

# **Gestion de la production et de la maintenance**

## **Chapitre 1 :**

### **Introduction à la gestion de production**

Le but de ce chapitre est de présenter et définir, de manière succincte, toutes les notions et concepts de bases, relatif à la gestion de production. Ainsi ce chapitre débute par des notions sur l'organisation et la gestion des systèmes de production. Nous commençons par les systèmes de production, leurs classifications, et les différentes politiques de gestion de production. Puis, nous donnons des notions sur les flux, la prise de décision dans les entreprises et la planification de la production.

## 1.1. Organisation et gestion des systèmes de production

Pour pouvoir donner une définition de la gestion de production, il faut d'abord définir ce que l'on entend par la fonction production.

### 1.1.1. Définition de la fonction production

La fonction production est l'ensemble des activités transformant les flux de matières, financiers et d'informations en produits finis (biens ou services), grâce aux ressources de production (les machines, les opérateurs,...etc).

Les entreprises se trouvent devant deux objectifs globaux contradictoires que sont la satisfaction des besoins des clients, et la réalisation d'un maximum de bénéfices.

### 1.1.2. Définition de la gestion de production

La gestion de production consiste dans la recherche d'une organisation efficace de la production des biens et services. Selon (De Wolf, 2003), la gestion de production consiste à obtenir un produit donné dont les caractéristiques sont connues, en mettant en œuvre un minimum de ressources. Dans la gestion de production, on considère généralement les caractéristiques du produit comme étant des données. Elles consistent en : la définition du produit, le processus de fabrication, et la structure de la demande à satisfaire.

Ces trois caractéristiques relèvent des sciences de l'ingénieur, des sciences fondamentales, des sciences économiques et de gestion, et des sciences sociales et humaines.

### 1.1.3. Classification des systèmes de production

Dans la littérature, plusieurs critères de classification des systèmes de production sont distingués. Nous pouvons les classer selon les critères suivants :

- Les quantités fabriquées et répétitivités.
- L'organisation des flux de production.
- La relation avec les clients.

#### 1.1.3.1. Classification selon les quantités fabriquées et la répétitivité

La première différence notable entre les systèmes de production est le volume de production. Selon ce critère, on peut classer les modes d'organisation de la production en quatre grandes classes :

- Production unitaire.
- Production par petites séries.
- Production par moyennes séries.
- Production par grandes séries.

Pour chacune de ces séries, les lancements peuvent être répétitifs ou non.

#### 1.1.3.2. Classification selon le flux de production

Cette classification est basée sur l'analyse du flux des produits lors de leur passage à travers le système de production. Dans cette classe, les systèmes de production sont souvent classés en trois grandes catégories :

- Les systèmes discontinus appelés aussi discrets (produits énumérables).
- Les systèmes continus, tels que les raffineries, l'industrie chimique et autres.
- Les systèmes hybrides qui combinent les caractéristiques des deux premières catégories.

Selon la cadence, les spécifications des produits, et le volume de la demande, trois approches d'organisation sont largement employées pour les systèmes discrets : l'aménagement en ligne, l'aménagement par procédé (fonctionnel) et les ateliers flexibles.

- **Aménagement en ligne "en série" ou "par produit"**

- Sont conçus pour la fabrication d'un produit ou d'une gamme de produits similaires.
- Tous les produits suivent le même circuit, les produits passent systématiquement sur chaque poste de travail implanté sur la ligne toujours dans le même ordre.
- Utilisé dans les industries de production à grand volume et dans les ateliers d'assemblage.
- Le but principal de ces lignes consiste à minimiser le temps d'inoccupation des équipements.
- Les temps de production et les niveaux d'en-cours très bas.

- **Aménagement par procédé**

Dans ce type d'organisation des systèmes de production :

- Les machines qui réalisent les mêmes opérations, ou bien des opérations analogues, sont regroupées.
- Les délais de production sont relativement longs et les niveaux d'en-cours sont élevés.
- Les équipements sont, en général, sous exploités et les dates de livraison des demandes sont difficilement maîtrisées.
- Vu la grande variété des produits traités simultanément, les demandes des clients ainsi que la diversité des équipements, le contrôle de la production devient très complexe.
- Les temps dans le système relativement longs et incertains sont les principales sources de problèmes dans ce type d'organisation.
- Les produits traités n'ont pas souvent la même séquence d'opérations, et les temps de production relatifs varient d'une station de travail à l'autre.
- Le caractère aléatoire du taux d'arrivée des lots et les temps de fabrication, implique une variabilité dans la réquisition des ressources à travers le temps, ce qui rend complexe la planification et l'ordonnancement des produits.

Aujourd'hui, les exigences des clients et le développement des systèmes de communication, nous amènent à parler de plus en plus des systèmes de production flexibles.

- **Ateliers flexibles**

Les ateliers flexibles n'admettent pas un aménagement caractéristique. Ils sont plutôt reconnus par leurs aptitudes :

- à s'adapter aux multiples changements de l'environnement extérieur et intérieur ;
- pour traiter une grande variété de produits sans la nécessité de temps de préparations et de transferts importants.

### 1.1.3.3. Classification selon la relation avec le client

Courtois et al. (1995) et Giard (2003) distinguent trois catégories de relation avec les clients : production sur stock, production sur commande et assemblage à la commande.

- **Production sur stock**

L'objectif d'une production sur stock est d'anticiper la demande des clients, les fabricants se basent sur des prévisions. Les clients achètent des produits déjà fabriqués et stockés. Une production sur stock est préconisée dans les deux cas suivants :

- Si le délai de production est supérieur à celui de la livraison (produits de grande consommation, électroménager, vêtements,...).
- La fabrication en grandes séries afin de rentabiliser des coûts d'exploitations assez élevés (tirage des livres, fabrication de vêtements ...).

- **Production sur commande**

Dans ce type de production, l'achat des matières premières, des composants et des consommables et la fabrication du produit sont déclenchés à la réception d'une commande ferme du client. Ceci évite alors (sauf cas d'annulation) le stock de produits finis.

Ce type de production, est favorisé par rapport au premier, il permet une diminution des coûts de stockage.

- **Assemblage à la commande où production mixte**

Ce type d'organisation de la production est le plus rencontrée dans la pratique, il se situe entre les deux premiers. Dans le cas où le délai de fabrication est trop long, les fabricants préfèrent anticiper l'achat et la fabrication des composants, en procédant à l'assemblage dès qu'ils ont une commande ferme ("Juste À Temps – JAT"). Cette organisation permet :

- de réduire de façon importante le délai entre la commande et la livraison d'un produit ;
- d'avoir de bonnes prévisions de ventes afin de ne pas constituer de stocks excessifs de composants ;
- de réduire la valeur des stocks et de personnaliser le plus en aval possible tout en étant constitué de composants et sous-ensembles standards.

L'inconvénient d'une telle organisation est l'obligation d'avoir un bon système de production qui présente le minimum d'aléas afin de ne pas perturber les délais. Donc, l'utilisation d'une politique de maintenance intégrée à la production est très recommandée.

Cependant, il existe d'autre type de classification des systèmes de production. De Wolf, (2003) les a classifiés en quatre classes : production en série unitaire, en ateliers spécialisés, en ligne, et en industries de process.

- **Production en série unitaire**

La production unitaire est une production mobilisant sur une période assez longue, l'essentiel des ressources d'une entreprise pour réaliser un nombre très limité de produits. À titre d'exemples, on peut citer la construction de grands avions, les grands chantiers des œuvres d'art de travaux publics, ...

- **Production en ateliers spécialisés**

On parle d'organisation en ateliers spécialisés lorsque tous les équipements assurant une fonction spécialisée sont réunis en un même lieu. À titre d'exemple, on peut citer un atelier d'emboutissage des tôles de voitures, un atelier de peinture dans une usine d'assemblage automobile, ...

- **Production en lignes**

On parle d'organisation en lignes de production lorsqu'un flux régulier de produits passe d'un poste à l'autre, l'ordre de passage étant fixé. À titre d'exemple, les lignes d'assemblage des automobiles.

- **Les industries de process**

On parle d'industries de process lorsque le mode d'organisation est caractérisé par un flux régulier et important de matières premières destinées à être transformées en matières plus élaborées. Comme exemples, on peut citer la sidérurgie, la pétrochimie, le secteur de la chimie lourde, le secteur agro-alimentaire, etc.

Bien que ces critères de classification ne soient pas exhaustifs, ils permettent tout de même de cerner le type d'une entreprise. La typologie de production conditionne le choix des méthodes de gestion de

production, la stratégie de maintenance et de contrôle de qualité qui en suit et qui sont les plus adaptées (Ayed, 2011).

## **1.2. Les flux dans les systèmes de production**

Généralement, trois types de flux circulant dans un système de production : le flux d'information, le flux physique ou de service et le flux financier.

### **1.2.1. Le flux d'information**

Le flux d'information représente l'ensemble des échanges de données entre les différentes parties de la chaîne logistique. Ces informations peuvent être d'ordre commerciale, telles que, la liste des options d'un produit, la fréquence de livraison, ... Mais aussi des informations d'ordre technique, telles que les gammes opératoires, les capacités de production et de transport, le niveau de stock. Cette dernière est devenue très réclamées par les clients qui souhaitent connaître l'état d'avancement de leur commande.

### **1.2.2. Le flux physique et de service**

Le flux physique est constitué par le mouvement des marchandises transportées et transformées depuis le fournisseur des fournisseurs (matières premières et produits semi-finis) jusqu'au client final (produits finis). En passant par les divers stades de produits semi-finis. Un flux de service passe par les mêmes étapes, sans qu'il n'y ait de transformation de matières.

### **1.2.3. Le flux financier**

Le flux financier concerne toute la gestion pécuniaire des entreprises : ventes, achats et autres dépenses. Il s'agit d'informations d'ordre comptable. Ces derniers permettent d'avoir une idée sur les avoirs et les dettes, sur la capacité des acteurs à dégager un profit, mais permettent aussi de calculer les coûts de production et de fournir une idée sur marges de manœuvre futures.

## **1.3. La prise de décision dans l'entreprise et la chaîne logistique**

Traditionnellement, on distingue trois niveaux ou types de décisions dans une entreprise : stratégique, tactique et opérationnel, correspondant respectivement à des horizons à long, moyen et court terme. Ces notions ont été étendues et appliquées à une chaîne logistique. Dans une revue de littérature sur le SCM Ganeshan et al. (1999) ont classifié les travaux en fonction du niveau décisionnel.

### **1.3.1. Les décisions stratégiques**

Les décisions stratégiques engagent l'entreprise sur le long terme (de 6 mois à plusieurs années), elles conditionnent la manière dont l'entreprise va s'insérer dans son environnement pour tirer le maximum de profit des ressources engagées. Ces décisions sont prises par la direction générale qui cherche à répondre à la question centrale "quoi produire ?" et son corollaire "quels moyens à mettre en œuvre pour produire d'une manière efficace ?".

Ganeshan et al. (1999) ont classé les travaux de recherche relatifs à une chaîne logistique en quatre sous-classes :

- Les travaux déterminant des objectifs stratégiques : il s'agit de déterminer les objectifs pour l'ensemble des partenaires.
- Les travaux qui s'intéressent à la conception ou la configuration : il s'agit de déterminer la structure de la chaîne, la sélection des fournisseurs et sous-traitants, la décision d'ouverture ou de fermeture d'un site de production ou leur délocalisation, l'affectation d'une nouvelle zone de marché à un centre de distribution, ...

- Les travaux qui se concentrent sur le développement d'avantages compétitifs : il s'agit d'analyser comment la gestion de la chaîne logistique peut développer ou améliorer la compétitivité des entreprises partenaires.
- Les travaux qui se focalisent sur l'évolution des stratégies des entreprises en matière de chaîne logistique.

### 1.3.2. Les décisions tactiques

Ces décisions permettent de définir comment utiliser les ressources pour atteindre les objectifs identifiés au niveau stratégique. Elles s'appliquent sur un horizon de quelques semaines à quelques mois. À ce niveau, les décisions sont prises par les sous-directeurs "métier". Elles portent sur les problèmes d'organisation de l'acquisition et l'affectation des ressources de l'entreprise, en particulier la planification des activités sur ces ressources.

Selon Ganeshan et al. (1999), les travaux sur le management de la chaîne logistique, au niveau tactique se divisent en quatre sous-classes :

- Les travaux visant à développer des relations inter-entreprises, que celles-ci soient horizontales ou verticales, bilatérales ou multilatérales.
- Les travaux qui s'intéressent à la gestion des opérations intégrées, c'est-à-dire la gestion des activités des entreprises pour garantir l'efficacité globale de la chaîne logistique.
- Les travaux qui se focalisent sur la gestion des systèmes collectifs de transport et de distribution.
- Les travaux développant des systèmes d'information qui cherchent à améliorer l'échange d'informations dans le cadre des objectifs stratégiques.

Shapiro (1999) considère que ce niveau tactique a été très peu étudié par les industriels et les scientifiques.

### 1.3.3. Les décisions opérationnelles

Ces décisions s'appliquent dans le cadre de la gestion courante de l'entreprise (de la journée à la semaine), et concernent l'utilisation optimale des ressources allouées dans le cadre du processus productif de l'entreprise.

Enfin, au niveau opérationnel, Ganeshan et al. (1999) classent la littérature en quatre sous-classes :

- Les travaux relatifs au contrôle et gestion des stocks et des flux physiques.
- Les travaux qui s'intéressent à la coordination de la planification de la production.
- Les travaux qui s'intéressent à la spécification du partage des informations opérationnelles.
- Et enfin, les travaux qui s'intéressent au développement d'outils de pilotage opérationnel.

## 1.4. Les niveaux de planification de la production

La planification de la production consiste à définir, en fonction des délais et des priorités, les dates de début des opérations d'un ordre (ordre de travail, ordre de fabrication, ordre de maintenance, ordre d'achat, ...), afin d'être terminées dans les délais prévus.

Globalement, la planification de la production obéit à la démarche suivante :

- Estimation des besoins par famille de produits.
- Décomposition des besoins de chaque famille en références finales (produit fini).
- Calcul des besoins bruts sur la base de la nomenclature.
- Évaluation des stocks, calcul des besoins nets et planification des ordres.
- Planification des charges (main d'œuvre, machines...) sur la base des gammes d'opération.
- Exécution du plan de fabrication.

La planification de la production est séquentielle et suit une hiérarchie à trois niveaux :

#### 1.4.1. Le Plan Industriel et Commercial (PIC)

Le premier plan est conçu au niveau stratégique de l'entreprise, le PIC est une représentation des activités de production et de vente des macros-produits. Il aide à prendre des décisions sur la gestion des ressources (capacité de production, main d'œuvre, capacité de stockage, capacité de transport, activités sous-traitées, fiabilité des sources d'approvisionnement...) et à trouver l'adéquation entre ces ressources, les moyens financiers et les objectifs de vente.

Les informations fournies par le PIC sont par la suite déclinées en plans de production, d'approvisionnement, financier, d'investissement, de recrutement et formations, ...

#### 1.4.2. Programme Directeur de Production (PDP)

Le PDP reprend les données du PIC sur un horizon moyen et les convertit en programme pour les produits finis. Il sert à :

- Déterminer les besoins bruts et les dates réelles de ces besoins.
- Calculer les besoins nets. C'est-à-dire les quantités réelles de produits à fabriquer si les stocks disponibles ne permettent pas de couvrir entièrement les besoins bruts.
- Équilibrer les stocks sur la base de données de planification (stock minimum, stock maximum, délais, stock de sécurité, stratégie de calcul des lots de commande, ...).
- Équilibrer les charges par l'entremise du MRP (*Manufacturing Resource Planning*), et sur la base des gammes opératoires.

#### 1.4.3. Le Plan de Charge (PDC) ou Plan de Fabrication ou encore Planning d'Atelier

Après calcul des besoins nets, et sur la base de la nomenclature de chaque produit, les besoins en composants sont calculés par la méthode MRP. Les matières et composants calculés peuvent être approvisionnés de deux manières :

- Approvisionnement interne : Les composants sont fabriqués par les ateliers ou livrés par le stock déjà constitué. Le système MRP génère dans ce cas des ordres planifiés.
- Approvisionnement externe : Un achat sera effectué auprès des fournisseurs. Le système MRP lance alors des demandes d'approvisionnement externes.

Pour les composants à fabriquer, et sur la base des gammes d'opérations, un plan de charges est réalisé. Le plan de charge détermine l'adéquation entre la quantité de travail à affecter et la capacité nominale des ressources de production. Dans le cas d'un dépassement de cette capacité, on peut :

- Effectuer un lissage en transférant une partie des tâches sur les périodes précédentes moins pleines, en d'autres termes, on procède à un déplacement des ressources dans le temps.
- Augmenter la capacité de certaines ressources (recrutement de personnel, travail en heures supplémentaires, augmentation du nombre de magasins de stockage, acquisition de nouveaux équipements, ...).
- Avoir recours à la sous-traitance pour une partie de la production ou seulement pour certaines opérations de fabrication.

Le plan de charge est fait sur un horizon plus court que celui de PDP (quelques semaines). Sa mise à jour est quotidienne.



## **Chapitre 2 :**

### **Introduction à la gestion de maintenance**

Le but de ce chapitre est de présenter et définir, de manière succincte, toutes les notions et concepts de bases, relatif à la gestion de la maintenance. Ainsi ce chapitre débute par des notions sur la maintenance, l'organisation et la gestion de la maintenance des systèmes de production. Nous commençons par la fonction maintenance, leurs métiers, leurs missions, et les différents concepts relatifs à cette fonction. Puis, nous donnons la relation entre la fonction maintenance et les autres fonctions de l'entreprise, l'organisation de la fonction maintenance et leur niveaux d'intégration, les différents types de maintenance et l'analyse des coûts associés à cette fonction.

## 2.1. La fonction maintenance

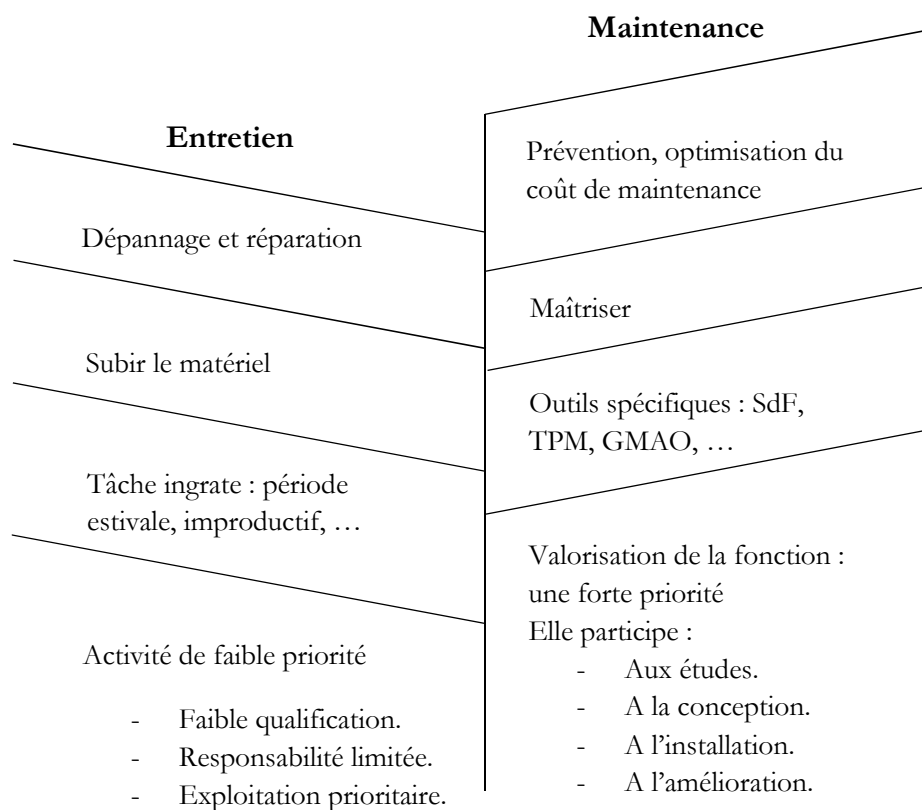
"De nos jours, la fonction maintenance est une composante indissociable de la satisfaction du client, puisque une machine défaillante engendre une diminution de la cadence de production, mais bien souvent également génère des rebuts, et que les coûts induits obligent à augmenter le montant du coût de production. Elle est désormais devenue une des fonctions stratégiques de l'entreprise".

## 2.2. Définition de la maintenance

On peut définir la maintenance comme étant, "l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise. Ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et de management" (Afnor, 2001).

## 2.3. Entretien / Maintenance : objectifs, activités et outils

Avant : opposition de sens



**Aujourd'hui :**

L'entretien est un ensemble d'activités ayant pour but de maintenir dans leur état initial des biens existants, sans changer leur usage ou fonction.

L'entretien peut s'avérer nécessaire plusieurs fois pendant la durée de vie, il limite ainsi les risques de désordre ou de pannes.

## 2.4. Les métiers de la fonction maintenance

Différents postes peuvent être proposés aux débutants. Nous pouvons citer :

#### 2.4.1. Responsable "entretien et maintenance"

Un jeune diplômé aura pour mission de diriger une équipe composée de dizaine de personnes. Ses fonctions principales sont : études et réalisation en vue de la maintenance et de l'amélioration des conditions de sûreté de fonctionnement des équipements.

#### 2.4.2. Responsable "maintenance" dans une filière d'un groupement d'entreprise

Le jeune diplômé sera responsabilisé sur une vingtaine de personnes. Parmi ses missions la gestion du budget et la mise en œuvre d'un plan de maintenance.

#### 2.4.3. Chef d'entretien

Le jeune diplômé peut occuper le poste chef d'entretien. Il prit en charge :

- De l'entretien et les travaux neufs.
- De la rationalisation des équipements.
- De la mise en place de ma maintenance assistée par ordinateur (MAO) sur site.

Avec le temps, les débutants acquièrent de l'expérience dans ses postes. Ils peuvent être promus aux postes de cadre supérieures selon des critères fixés par la gestion des ressources humaines (GRH). Nous pouvons citer à titre d'exemples.

#### 2.4.4. Responsable "entretien et travaux neufs"

- Il dirige la mise en place des plans de maintenance.
- Il dirige et participe dans la restructuration des chaînes de production et de leurs automatisations.
- Assure la gestion de la sous-traitance.

#### 2.4.5. Chef de département maintenance dans une entreprise ou dans une société de service en maintenance

- Il entretient les relations avec les clients.
- Procède aux chiffrages.
- Organise et suit les travaux de maintenance.
- Encadre le personnel d'exécution.

#### 2.4.6. Spécialiste en études de maintenance

- Il prépare les dossiers techniques et les procédures de maintenance.
- Il réalise les audits de maintenance auprès des clients.

Le spécialiste en Génie Industriel possède une formation multidisciplinaire axée principalement sur l'optimisation et la gestion des différentes fonctions de l'entreprise. Parmi ces fonctions, le management de la maintenance en vue d'améliorer la disponibilité des biens et systèmes de production.

Les compétences d'un spécialiste en Génie Industriel et sa maîtrise des outils et méthodes d'optimisation sont recherchées par tout type de structure (PME-PMI, Grande entreprise ...) et tout secteur d'activités. On peut citer, quelques exemples de postes en secteurs spécifiques :

- Le secteur bancaire :

Il peut occuper le poste de chef de projet monétique : il préoccupe du suivi informatique du projet (maintenance, évolution du produit ...).

- Dans le secteur des transports comme responsable du parc des véhicules.

- Il dirige et anime les équipes des ateliers de maintenance.
- Il supervise la gestion de magasin de pièces de rechanges.
- Consultant en qualité de maintenance : parmi ses fonctions
  - Il assure la formation "assurance qualité appliquée à la maintenance".
  - Il élabore des procédures.
  - Il développe et met en œuvre les plans qualité et réalise des actions pédagogiques.
- Ingénieur conseil en fiabilité et automatismes industriels :
  - Il conçoit et met en œuvre de projets d'études.
  - Le choix de concepts d'instrumentation et de contrôle-commande.
  - La mise en œuvre des solutions retenues (architectures de réseaux, fournisseurs, montage ...).

## 2.5. Missions de la fonction maintenance

La mission globale de la fonction maintenance est la minimisation du rapport : charges de a fonction maintenance / la quantité et la qualité de service rendu par le système.

Les éléments maintenus constituent des outils pouvant assurer diverses fonctions (production, approvisionnement, commerciales, ressources humaines, services, ...). Ces dernières ne peuvent atteindre leurs objectifs que grâce à des actions de maintenance efficaces, efficientes et pertinentes, et dont le rendement doit être optimal.

Les missions de la maintenance peuvent être décomposées suivant cinq plans interdépendants :

- Le plan technique :
  - Accroître la durée de vie des équipements.
  - Améliorer la disponibilité.
  - Exploitation des infrastructures techniques : fourniture d'énergie, distribution des fluides, ... généralement sont des domaines prisent en charge par la fonction maintenance.
- Le plan économique :
  - Optimisation des dépenses de maintenance : les coûts de maintenance représentent des postes importants. Ils sont très difficiles à gérer, car ils rentrent souvent dans la catégorie des frais généraux.
  - La conservation de la valeur du patrimoine est souvent liée à la qualité de gestion de la maintenance.
  - La qualité de maintenance des biens contribue activement à l'image de marque de l'entreprise.
  - Réduire le coût global de possession des équipements.
- Le plan social :
  - Réduire le nombre d'évènements imprévus, en réduisant le risque d'accidents.
  - Améliorer la qualité du travail : la maintenance des équipements et des outils de travail contribue à l'ambiance sociale des entreprises.
- Le plan environnemental :

La maintenance est souvent responsable de :

- La lutte contre les nuisances.
- L'évacuation des déchets (gazeux, liquides, solides, ...).

- Le plan réglementaire et sécuritaire :
  - La protection des individus fait l'objet de nombreux textes légaux, leurs exécution et mises en conformité sont généralement assurées par le service maintenance.
  - Le service maintenance est responsable de l'entretien des équipements de sécurité.

## **2.6. Principaux concepts liés à la maintenance**

### **2.6.1. La sûreté de fonctionnement**

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'un système à remplir une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données, elle englobe principalement quatre composants : la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité.

On peut aussi, définir la sûreté de fonctionnement comme étant : est une forme d'esprit particulière dans la considération portée aux systèmes, méthodes, démarches, et outils propres à connaître, caractériser et maîtriser les effets des aléas, des pannes, des erreurs, ...

Elle peut appliquer sur les produits, les services, les installations, les informations, ... exprimant la conformité dans le temps (constance, fréquence de conformité de leurs composants et actions).

### **2.6.2. La fiabilité**

Selon l'Afnor (2001), la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou à satisfaire les besoins des utilisateurs, dans des conditions données, pendant une durée donnée (Ly et al. 2016).

C'est aussi, la probabilité qu'aucune défaillance ne se produise pendant cette durée (Le Digabel, 2016).

Dans la pratique, souvent, ce concept est traduit comme "l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance".

### **2.6.3. La maintenabilité**

Selon l'Afnor (2001), la maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits (Ly et al. 2016).

C'est aussi, la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées (Le Digabel, 2016).

### **2.6.4. La disponibilité**

Selon (Afnor, 2001), la disponibilité est "l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées".

La disponibilité est une grandeur qui intègre la fiabilité et la maintenabilité. Elle exprime la probabilité pour que le système accomplisse sa fonction, donc qu'il soit exempté de fautes, à l'instant t, sachant qu'il a pu en receler auparavant (Ly et al. 2016).

### 2.6.5. La sécurité

Une définition du dictionnaire, "la sécurité consiste à entreprendre des actions dans des situations jugées dangereuses ou catastrophiques, afin de réduire, voire d'éliminer, les risques encourus".

D'un point de vue dysfonctionnel, la sécurité concerne l'existence, le développement et l'extension du processus du danger.

La sécurité opérationnelle est un concept récent ayant pour objet l'assurance d'un fonctionnement sûr sous risques contrôlés (Tech-ing, 2016).

En effet, si la maintenabilité permet de réduire la durée des pannes et leur coût, la fiabilité permet de réduire la fréquence de ces pannes. Toutes deux, grâce au choix d'une politique de maintenance appropriée, ont pour but d'augmenter la disponibilité des systèmes ou des équipements et de diminuer les coûts d'entretien et les stocks de pièces de rechange (Tech-ing, 2016).

### 2.6.6. La défaillance

Bellaouar et Beleulmi (2014) et Ly et al. (2016), ont défini la défaillance comme étant un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal ou de panne.

### 2.6.7. La panne

La panne est l'inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise ou son incapacité à assurer le service approprié à la suite d'une défaillance. (Bellaouar et Beleulmi, 2014 ; et Ly et al. 2016)

Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance ; néanmoins, elle peut exister sans défaillance préalable. C'est l'ensemble des défaillances des composants. La cause supposée d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine (Ly et al. 2016).

### 2.6.8. Réparation :

Une réparation consiste en la remise en état de fonctionnement normal, de façon durable, dans le but de supprimer ou de réduire les conséquences de la vétusté, de la dégradation ou de désordre, d'un équipement n'assurant plus dans des conditions acceptables sa fonction.

### 2.6.9. Dépannage :

C'est une action sur un équipement en état de panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement "au moins provisoirement". Compte tenu de l'objectif, cette action peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions non conformes. D'où une réparation est nécessaire.

### 2.6.10. Diagnostic :

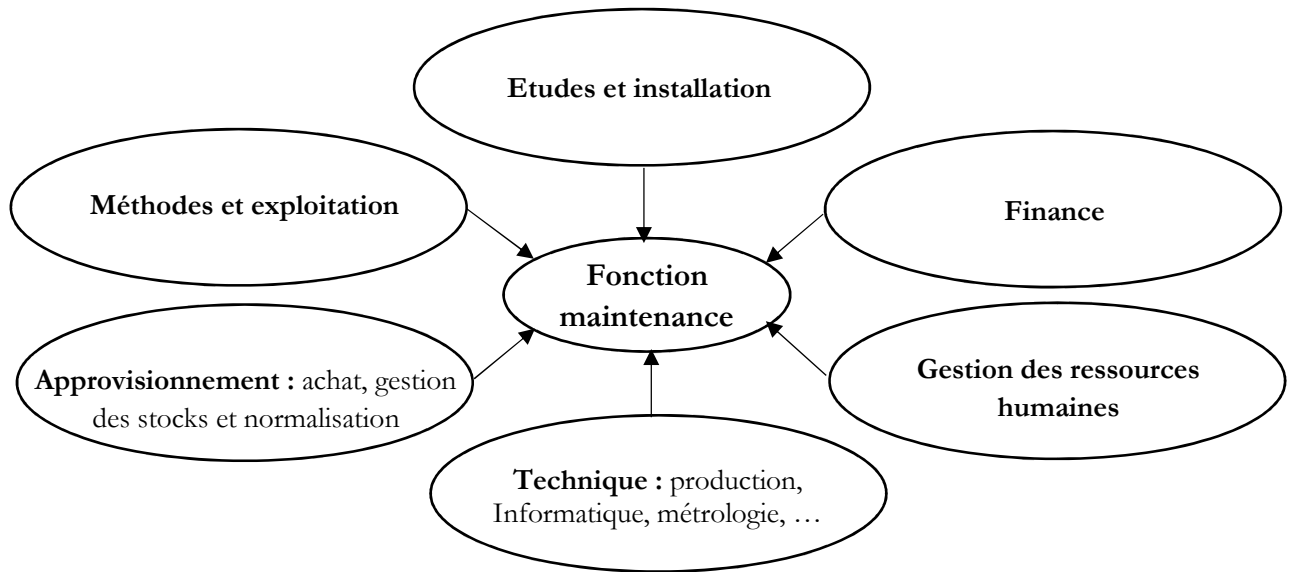
C'est une analyse des facteurs et symptômes, dont l'objectif d'établir l'état d'un bien ou les causes d'un éventuel désordre constaté, afin de choisir les mesures à prendre pour y remédier.

Examen permettant d'apprécier l'état de dégradation d'un bien, afin de déterminer la durée de vie restante et/ou les opérations de maintenance à exécuter.

## 2.7. Relations entre la fonction maintenance et autres fonctions de l'entreprise

La fonction maintenance est responsable du maintien du bon fonctionnement technique de tous les moyens de l'entreprise (machines, outils, moyens de contrôle, commandes, engins de transport, ...). Pour

mener à bien ces tâches la fonction maintenance doit être en concertation avec toutes les fonctions de l'entreprise.



Ces relations existent à cause d'un échange de flux informationnel, physique, de service et financier :

#### **Fonction études et installation :**

- Informations sur les programmes d'investissements.
- Etude de la sûreté de fonctionnement et d'installation.
- Standardisation du matériel
- Réception technique du matériel.
- Documentations techniques des constructeurs.
- Choix des fournisseurs et sous-traitants (pièces de rechange, outillage et équipements, ...).

#### **Fonction méthodes et exploitation**

- Les consignes d'exploitation, de conduite et de surveillance du matériel.
- Le taux d'exploitation du matériel.
- Le niveau de sécurité des moyens.

#### **La fonction approvisionnement : achat, gestion des stocks et normalisation**

- Emettre et faire respecter le cahier des charges.
- La gestion des garanties.
- Obtenir le dossier technique adapté aux besoins de la maintenance.
- Obtenir le catalogue magasin.
- Implantation et classement du magasin.
- Choix de la méthode de gestion.
- Réduction du coût de possession des stocks.
- La nomenclature des équipements.

#### **La fonction technique : production, informatique, métrologie, ...**

- Taux de production, qualité du produit, ...
- Le système et les moyens d'information.
- La gestion des moyens de mesure.

### La fonction gestion des ressources humaines

- Niveau de qualification.
- Evolution des carrières.
- Permutations, promotions, départs, embauches et formation, ...

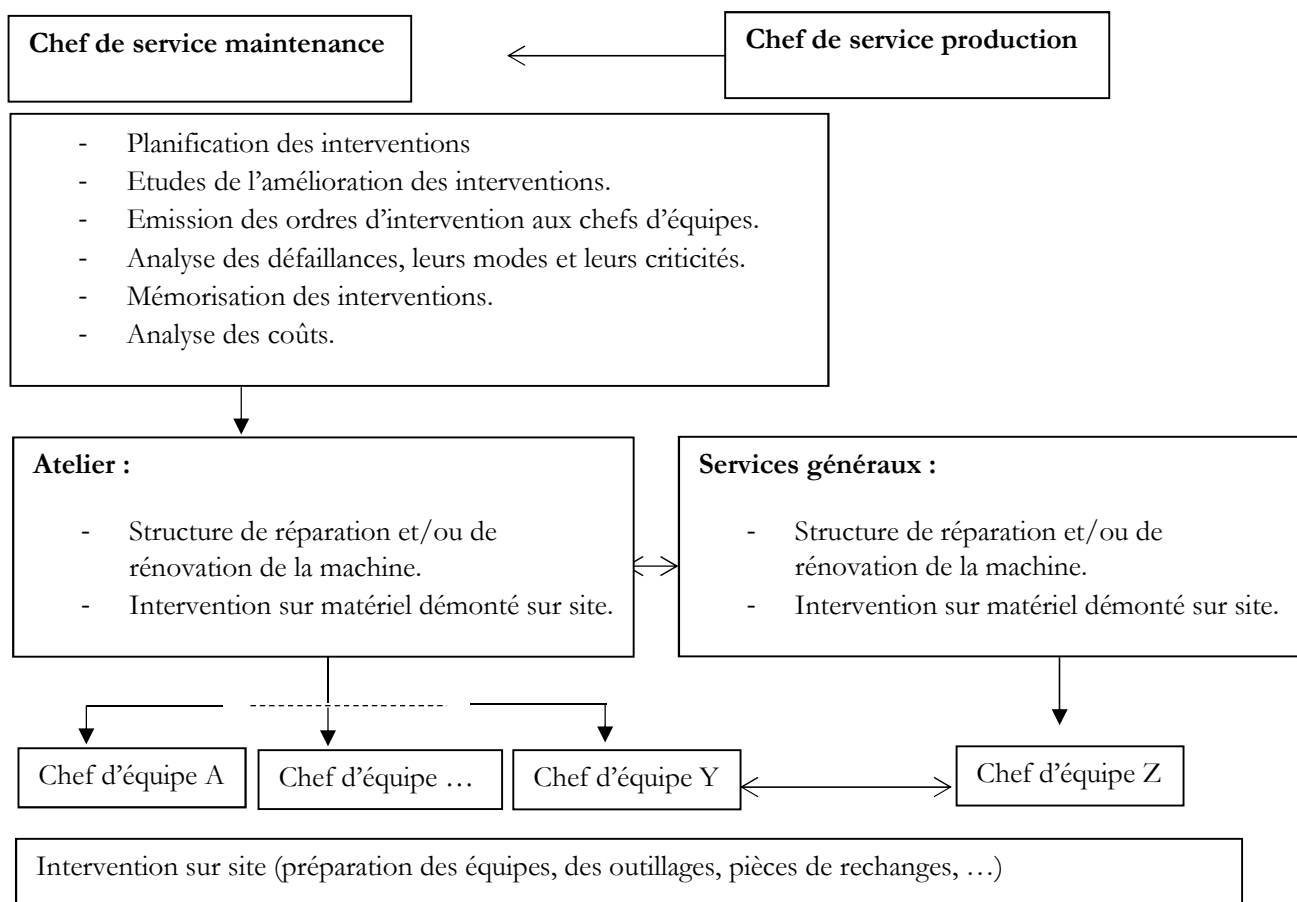
### La fonction sécurité et environnement

- La sécurité des biens et personnel.
- Respect de l'environnement et l'application des règlements.

### La fonction finance

- Relations économiques entre amortissement et maintenance.
- Les cycles de révision économiques du matériel.
- La décision de remplacement.

## 2.8. Organisation de la fonction maintenance





## Niveaux d'intégration de la maintenance

La fonction maintenance est intégrée dans l'organisation de l'entreprise selon plusieurs niveaux :

### Activités intégrées sous la responsabilité de la fonction maintenance :

- Souvent les PMI adoptent ce type d'organisation.
- Le manager doit avoir une vue globale de ses activités (production et maintenance).
- Il analyse les problèmes sous les deux aspects avant de décider.
- Le manager devra être attentif dans ses choix et dans son raisonnement.

### Activité maintenance distincte, ayant un responsable d'activités complémentaires

- Une petite équipe est responsable de l'ensemble des activités de maintenance.
- Adopté par les PMI assez importantes, ou petites unités décentralisées de groupes importants.
- Ce type d'organisation est fortement répandu en maintenance hospitalière et de grands ensembles (hôtels, bâtiments publics ...)

### Activité maintenance distincte et structurée

- Dans les unités importantes de production de masse ou de process.
- Maintenance centralisée et/ou décentralisée.

### Avantages de centralisation/décentralisation de la maintenance :

#### Centralisation

- Standardisation des matériels et des méthodes
- Facilité.
- Uniformisation des procédures, des codifications des systèmes de l'information.
- Utilisation des investissements d'outillage lourds
- Facilité
- Optimisation de l'exploitation des ressources.
- Suivi budgétaire global rapide.

#### Décentralisation

- Facilité de constitution d'équipes polyvalentes.
- Facilité des contrats maintenance-production.
- Amélioration de la motivation et de la responsabilité du personnel de maintenance.
- Incitation à la fixation de la compétence.
- Meilleure mise en œuvre de la TPM.

## 2.9. Les types de maintenance

On distingue deux catégories principales de maintenances :

### 2.9.1. La maintenance corrective (MC)

Selon Doyen et Gaudoin, (2004) et Le Digabel (2016), la maintenance corrective est "un ensemble d'activités effectuées suite à la détection d'une défaillance. L'objectif, est de remettre une entité dans un état de fonctionnement normal, pour accomplir une fonction requise." Elle est réalisée par une série d'opérations dont :

- *test* : comparaison des mesures avec une référence ;
- *détection* : déceler l'apparition d'une défaillance ;
- *localisation* : identification des éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
- *diagnostic* : analyse des causes de la défaillance ;
- *dépannage, réparation* : remise en état de fonctionnement normal avec ou sans modification ;
- *contrôle* : contrôle du bon fonctionnement.

La maintenance corrective se subdivise en deux types :

- **Maintenance palliative** : dépannage de l'équipement (provisoire), permettant à celui-ci d'assurer tout ou partie de sa fonction requise ; elle doit toutefois être suivie d'une action curative.
- **Maintenance curative** : réparation (durable) consistant en une remise en l'état initial.

### 2.9.2. La maintenance préventive (MP)

Selon Doyen et Gaudoin (2004) et Ly et al. (2016), la maintenance préventive est "un ensemble d'activités effectuées quand le système est en état de fonctionnement, a pour but de ralentir le vieillissement et réduire la fréquence d'apparition des défaillances".

Différentes activités telles que l'inspection, le contrôle, la visite et le test peuvent être accomplies pour maîtriser l'évolution de l'état d'un bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles réguliers calculés en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage. La maintenance préventive se subdivise en :

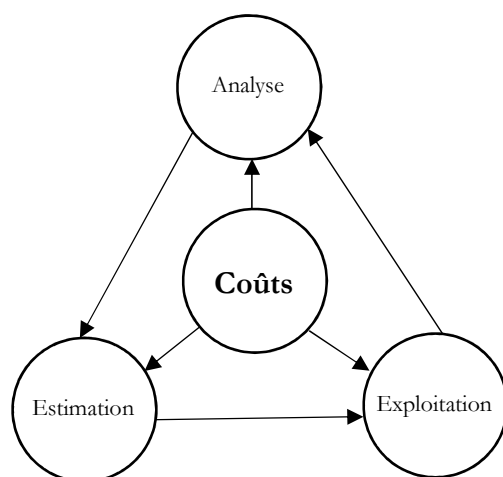
- **Maintenance systématique** : ensemble d'opérations effectuées systématiquement, soit selon un échéancier (à périodicité temporelle fixe), soit selon une périodicité d'usage (heures de fonctionnement, nombre d'unités produites, nombre de mouvements effectués, etc).
- **Maintenance conditionnelle** : opérations réalisées à la suite de relevés, de mesures, de contrôles révélateurs de l'état de dégradation de l'équipement.
- **Maintenance prévisionnelle** : opérations réalisées à la suite d'une analyse de l'évolution de l'état de dégradation de l'équipement.

## 2.10. Les coûts de Maintenance

### 2.10.1. Importance de l'analyse des coûts

L'analyse des coûts de maintenance est un outil de gestion essentiel est important. Elle permet au manager de la maintenance de prendre les décisions pertinentes et efficaces. Nous citons à titre d'exemples :

- Elaboration d'un budget prévisionnel de la maintenance.
- Suivi des dépenses et respect du budget.
- Choix du niveau de maintenance.
- Evaluation de performances des actions de maintenance (calcul des ratios, efficacité, efficience, pertinence ...).
- Décider de l'appel ou non à la sous-traitance et à la main d'œuvre externe.
- Décider le renouvellement d'un élément, partiel ou intégral.
  - Achat à l'identique ou non (remplacement)
  - Remise à niveau (réfection mineure)
  - Reconstruction (réfection majeure).

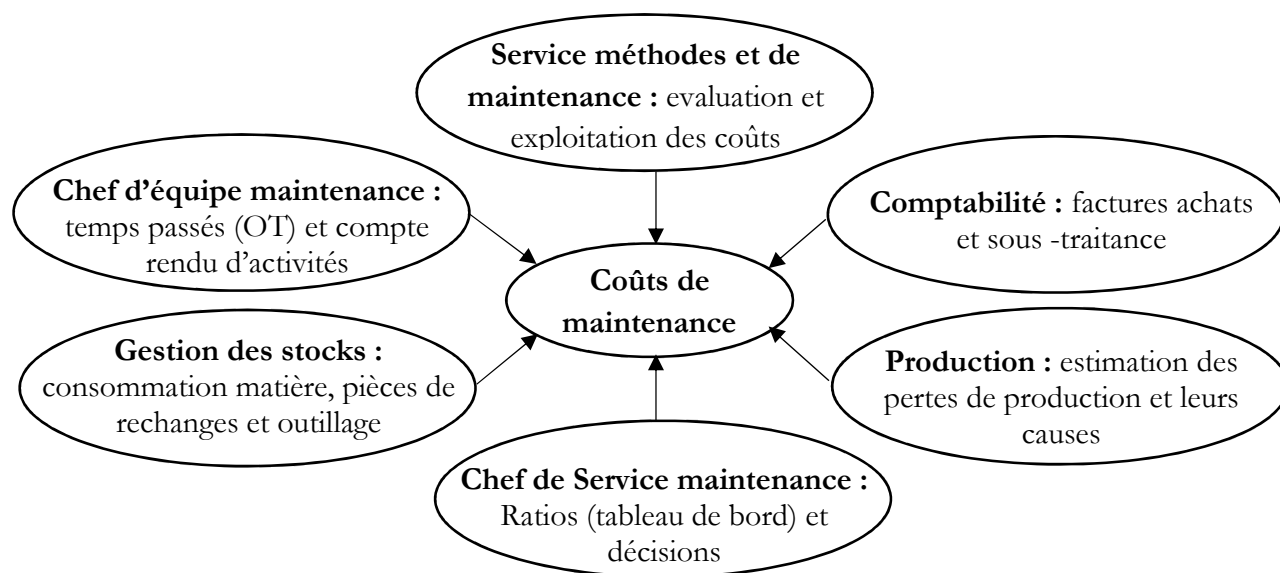


L'exploitation de ces coûts sous forme de ratios permettra la tenue d'un tableau de bord de gestion.

Les coûts de maintenance aident à la gestion. Ils n'ont pas une précision comptable, ils sont estimés par les agents de maîtrise au bureau de méthodes à partir de données collectées quotidiennement sur des documents internes du service (ordres de travaux, bons de sortie magasin...)

La ventilation (l'exploitation) peut se faire suivant plusieurs critères :

- Les corps de métiers (production, maintenance, approvisionnement ...).
- Les secteurs ou chaîne de production (ligne de production, atelier, magasin, administration ...)
- Les types de matériel (important, moins important ...).
- La nature des coûts (dépannage, réparation, préventif, opportuniste, amélioration, révision...)



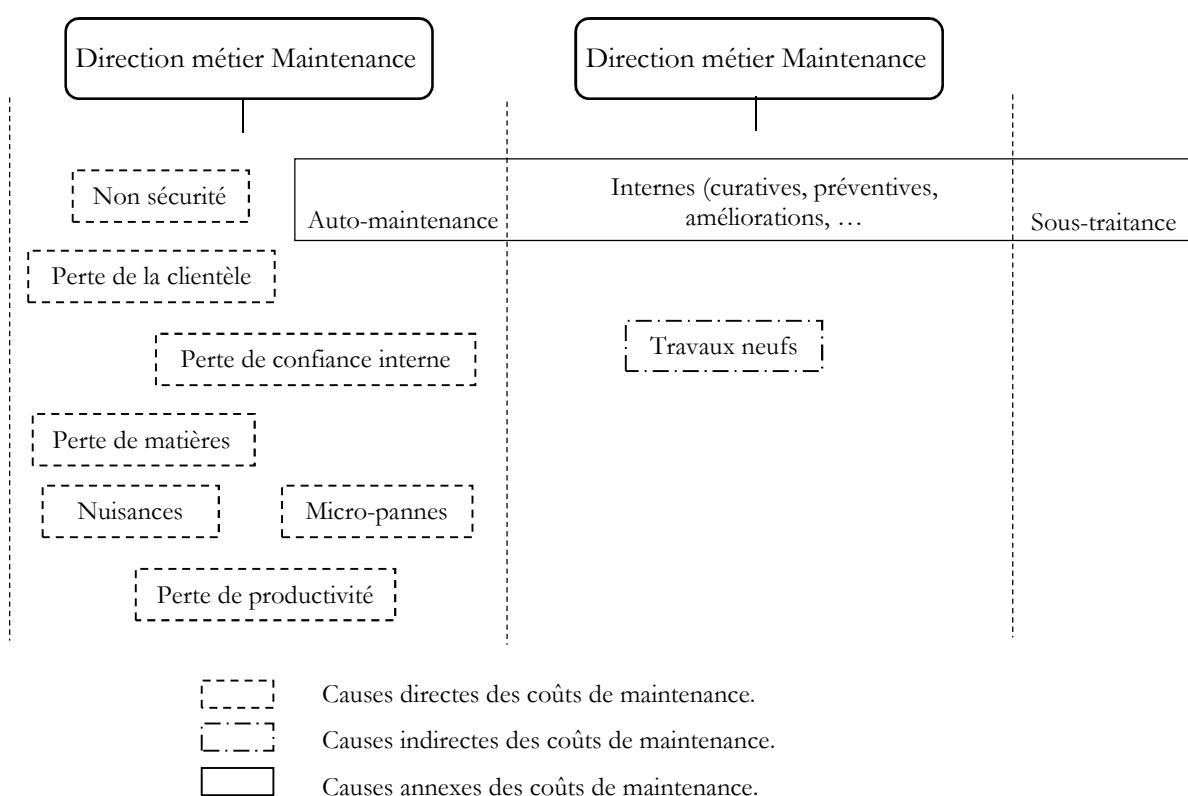
### 2.10.2. Catégories des coûts de maintenance

Deux classes de causes peuvent être associées aux dépenses relatives à la maintenance. En comptabilité analytique, les coûts se classent en coûts directs et indirects.

- Les causes directes
  - Interventions correctives donnant suite à des désordres ou pannes.

- Activités préventives destinées à réduire les effets des dégradations.
- Activités d'améliorations destinées à préserver les équipements et améliorer les conditions de sûreté de fonctionnement.
- Les causes indirectes
  - Production supplémentaires (surconsommations de consommables) et non qualité due aux fonctionnements défectueux (en mode dégradé) ou aux mauvais réglages.
  - Pertes de production : commandes non satisfaites à cause d'indisponibilité des équipements, mécontentement de la clientèle ...

Le suivi des coûts nécessite la mise en place d'une comptabilité générale et analytique adéquate, et la maîtrise de certains éléments, particulièrement :



Quelques éléments pour le calcul des coûts directs :

- Les temps passés et les taux horaires d'interventions.
- Les pièces et les équipements de rechange, leurs prix d'achats (PMP), leurs politiques de gestion des stocks ....

Quelques éléments pour le calcul des coûts indirects :

- Les temps d'indisponibilité et leurs causes.
- Les pertes de production dues à ces indisponibilités (déclassement des produits, non satisfaction des clients ...).
- Les coûts d'amortissement des équipements.

A partir de toutes ces données, le manager ou le responsable de la maintenance calcul le coût de maintenance, de défaillance et global de possession (moyen de fonctionnement).

### 2.10.2.1. Les coûts directs de maintenance

On note  $D_d$  le cumul des dépenses directes relatives à un état périodique (mensuel, trimestriel, annuel ...) et  $C_d$  les coûts directs relatifs à une intervention.

#### a. Coûts de main d'œuvre interne

C'est le produit : *temps passés*  $\times$  *taux horaire de la main d'œuvre*

Tels que :

Temps passés : ils sont saisis sur les **BT** honnêtement complétés, ou fournis par le chef d'équipe de maintenance.

Taux horaires de la main d'œuvre : ils sont fournis par le service comptabilité. Relatifs à une qualification professionnelle, ils prennent en compte le salaire horaire, les charges sociales afférentes au niveau de qualification, l'amortissement du matériel utilisé et un pourcentage des frais généraux.

#### b. Frais généraux du service maintenance

Ce sont les frais fixes du service, calculés par mois et ramenés à l'heure d'activité (parfois estimé en % de  $D_d$ ). Ils comprennent :

- Les salaires et charges du personnel ne travaillant pas directement sur les interventions de maintenance (cadres, préparateurs, magasiniers, comptable, gestionnaires ...).
- Tous les frais matériels indirects (locaux, énergie, fluides, imprimés, téléphone, véhicules de service, matériel administratif ...).
- Les loyers, assurance, impôts directs...

#### c. Les coûts de possession de stocks, des outillages, des machines

- Ils sont caractérisés par un taux d'amortissement.
- Evaluation des pertes et dépréciations dues au stockage.
- Frais de stockage.

#### d. Consommation de matières, de fournitures, de produits

C'est la somme des frais d'achats, frais de transport et coût de passation de la commande

#### e. Consommation des pièces de rechanges

Il est calculé comme le précédent. Cependant, il faut faire attention à l'actualisation des prix de certaines pièces, stockées depuis plusieurs années.

#### f. Coûts de main d'œuvre externe

Englobe toute la main d'œuvre n'appartenant pas au personnel de l'entreprise. On distingue deux classes de coûts :

- **Coûts des contrats de maintenance**

- Les clauses contractuelles (coût moyen forfaitaire) permettent l'estimation prévisionnelle des coûts directs.
- Les factures du prestataire permettent la saisie.

- **Coûts des travaux sous-traités**

- Les factures des sous-traitants comprennent la valeur comptable.
- Parfois, ces frais sont majorés par un coefficient de participation de service : informations, location d'équipements, interventions, contrôles...

Les dépenses directes de maintenance peuvent être exprimées par l'expression suivante :

$$D_d = D_{moi} + D_f + D_c + D_{st}$$

Avec :

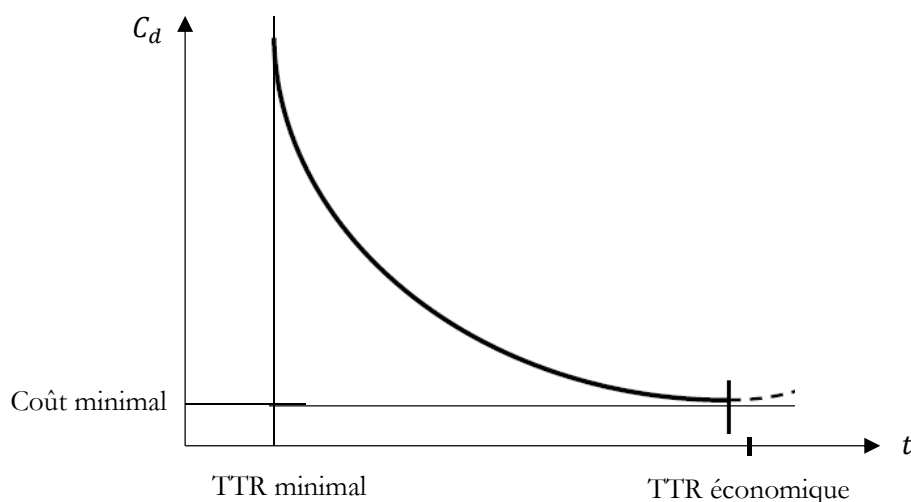
$D_{moi}$  : Les dépenses de main d'œuvre interne.

$D_f$  : Les dépenses fixes du service maintenance.

$D_c$  : Les dépenses en consommables de matières, de fourniture, de produits et pièces de rechanges.

$D_{st}$  : Les dépenses de la sous-traitance.

L'allure de la courbe  $C_d = f(TTR)$  du coût direct d'une intervention en fonction du temps (TTR).



Le coût des moyens (matériels, immatériels, humains et financiers) mis en œuvre conditionne évidemment la durée d'intervention. On peut citer à titre d'exemples :

- Le niveau de maintenance.
- Le nombre et la qualification du personnel.
- La logistique ...

En fait, c'est l'analyse des contraintes (délai, coût et qualité) qui permet le choix des moyens à mettre en œuvre. L'objectif possible du moindre coût entraîne l'utilisation des moyens banalisés disponibles, donc une durée d'intervention importante.

### 2.10.2.2. Les coûts indirects de maintenance

La connaissance des coûts directs des interventions ne suffit pas pour évaluer leurs performances. Les coûts les plus utiles à connaître sont celles relatifs aux pertes et manques à gagner induits par les arrêts de production (coût de défaillance). De plus, même en cas de défaillance qui n'entraîne pas un arrêt de l'élément de production, ce dernier entraîne une réduction en quantité ou en qualité du service.

Les coûts indirects de maintenance ou d'arrêt de production ou encore d'indisponibilité notée  $C_{id}$  comprennent :

### a. Coûts de pertes de production

Plusieurs cas peuvent être distingués :

- Le produit ou le service ne subissent pas de conséquences de la défaillance et aucune perte n'est à comptabiliser.
- Impossibilité de reprise du travail, d'où deux cas sont possibles :
  - Perte totale : lorsqu'il s'agit de la servuction.
  - Perte partielle : lorsqu'il s'agit de la production (le produit semi fini pouvant alors éventuellement réutiliser comme matière première et il y a une perte seulement sur la valeur ajoutée).
  - Le produit est non conforme (défectueux) et peut ne pas être réutilisable. La perte est totale dans ce cas (coût matière et valeur ajoutée).

### b. Frais induits par les pertes de production qui peuvent aussi être dues :

- A la baisse de qualité.
- Aux retards de livraison qui nécessitent des rabais.
- Image de marque tenue.
- Perte de la clientèle.

### c. Salaires et charges sociales de la main d'œuvre non exploitée (non utilisée)

La perte peut être :

- Perte entière : lorsque le personnel est totalement inactif.
- La perte est partielle lorsque :
  - Le personnel est employé à un autre travail secondaire.
  - Son coût fait partie des coûts de maintenance, s'il exécute tout ou une partie des interventions de maintenance.

### d. Coûts d'amortissement du matériel défaillant ou arrêté

En cas de défaillance ou d'un arrêt, la production ou la servuction sont interrompus. D'où le coût d'amortissement horaire sera perdu puisqu'il ne pourra être intégré dans aucune rémunération de la part des clients.

### e. Frais de remise en route du processus de production

### f. Charges fixes et frais généraux

Tout ralentissement de production entraîne une augmentation du coût unitaire produit ou service fournit car les charges fixes et frais généraux existent quel que soit le niveau de production ou de servuction.

L'estimation des coûts indirects est plus délicate que l'estimation des coûts directs. A titre d'exemple, il est difficile d'évaluer objectivement l'impact d'un arrêt fortuit de la production sur l'image de marque auprès des clients. L'expression des coûts indirects peuvent être donnée par :

$$C_{id} = \text{Heures d'arrêt} \times \text{taux horaire d'arrêt}$$

Tels que :

Les heures d'arrêt noté par  $TA$  ou  $TA_m$  suivant la nature de l'analyse faite.

Le taux horaire d'arrêt noté  $\tau$  doit comprendre tous les coûts cités précédemment. Il est calculé comme suite :

$$\tau = \frac{\text{Perte de production annuelle [u/an]}}{\text{Heures de production annuelle[h/an]}}$$

Un manager de la maintenance peut distinguer des pertes non imputables à la maintenance d'un process de production. De plus, il distingue entre les coûts indirects imputable à la maintenance et imputable à la production et à la maintenance. Ils sont exprimés respectivement par l'expression () et ().

$$C_{id} = \tau \times TA_m$$
$$C_{id} = \tau \times TA$$



## **Chapitre 3 :**

# **Introduction à la modélisation de la maintenance**

Le but de ce chapitre est de présenter le concept de modélisation et les différents types de modèles. Puis, nous donnons des notions sur le vieillissement, leur principe, leurs modèles et ses applications. Ensuite nous aborderons les différents modèles de la maintenance ainsi que les différentes politiques de maintenance.

### 3.1. Modélisation

L'objectif de la modélisation est de représenter une partie ou l'intégralité d'une entreprise, d'un système de production, d'une politique ou d'un plan pour :

- en comprendre son fonctionnement ;
- en analyser son comportement et ses performances ;
- détecter des dysfonctionnements ;

En vue naturellement d'en améliorer les performances, ou de valider une organisation nouvelle.

#### 3.1.1. Les modèles analytiques

Un modèle analytique représente les caractéristiques d'un problème par des équations mathématiques. L'approche retenue pour notre cours, est le développement des modèles mathématiques pour le management de la production et de la maintenance, afin d'offrir un outil d'aide à la décision.

#### 3.1.2. Les modèles de simulation

Dans certains problèmes, il est difficile de trouver une relation entre les variables et paramètres du système, c'est-à-dire nous ne pouvant pas le mettre sous la forme d'un modèle mathématique analytique. Dans ce cas, le recours à la simulation est très recommandé pour palier à cette limitation. Les modèles de simulation sont des modèles à la fois stochastiques et dynamiques.

Généralement, les modèles de simulation sont classifiés en deux groupes : les modèles statiques dans lesquels le temps n'est pas pris en compte, et les modèles dynamiques.

#### 3.1.3. L'offre logicielle

Des progiciels de gestion intégrée ont été développés pour pallier aux problèmes de communication dans les entreprises industrielles.

En effet, le progiciel de planification des ressources de l'entreprise (*Enterprise Resource Planning* – ERP), extension du terme *Manufacturing Resource Planning* – MRP, fournit à l'ensemble des métiers de l'entreprise des images unifiées, cohérentes et homogènes de l'ensemble des informations dont ils ont besoin. Afin de réduire l'incertitude de ces informations, les ERP reposent sur quatre concepts : la disponibilité, la précision, le délai de réponse, la périodicité d'actualisation. Les progiciels de planification avancée des systèmes (*Advanced Planning Systems* – APS) peuvent simuler plusieurs scénarios de planification et gérer des entreprises multi-sites ou des réseaux d'entreprises.

### 3.2. Le vieillissement

#### 3.2.1. Principes

Le modèle couramment adopté pour l'évolution des composants au cours de leur cycle de vie suit trois phases :

- Une période de *jeunesse* ou encore de *mortalité infantile* (des composants ou de machines), qui se caractérise par un taux de panne relativement important, mais en décroissance, correspondant à l'élimination des défauts de jeunesse et au rodage. (zone 1)
- Une période de *vie utile* qui se caractérise par un taux de panne faible et constant. Les différents composants ont prouvés leur robustesse aux défauts de jeunesse, l'équipement est dans sa phase de maturité. (zone 2)
- Une période de *vieillesse* et/ou *d'usure* dans laquelle le taux de panne augmente rapidement en fonction du temps. (zone 3)

Soit la courbe en baignoire bien connue des fiabilistes :

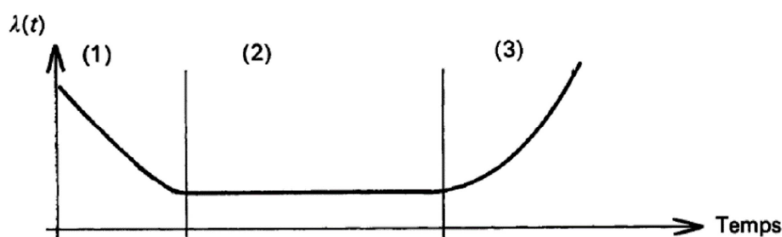


Figure 1. Evolution du taux de défaillance d'un équipement.

La plupart des techniques utilisées en sûreté de fonctionnement sont valables pour la zone de vie utile. La loi la plus couramment utilisée (qui donne surtout des résultats analytiques simples et facilement interprétables) est la loi exponentielle (Processus de Poisson, Chaînes de Markov ...), qui est sans mémoire, et donc se prête bien à l'évaluation des performances lorsque le taux de défaillance est constant.

### 3.2.2. Loi de Weibull

C'est la loi typiquement utilisée pour modéliser le taux de défaillance variant beaucoup. Elle est à trois paramètres :

$\gamma$  : Décalage à l'origine,  $\gamma \geq 0$  (homogène au temps) ;

$\alpha$  : Paramètre de forme,  $\alpha > 0$  (sans dimension) ;

$\beta$  : Paramètre d'échelle (ou de durée de vie), (homogène au temps) ;  $\frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha}$  pour  $t \geq \gamma$

Densité de probabilité :

$$f(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} & \text{pour } t \geq \gamma \\ 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases}$$

Fonction de répartition :

$$F(t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} & \text{pour } t \geq \gamma \\ 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases}$$

Fiabilité :

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^\alpha} & \text{pour } t \geq \gamma \\ 1 & \text{pour } t < \gamma \end{cases}$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} & \text{pour } t \geq \gamma \\ 0 & \text{pour } t < \gamma \end{cases}$$

### 3.2.3. Application en fiabilité

Suivant les valeurs de  $\alpha$  le taux de défaillance est soit :

- $\alpha < 1$  : le taux de défaillance est décroissant avec le temps. C'est la période de jeunesse (rodage, déverminage).

- $\alpha = 1$  : le taux de défaillance est constant (Independence du process et du temps).
- $\alpha > 1$  : le taux de défaillance est croissant (vieillessement), cette phase est la phase d'obsolescence que l'on peut analyser plus finement pour orienter un diagnostic.
  - $1.5 < \alpha < 2.5$  : phénomène de fatigue.
  - $3 < \alpha < 4$  : phénomène d'usure, de corrosion (début au temps  $t = \gamma$ ), de dépassement d'un seuil (domaine de déformation plastique).
  - $\alpha \approx 3.5$  :  $f(t)$  est symétrique, la distribution est normale.

### 3.3. Les modèles de maintenance

Afin d'évaluer les coûts de maintenance et prévoir les interventions, on a recours à l'élaboration d'un modèle du système qui permettra de connaître la probabilité de panne à chaque instant. Ces modèles sont définies pour trois types de maintenance : les maintenances minimales, parfaites et imparfaites.

#### 3.3.1. Le modèle de maintenance parfaite

Dans ce modèle, les actions de maintenance peuvent être considérées comme des remplacements. Chaque action remet le système à neuf *As Good As New* (AGAN), autrement dit *Aussi Bon Que Neuf*. Les durées inter-défaillances, et donc inter-maintenance, sont alors indépendantes et de même loi. Pour modéliser l'effet de la maintenance corrective et/ou préventive, nous utiliserons l'expression du taux de défaillance en fonction du temps donnée par :

$$\lambda_t^N = \lambda n(t - T_{N_t}) \quad (3.1)$$

Le processus aléatoire correspondant est appelé Processus de Renouvellement (PR).

$\lambda_t^N$  : Fonction du taux de défaillance.

$\lambda n(t)$  : Fonction nominale du taux de défaillance.

$T_{N_t}$  : Date de la dernière défaillance.

#### 3.3.2. Le modèle de maintenance minimale

Ce modèle suppose que l'effet d'une action de maintenance est de restituer le système dans un état opérationnel (où il était juste avant la défaillance), c'est-à-dire *As Bad As Old* (ABAO), qui signifie *Aussi Mauvais Que Vieux*.

L'intensité de défaillance est alors une fonction uniquement du temps et ne dépend que du passé du processus, donc :

$$\lambda_t^N = \lambda(t) \quad (3.2)$$

En effet, ces actions de maintenance n'améliorent pas l'état du système. L'expression du taux de défaillance est donnée par un Processus de Poisson Non Homogène (PPNH) dont l'intensité de défaillance est constante :

$$\lambda(t) = \lambda n(t) \quad (3.3)$$

#### 3.3.3. Le modèle de maintenance imparfaite

Une maintenance imparfaite est considérée comme un état intermédiaire entre une maintenance parfaite et une maintenance minimale. On distingue quatre approches de modélisation de la maintenance imparfaite : La première approche repose sur l'idée que les effets de maintenance ne dépendent ni des dates, ni des actions réalisées précédemment. Pour Brown et Proschan (1983), la maintenance peut être considérée comme parfaite avec une probabilité  $r$  et minimale avec la probabilité complémentaire  $(1 - r)$ .

$r$  : Facteur de réduction, appelé aussi, facteur d'amélioration.

Ainsi, l'efficacité de l' $i^{\text{ème}}$  action de maintenance est une variable aléatoire  $Y_i$  telle que :

$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{si la maintenance est AGAN} \\ 0 & \text{si la maintenance est ABAO} \end{cases} \quad (3.4)$$

Les  $Y_i$  sont des variables aléatoires indépendantes et de même loi de Bernoulli de paramètre  $r$ . L'intensité de défaillance du modèle de Brown et Proschan s'écrit comme suite :

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left( t - T_{N_t} + \sum_{i=1}^{N_t} \left[ \prod_{k=i}^{N_t} (1 - Y_k) \right] X_i \right) \quad (3.5)$$

Avec :

$X_i$  : Durée entre la  $(i - 1)$  ème maintenance et la  $i^{\text{ème}}$  maintenance.

La deuxième approche, s'articule sur la réduction d'âge. Kijima et al. (1988) ont proposé un modèle suivant lequel l'efficacité de la maintenance est caractérisée par une réduction de l'âge virtuel (quantité proportionnelle à la durée écoulée depuis la dernière maintenance). L'expression de l'âge du système est donnée par :

$$A_i = A_{i-1} + (1 - Z_i). X_i \quad \forall i \geq 1 \quad (3.6)$$

$Z_i$  : Facteur de réduction de la durée  $X_i$ .

Dans un autre modèle, Kijima (1989) a supposé que la réduction d'âge est proportionnelle à l'âge virtuel lui-même qui peut s'écrit comme suit :

$$A_i = (1 - Z_i)(A_{i-1} + X_i) \quad \forall i \geq 1 \quad (3.7)$$

On peut alors écrire les intensités de défaillances de ces modèles respectivement comme :

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left( t - T_{N_t} + \sum_{i=1}^{N_t} (1 - Y_i) X_i \right) \quad (3.8)$$

$$\lambda_t^N(N, Y) = \lambda n \left( t - T_{N_t} + \sum_{i=1}^{N_t} \left[ \prod_{k=i}^{N_t} (1 - Y_k) \right] X_i \right) \quad (3.9)$$

Suivant la même logique de raisonnement, Doyen et Gaudoin (2004) ont proposé des modèles à réduction arithmétique de l'âge. Les auteurs ont pris en considération les instants de défaillances précédents, qui peuvent influencer l'intensité de défaillance du système. Le taux de défaillance est donné par la formule suivante :

$$\lambda(t) = \lambda n \left( t - r \sum_{i=0}^{\min(m-1, N_t-1)} (1 - r)^i T_{N_t-i} \right) \quad (3.10)$$

$m$  : Nombres de derniers instants de défaillances mémorisés ;

La troisième approche se base sur la modification du taux de défaillance. Nakagawa, (1988) a supposé qu'après chaque maintenance préventive, l'intensité de la fonction de taux de défaillance augmente. Par contre, après chaque action imparfaite, le taux de défaillance est ramené à zéro, comme si, à cet instant, le système était considéré comme neuf.

La dernière approche repose sur la réduction du taux de défaillance. Chan et Shaw (1993) ont proposé qu'après une maintenance, l'intensité de défaillance se réduit d'une quantité proportionnelle à sa valeur juste avant la défaillance. Après la  $i^{\text{ème}}$  maintenance dont la durée est supposée négligeable, l'expression du taux de défaillance est donnée par :

$$\lambda_{T_i^+} = \lambda_{T_i^-} - r \cdot \lambda_{T_i^-} \quad (3.11)$$

Où  $\lambda_{T_i^+}$  respectivement  $\lambda_{T_i^-}$  est la limite à droite respectivement à gauche de  $\lambda_t$  quand  $t$  tend vers  $T$ . Entre deux défaillances, l'intensité est supposée évoluer comme celle d'un système neuf. L'intensité de défaillance de ce modèle est de la forme :

$$\lambda_t = \lambda(t) - r \sum_{i=0}^{N_t} (1-r)^i \lambda(T_{N_t-i}) \quad (3.12)$$

Pour plus de détails sur les modèles de maintenance, le lecteur pourra consulter le rapport de Doyen et Gaudoin (2004).

### 3.4. Les politiques de maintenance

Les politiques de maintenances les plus utilisées dans la pratique sont basées sur la seule connaissance du temps de fonctionnement du système. Gertsbakh, (1977) identifie deux : une de type âge et l'autre de type bloc.

#### 3.4.1. Politique de maintenance de type âge

La politique de maintenance de type âge, consiste :

- à réaliser des actions de maintenance préventive à un intervalle d'âge fixe.
- Si une défaillance survient avant l'échéance de la maintenance préventive, une action de maintenance corrective est réalisée.
- Suite à cette maintenance corrective, l'échéance de maintenance préventive est décalé (mise à jour).

L'optimisation des politiques de type âge est basée sur la détermination du nombre optimal des maintenances préventives à réaliser, avant d'effectuer le remplacement de l'unité. Cependant, il est également nécessaire de déterminer la taille optimale de ces intervalles de temps (échéances).

Dans la littérature, plusieurs modèles de la stratégie de maintenance de type âge ont été développées pour répondre aux besoins de l'industrie comme la minimisation du coût de production et l'optimisation de la disponibilité des machines.

#### 3.4.2. Politique de maintenance de type bloc

La politique de maintenance de type bloc, consiste :

- à maintenir l'équipement au moment prévu pour faire la maintenance préventive,
- et à le réparer suite à une panne sans modifier l'échéance de la maintenance préventive.

L'optimisation de cette politique se traduit par la détermination du nombre optimal des périodes de maintenance préventives, ainsi que la durée optimale de ces périodes minimisant les coûts de maintenances (Nakagawa, 1986).

Cette politique est plus simple à gérer qu'une politique de remplacement basée sur l'âge, à cause du nombre important des variables de décisions et la corrélation de ces variables.

Cependant, elle présente le risque de remplacer des systèmes neufs (Barlow et Hunter 1960).

Les politiques de type bloc trouvent leur intérêt dans l'étude de la maintenance pour des systèmes formés de plusieurs composants.