérimentale s'appuie sur une terminologie normalisée (exemple des temps de maintenance) de façon à ce que les saisies (bases de la formation des ratios) soient explicites et reconnues par tous. Cette normalisation a pour objectifs :

- Introduire et définir la notion de ratio.
- Décrire les ratios liés à la maintenance et aux performances générales de l'entreprise.
- Préciser les ratios liés à la politique en matière de maintenance et de gestion des biens.
- Décrire les ratios employés pour la gestion du personnel de maintenance.
- Fournir conjointement des indications sur l'analyse des temps d'indisponibilité et de maintenance.
- Proposer un exemple d'utilisation de ratio.

### DEFINITION

*Un ratio est le rapport de deux données*

Il permet, par exemple, d'évaluer ou de mesurer une réalité; de contrôler des objectifs; de se comparer entre unités distinctes, entreprises ou secteurs d'activité; de prendre des décisions adaptées (politique de maintenance, investissement, gestion du personnel, etc.).

### REMARQUE

L'étude des ratios peut être effectuée à différents niveaux pour un secteur d'activité; pour une entreprise face à son secteur d'activité; évolution de l'entreprise face à elle-même; fonction maintenance face à l'entreprise; fonction maintenance face à elle-même.

## UTILISATION DES RATIOS EN MAINTENANCE

Les ratios décrits dans ce chapitre aident les gestionnaires de maintenance à analyser les événements auxquels ils sont confrontés, à optimiser et à atteindre les objectifs visés.

Ils s'appliquent aux données échangées au sein de la fonction maintenance dans le cadre de ses activités et de ses relations avec d'autres postes et fonctions de l'entreprise.

Les ratios peuvent être utilisés au moment de l'établissement d'un budget prévisionnel, d'un suivi de budget, d'un suivi de la disponibilité d'un bien, d'un suivi d'évolutions de caractéristiques techniques (équipements, défaillances, rechanges, etc.), dans le cadre d'un audit, d'études particulières d'indisponibilité, etc.

Les ratios indiqués dans les paragraphes suivants sont extraits de la norme NF X60-020. Ils ne sont pas limitatifs. De plus, chaque entreprise peut avoir des ratios qui lui sont propres.

### RATIOS POUR LA MAINTENANCE ET LES PERFORMANCES GENERALES DE L'ENTREPRISE

$$\text{Ratio1} = \frac{\text{Coûts de maintenance}}{\text{Valeur de l'actif à maintenir}}$$

- Ⓟ Le ratio 1 est un ratio de politique générale n'intervenant pas comme facteur de décision de remplacement.

$$\text{Ratio2} = \frac{\text{Coûts de maintenance}}{\text{Valeur ajoutée produite}}$$

- Ⓟ Le ratio 2 permet des comparaisons inter-entreprises dans des secteurs identiques, le rapport :

Ⓟ

$$\frac{\text{Ratio 1}}{\text{Ratio 2}} = \frac{\text{Valeur ajoutée produite}}{\text{Valeur de l'actif à maintenir}}$$

$$\text{Ratio3} = \frac{\text{Coûts de maintenance}}{\text{Chiffre d'affaire relatif à la production}}$$

- Ⓟ le ratio 4 permet à l'intérieur de l'entreprise, de mesurer l'évolution des coûts de maintenance à court terme.

$$\text{Ratio 4} = \frac{\text{Coûts de maintenance}}{\text{Quantité de production}}$$

- Ⓟ Le ratio 5 est un indicateur d'évolution de l'efficacité économique de la maintenance.

$$\text{Ratio 5} = \frac{\text{Coûts de maintenance} + \text{coûts d'indisponibilité}}{\text{Chiffre d'affaire relatif à la production}}$$

- Ⓟ Le ratio 6 est un indicateur d'évolution de l'efficacité technique de la maintenance.

$$\text{Ratio 6} = \frac{\text{Coûts de défaillance}}{\text{Coûts de maintenance} + \text{Coûts de défaillance}}$$

### **Ratios pour la politique en matière de maintenance et de gestion des biens**

Ces ratios concernent globalement l'actif à maintenir, l'ensemble fonctionnel (atelier, chaîne de fabrication), la famille de machines (tour, etc.), le constructeur de chaque catégorie et le type chez chaque constructeur.

#### ***Ratios relatifs à l'analyse budgétaire.***

$$\text{Ratio 7} = \frac{\text{Valeur du bien à maintenir} + \text{Coûts de maintenance}}{\text{Quantité de la production}}$$

- Ⓟ Le ratio 7 est un indicateur de l'évolution des coûts d'exploitation par unité produite (permet de décider un remplacement, une modernisation). Il nécessite l'homogénéité des biens considérés (même âge, même technologie...).

$$\text{Ratio 8} = \frac{\text{Coûts des travaux de sous-traitance}}{\text{Coût de la maintenance}}$$

Le ratio 8 est à rapprocher du taux d'activité correspondant

au ratio :  $\frac{\text{Valeur ajoutée produite}}{\text{Valeur du bien à maintenir}}$

$$\text{Ratio 9} = \frac{\text{Coûts de maintenance préventive}}{\text{Coûts de maintenance (préventive + corrective)}}$$

Le ratio 9 permet de mettre en évidence l'importance relative des coûts de maintenance préventive.

$$\text{Ratio 9} = \frac{\text{Coûts des révisions, modernisations, renovations ou reconstructions}}{\text{Coûts de maintenance}}$$

Le ratio 10 est un indicateur pour la décision de remplacement des équipements.

**Remarque**

Les coûts de maintenance peuvent être analysés par nature du personnel, outillage, pièces de rechange, etc.) et par destination (des préparations, interventions, suivi, etc.). ils peuvent être imputés soit en exploitation, soit en investissement.

$$\text{Ratio 10} = \frac{\text{Coûts d'outillage et des équipements de maintenance}}{\text{Coûts du personnel d'intervention}}$$

Le ratio 11 permet de situer l'évolution de l'importance de l'outillage par rapport aux moyens correspondants en main-d'œuvre.

$$\text{Ratio 11} = \frac{\text{Coûts des documents techniques}}{\text{Coûts de maintenance}}$$

$$\text{Ratio 12} = \frac{\text{Coûts des consommables}}{\text{Coûts du personnel d'intervention} + \text{Coûts des consommables}}$$

Le ratio 13 est un indicateur des dépenses courantes. Il permet de choisir entre un remplacement rapide des pièces de rechange et mesure et une réparation approfondie du matériel par le personnel.

$$\text{Ratio 13} = \frac{\text{Valeur du stock maintenance}}{\text{Valeur des biens à maintenir}}$$

Le ratio 14 est lié à l'évolution du taux de rotation

du stock :  $\frac{\text{Coûts des pièces consommées}}{\text{Valeur du stock de maintenance}}$

**Tableau 7.1 : Exemple d'analyse des coûts de maintenance**

	Personnel	Outillage	Consommés	Sous-
--	-----------	-----------	-----------	-------

				traitance
Préparation	X			
Documents techniques	X	X	X	X
Intervention	X			
Suivi et gestion	X			
Magasinage et stockage	X			
Formation	X			

### Ratios liés à l'analyse des temps

#### ***Ratios relatifs à la mesure de la disponibilité***

$$\text{Ratio 15} = \frac{\text{Temps requis}}{\text{Temps total}}$$

Le ratio 15 exprime le temps d'engagement des biens.

$$\text{Ratio 16} = \frac{\text{Temps effectif de disponibilité}}{\text{Temps requis}}$$

Le ratio 16 est un indicateur de la disponibilité opérationnelle des biens.

$$\text{Ratio 16 (variante)} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps de fonctionnement} + \text{Temps propre d'indisponibilité}}$$

Remarque :

Le  $(\text{ratio 16}) \times 100$  est égal au pourcentage des temps effectifs de disponibilité par rapport au temps requis.

Le ratio 17 exprime le taux d'utilisation des biens :  $(\text{ratio 17}) \times 100 = \text{taux d'utilisation des biens}$ .

$$\text{Ratio 17} = \frac{\text{Temps de fonctionnement}}{\text{Temps effectif de disponibilité}}$$

#### **Ratios relatifs à la mesure de l'indisponibilité pour maintenance**

Le ratio 18 exprime la pénalité d'indisponibilité subie par l'utilisateur par la maintenance.

$$\text{Ratio 18} = \frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps requis}}$$

Le ratio 19 met en évidence les causes d'indisponibilité dues à la maintenance par rapport à celles liées à des causes externes : énergie, main-d'œuvre, temps de non détection de la défaillance, temps d'appel à la maintenance, temps de remise en service, etc.

$$\text{Ratio 19} = \frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps effectif d'indisponibilité}}$$

Le ratio 20 est un indicateur de l'efficacité globale de la maintenance conjointement avec le ratio 21 (taux de défaillance). Il inclut toutes les opérations de maintenance (corrective et préventive) et dépend de la fiabilité et de la maintenabilité des équipements. Des pondérations sont possibles.

$$\text{Ratio 20} = \frac{\text{Temps propre d'indisponibilité pour maintenance}}{\text{Temps de fonctionnement ou quantité de production}}$$

$$\text{Ratio 21} = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{Temps de fonctionnement}}$$

Ratio 21 = Définition du taux de défaillance

**Remarque**

L'inverse du ratio 21 est le MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement).

***Ratios relatifs des suivi des activités de maintenance***

Le ratio 22 permet l'anticipation des charges en personnel d'intervention par rapport aux prévisions d'indisponibilité.

$$\text{Ratio 22} = \frac{\text{Temps actif de maintenance}}{\text{Temps effectif de disponibilité}}$$

Le ratio 23 permet de mettre en évidence l'importance de la maintenance conditionnelle dans les opérations actives de la maintenance préventive.

$$\text{Ratio 23} = \frac{\text{Temps actif de maintenance conditionnelle}}{\text{Temps actif de maintenance préventive}}$$

Remarque :

$(\text{Ratio } 23) \times 100 = \text{Pourcentage affecté à la maintenance conditionnelle.}$

Le ratio 24 met en évidence l'importance de la maintenance corrective dans les interventions actives de maintenance.

$$\text{Ratio } 24 = \frac{\text{Temps actif de maintenance preventive}}{\text{Temps actif de maintenance}}$$

On peut envisager deux ratios complémentaires en remplaçant la maintenance corrective par la maintenance systématique ou la maintenance préventive.

Exemples :

$$\frac{\text{Temps actif de maintenance preventive}}{\text{Temps actif de maintenance}} \times 100 = \text{Pourcentage affecté à la maintenance preventive}$$

$$\frac{\text{Temps de diagnostic}}{\text{Temps de maintenance corrective}} \times 100 = \text{Pourcentage affecté au diagnostic}$$

$$\frac{\text{Temps de reparation}}{\text{Temps de maintenance corrective}} \times 100 = \text{Pourcentage affecté à la reparation proprement dite}$$

Le ratio 25 met en évidence l'ensemble des temps de mise en œuvre des opérations de maintenance corrective (temps administratif, logistiques, techniques, de préparation).

$$\text{Ratio } 25 = \frac{\text{Temps annexes de maintenance corrective}}{\text{Temps de maintenance corrective}}$$

Exemple :

$$\frac{\text{Temps de logistiques}}{\text{Temps de maintenance corrective}} \times 100 = \text{Pourcentage affecté aux contraintes logistiques}$$

Le ratio 26 met en évidence l'importance des activités de préparation du travail par rapport aux interventions effectives sur les biens.

$$\text{Ratio } 26 = \frac{\text{Temps de preparation du travail}}{\text{Temps actif de maintenance}}$$

Exemple :

$$\frac{\text{Temps de preparation}}{\text{Temps de maintenance corrective}} \times 100 = \text{Pourcentage affecté à la preparation du travail}$$

Le ratio 27 indique la part des interventions préparées dans toutes les interventions effectuées sur les biens.

$$\text{Ratio 27} = \frac{\text{Temps de travaux prepares}}{\text{Temps actif de maintenance}}$$

### **Ratios employés pour la gestion du personnel de la maintenance**

Les ratios 28 et 29 sont liés à la formation du personnel. Ils sont à rapprocher de l'évolution de la complexité de la maintenance et des objectifs de disponibilité. Ils sont à comparer aux ratios généraux de formation dans l'entreprise.

$$\text{Ratio 28} = \frac{\text{Temps ou couts de formation maintenance}}{\text{Effectif maintenance}}$$

$$\text{Ratio 29} = \frac{\text{Temps ou cout de formation maintenance}}{\text{Temps ou cout de formation entreprise}}$$

# **ANNEXE**

## **Etude de Cas**



المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس

École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

## Etude de Cas : gestion technique d'une ligne de production

### PARTIE I : ETUDE DE DISPONIBILITE

#### ▪ Contexte et objectif de l'étude

Cette étude de cas est tirée d'une expérience de recherche de la maîtrise de la disponibilité opérationnelle d'une ligne de production d'un processus de transformation laitier (PMI agroalimentaire de 350 personnes). Les machines (homogénéisateurs, écrémeuses, pasteurisation, emballeuses) étaient homogènes (4 à 6 ans d'âge), placées en série et dédiées à un seul produit fromager.

Lors de l'étude, la demande du produit était en forte croissance, la capacité de production devenant insuffisante. L'objectif était donc d'améliorer la disponibilité, initialement faible et non mesurée, en proposant un modèle d'organisation en « manuel », en le validant puis en l'automatisant. L'organisation préconisée a été expérimentée pendant trois mois, puis validée et pérennisée avec saisie par code-barres et formation d'un agent des méthodes.

#### ▪ Remarque

Depuis lors, la demande ayant faibli, l'objectif est devenu de faire tourner cette ligne au moindre coût.

#### ▪ Données de départ

- Engagement de la ligne : 16h/j ouvrable + 9h le samedi = 89 h/semaine
- Dossier machine « constructeur de chaque machine »
- Relevé des seuls temps d'arrêt TA > 15 min fourni par la production pour les six derniers mois.
- Bon d'intervention « lacunaires » relatifs aux interventions correctives : description du travail et durée d'intervention TTR
- Un chef de service et des techniciens d'intervention, mais pas de « méthodes de maintenance »
- Possibilité de former une équipe VSD (vendredi, samedi, dimanche) en maintenance avec des techniciens volontaires

- **Décomposition structurelle du process et saisie des données**

La ligne L a été décomposée en 11 machines liées en série suivant la figure 1.



Figure 1 : le process

Très vite, il est apparu que l'unité F limitait la production par des arrêts divers, assez longs et répétitifs. Chaque machine a été décomposée en sous-ensembles fonctionnels codés de 01 à 12 suivant la technologie propre à chaque unité. De plus, un second code de 01 à 12 a été proposé, en concertation avec les opérateurs et dépanneurs, correspondant aux « causes » apparents d'arrêts les plus fréquents :

01 à 06 : causes externes (matières, qualité, induits, etc.)  
 07 à 12 : arrêts propres à l'unité, à saisir même s'il s'agit d'un « micro-arrêt » < 1 min.

- **Analyse de la fiabilité de l'unité F**

Cette étude initiale a été menée à partir des seules données existantes : chronologie complète de 19 interventions correctives sur les 6 mois précédents (soit 2314 h de fonctionnement), avec saisie des seuls temps d'arrêt > 15 min.

TBF	70	282	25	187	45	308	35	17	86	111	51	7	214	9	101	402	120	29	136
TA	3	7	12	1,5	2	8	0,5	3	2,5	11	3,5	1,5	4	0,5	8	5	2	4	

L'unité F a été choisie a priori comme l'élément pénalisant le plus la disponibilité de la ligne.

- *Approximation de F(i)*

- si  $N > 50$ :  $F(i) = \frac{i}{N}$

- si  $50 > N > 20$ , on utilise la formule des rangs moyens :  $F(i) = \frac{i}{N+1}$

- si  $N < 20$ , formule des rangs médians :  $F(i) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$

$$F(i) = \frac{i-0,3}{N+0,4} \text{ avec } N=19$$

- Tableau de valeurs et graphe de Weibull



On montre que  $D_n = \frac{F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right]}{\text{Max } |f(t) - F(t)|}$  pour  $t \geq \gamma$   $F(t) = 0$  pour  $t < \gamma$  suit une loi ne dépendant que de  $n$  et on écrit que :

$$P [\text{Max } |f(t) - F(t)| < D_{n,\alpha}] = 1 - \alpha$$

La valeur de  $D_{n,\alpha}$  est donnée par la table de **KOLMOGOROV-SMIRNOV**

Si  $D_n > D_{n,\alpha}$  alors on refuse l'hypothèse du modèle théorique.

- Pour un niveau de confiance de 5%, l'hypothèse de loi de Weibull est-elle retenue ?

- **Analyse de la maintenabilité de l'unité F**

A partir des données existantes (durées d'arrêt calculer la durée moyenne d'arrêt MTA (MTTR) de l'échantillon

Remarquons qu'une analyse probabiliste de la maintenabilité reste possible, la médiocre qualité des données disponibles dans notre cas la rendant inutile.

- **Analyse de la disponibilité de l'unité F**

En fonction des données disponibles (lacune dans l'archivage des TTR), nous Calculer la disponibilité opérationnelle de l'unité F.

Il est évident que cette disponibilité est très largement optimiste, les durées courtes ou très courtes d'arrêt ( $TA < 15$  minutes) n'étant pas prises en compte. Cette saisie des micro-et mini-arrêts est évidemment prévue pour l'organisation préconisée.

- **Analyse de la disponibilité globale  $D_g$  de la ligne**

Le même calcul pour les autres unités donne :

Unité	Ligne L période du 1/1 au 1/7			1/Di
	Moyennes calculées			
	MTBF	MTA (MTTR)	Di	
A	350	4,7	0,987	
B	845	1,3	0,998	
C	385	3,6	0,991	
D	25	0,3	0,988	
E	820	2,0	0,998	
F	125	4,4	0,966	
G	170	0,6	0,996	

H	325	1,1	0,997
I	30	0,8	0,974
J	1710	4,5	0,997
K	250	3,2	0,987
			$\sum \frac{1}{D_i}$

Soit  $D_{op,U_i}$  notée  $D_i$ , la disponibilité opérationnelle de l'unité  $U_i$ . Ces unités étant liées, la disponibilité globale de la ligne L est donnée par :

$$D_{op} = \frac{1}{\sum \frac{1}{D_i} - (N-1)}$$

Calculer la disponibilité de la ligne

Pour les 6 derniers mois d'activité, la disponibilité opérationnelle de la ligne est trop optimiste. Cette valeur a pour intérêt de donner une valeur de référence pour comparaison :

- à elle-même, par intervalles successifs de temps, pour établir un graphe d'évolution,
- avec les  $D_g$  d'autres lignes semblables, à l'intérieur de l'entreprise ou à l'extérieur,
- avec un objectif de disponibilité donné

**Remarque :**

Six mois est une période trop longue, un suivi hebdomadaire permet une meilleure gestion et une amélioration permanente.

## PARTIE II : OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE SYSTEMATIQUE

Dans cette partie nous allons essayer d'optimiser la périodicité des interventions systématiques sur l'unité F

Considérons pour la suite de l'exercice que  $\beta = 2$ .

La réparation de cette machine coûte en moyenne 1000 DT en pièces de rechange.

Le coût d'une heure de main d'œuvre en maintenance est de 100 DT

Le coût moyen de l'immobilisation de l'équipement est de l'ordre de 5.000 DT.

1. Donner l'expression du coût moyen par unité d'usage de la maintenance corrective
2. Donner une expression du coût moyen par unité d'usage de la maintenance préventive
3. Expliquer brièvement la méthode d'optimisation de la maintenance préventive en se basant sur la loi de Weibull
4. Quelle est la période optimale de l'intervention préventive systématique ?
5. Déterminer le gain par rapport à une politique de maintenance corrective
6. Quel est l'inconvénient majeur de la maintenance préventive systématique ?

### Annexes I : Loi de Weibull

Fonction de répartition :

$$F(t) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \text{ pour } t \geq \gamma \quad F(t) = 0 \text{ pour } t < \gamma$$

Espérance :

$$m = \gamma + \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right)$$

### Annexes II : Tableau de la loi Gamma

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,0	1,0000	2,0	1,0000
1,1	0,9514	2,1	1,0465
1,2	0,9182	2,2	1,1018
1,3	0,8975	2,3	1,1667
1,4	0,8873	2,4	1,2422
1,5	0,8862	2,5	1,3293
1,6	0,8935	2,6	1,4296
1,7	0,9086	2,7	1,5447
1,8	0,9314	2,8	1,6765
1,9	0,9618	2,9	1,8274
		3,0	2,0000

**Annexes III** : Abaque d'optimisation de la maintenance systématique

