

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université du 8 mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Polycopié de cours

Préparé par :

Dr. Djamel FRIHI

=====

Maintenance industrielle

=====

Juin 2015

Sommaire

	Page
Avant-propos	01
Chapitre I : Introduction à la maintenance	02
I-1 : Importance de la maintenance dans l'entreprise	02
I-2 : Objectif de la maintenance	02
I-3 : Définition de la maintenance:	03
I-4 : Différentes formes de maintenance	06
Chapitre II : Fonctions de maintenance	14
II-1 : Introduction	14
II-2 : Place de la maintenance dans la structure de l'entreprise	14
II-3 : Organisation interne du département	17
Chapitre III : Documentation en maintenance	21
III-1 : Dossiers machines	21
III-2 : Fichier historique d'une machine	23
Chapitre IV : Gestion des opérations de maintenance	27
IV-1 : Estimation du temps alloué à une intervention (Méthodes)	27
IV-2: Méthode PERT (Program Evaluation and Review Technique)	28
IV-3 : Méthode ABC de PARETO	34
Chapitre V : Maintenance conditionnelle : Une forme moderne de maintenance	37
V-1 : Introduction	37
V-2 : Techniques de maintenance conditionnelle	37
V-3 : Analyse vibratoire en maintenance prédictive	38
Chapitre VI : Concept FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité)	41
VI-1 : Généralités	41
VI-2 : Etude des modèles de fiabilité	47
VI-3 : Notion de maintenabilité :	60
VI-4 : Notion de disponibilité	62
VI-5 : Amélioration de la disponibilité	64
VI-6 : Etude de la fiabilité d'une turbine a vapeur	65
Références bibliographiques	67

Avant-propos

La préservation des outils de production est un enjeu clé aussi bien pour la productivité des usines que pour l'économie nationale toute entière. Ce cours a été conçu dans cet esprit. Visant en premier lieu d'entreprendre un premier contact des étudiants avec les notions de base et les concepts fondamentaux de la maintenance, il permet, à l'issue des différents chapitres traités, d'acquérir des connaissances sur les méthodes modernes de maintenance tant dans le domaine technique que dans celui de gestion.

Éviter les défaillances, maîtriser les coûts, garantir la sécurité. Longtemps confiné au simple entretien des machines, la fonction maintenance a évolué et remplit aujourd'hui un rôle majeur au sein de l'entreprise. Ce cours très opérationnel, s'adresse à tous les professionnels du secteur ainsi qu'aux donneurs d'ordres et prestataires évoluant dans le domaine. Documentation opérationnelle, descriptifs méthodologiques, mise en œuvre d'outils, choix de l'externalisation, optimisation des coûts et des délais...Il s'adresse à tous ceux qui se préoccupent de sûreté de fonctionnement et qui ont la charge de prévenir les risques industriels au stade de la conception d'ensembles complexes ou en phase d'exploitation d'un bien durable.

Le métier de responsable de maintenance n'est pas un long fleuve tranquille : chaque jour, chaque mois, chaque année, surgissent des événements imprévus, des difficultés, des crises majeures ! Chaque responsable maintenance est-il capable d'y faire face ? L'expérience montre que non, car le métier exige des connaissances, des compétences, des qualités humaines, ainsi qu'une expérience et une réelle volonté d'évolution personnelle.

Cet ensemble de chapitres, propose un processus de mise en œuvre des méthodes et technologies de maintenance qui doivent accompagner tout bien d'équipement, de sa conception à son démantèlement. Il constitue une aide à la démarche d'ingénierie de maintenance visant à l'optimisation du coût global du cycle de vie.

C'est également, dans cet esprit, que ce cours propose sous une forme concise et structurée l'ensemble des concepts nécessaires à la formation complète d'un cadre de maintenance industrielle. Il est destiné aux professionnels de la maintenance ainsi qu'aux professeurs et étudiants, mais aussi aux responsables qui côtoient la maintenance sans toujours bien connaître cette discipline.

Remerciement

Ce cours a pu voir la lumière grâce à l'aide précieuse du **Dr A. Djebala** (Maître de Conférences au Département de Génie Mécanique à l'Université de Guelma) auquel j'adresse mes vifs remerciements.

Dr D. FRIHI

CHAPITRE I

Introduction à la maintenance

I-1 : IMPORTANCE DE LA MAINTENANCE DANS L'ENTREPRISE

«*Ne pas prévoir c'est déjà gémir*», disait Léonard De Vinci il y a plusieurs siècles. Cette notion, bien qu'elle soit ancienne, est le concept fondamental de la maintenance moderne. Certains auteurs vont encore plus loin dans l'antiquité pour remonter les origines de la notion maintenance à l'époque où on fabriquait des objets. L'ouvrage de *Aquae Ductu Rubis Romae* écrit par Sextus Julius Frontinus en 99 après Jésus-Christ, est peut-être la plus vieille référence de la maintenance moderne décrivant l'exploitation et l'entretien du réseau des eaux de la ville de Rome. Bien que le terme maintenance ne soit apparu qu'aux années 50 aux USA remplaçant la notion d'entretien, ce métier est l'un des plus vieux au monde.

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale la machine industrielle tourne à une cadence infernale afin de rétablir ce que cette guerre a démoli. Les besoins de l'homme en produits de consommation divers ont augmenté et se sont amplifiés d'une année à l'autre. La complexité et le coût croissant des appareils de production ont entraîné une forte augmentation de leur intensité d'utilisation mettant en évidence le besoin d'une bonne maintenance afin d'assurer une meilleure performance des installations et machines.

I-2 : OBJECTIF DE LA MAINTENANCE

Le zéro panne c'est l'objectif principal de la maintenance.

L'objectif des équipes de maintenance est de maintenir les installations de production en parfait état et d'assurer le rendement global maximum tout en optimisant le coût. L'obtention du meilleur rendement passe par la prévention des pannes, le respect des cadences de production et l'amélioration continue de la qualité des produits. Maintenir, ce n'est plus subir les pannes mais maîtriser les défaillances par l'optimisation de la politique de maintenance, par une bonne prévention, par des réparations rapides et efficaces, enfin par l'amélioration du matériel.

Pour assurer correctement cette mission, il est nécessaire de se doter en plus de la compétence technique des hommes, d'une organisation efficace et d'outils adéquats. C'est la

nature de l'entreprise qui fixe les l'objectifs, des services de la maintenance. On peut classer les objectifs de la maintenance on deux catégories:

- 1- Les objectifs financiers,
- 2- Les objectifs opérationnels.

Le fait que ces deux objectifs sont différents expliquera pourquoi la production et la maintenance sont souvent à couteau tirés et pourquoi les deux attitudes sont apparemment opposées.

I-2-1. Objectifs financiers

- 1- Réduire au minimum les dépenses de la maintenance.
- 2- Augmenter au maximum les profits.
- 3- Avoir des dépenses de maintenance en fonction de l'age des installations et de son taux d'utilisation.

I-2-2. Objectifs opérationnels

- 1- Maintenir les équipements.
- 2- Assurer la disponibilité maximale des installations et des équipements.
- 3- Fournir un service qui élimine la panne a tous les moments à tout prix.
- 4- Pousser à la dernière limite la durée de vie de l'installation.
- 5- Assurer une performance (rendement) de haute qualité.

Les objectifs peuvent changer avec le temps, une révision des objectifs et de la politique de l'entreprise doit avoir lieu tous les deux ans.

I-3 : Définition de la maintenance:

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des entreprises aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels.

a) Examinons quelques définitions de la maintenance

-d'après Larousse:

« Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement ».

-d'après l'AFNOR (NF X 60-010):

« Ensemble des actions permettant de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé ».

-Commentaires: « **Maintenir** » contient la notion de « prévention » sur un système en fonctionnement;

« **Rétablir** » contient la notion de « correction » consécutive à une perte de fonction;

« Etat spécifié » ou « service déterminé » implique la prédétermination d'objectif à attendre, avec quantification des niveaux caractéristiques.

« Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimal ».

b) la maintenance est la « médecine des machines »

Afin de pénétrer plus avant dans le domaine de la maintenance, servons-nous d'une comparaison pratique entre la « la santé humaine » et la « la santé machine ».

Une analogie existe, mise en évidence ci-dessous:

Analogie			
Santé de l'homme		Santé machine	
	Naissance	Mise en service	
Connaissance de l'homme			Connaissance technologique
Connaissance des maladies			Connaissance des
Carnet de santé			modes de défaillances
Dossier médical	longévité	durabilité	Historique
Diagnostic, examen,			Dossier machine
Visite			Diagnostic, expertise,
Connaissance des			inspection
traitements	bonne santé	fiabilité	Connaissance des
Traitements curatifs			actions curatives
Opération			Dépannage, réparation
			rénovation, modernisation,
			échange- st.
		rebut	
	Mort		

I-3-1 : Les cinq niveaux de la maintenance

1^{er} niveau : Réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement, ou échanges d'éléments consommables accessibles en toute sécurité, tels que voyants ou certains fusibles, etc....Ce type d'intervention peut être effectué par l'exploitant du bien, sur place, sans outillage et à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock des pièces consommables nécessaires est très faible.

2^e niveau: Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet et opérations mineures de maintenance préventive, telles que graissage ou contrôle de bon fonctionnement. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien habilité de qualification moyenne, sur place, avec l'outillage portable défini par les instructions de maintenance, et à l'aide de ces mêmes instructions. On peut se procurer les pièces de rechange transportables nécessaires sans délai et à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

3^e niveau: Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures et toutes opérations courantes de maintenance préventive telles que réglage général ou réaligement des appareils de mesure. Ce type d'intervention peut être effectué par un technicien spécialisé, sur place ou dans le local de maintenance, à l'aide de l'outillage prévu dans les instructions de maintenance ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement des bancs d'essais et de contrôle des équipements et en utilisant l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien ainsi que les pièces approvisionnées par le magasin.

4^e niveau: Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction. Ce niveau comprend aussi le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, et éventuellement la vérification des étalons du travail par les organismes spécialisés. Ce type d'intervention peut être effectué par une équipe comprenant un encadrement technique très spécialisé, dans un atelier spécialisé.

5^e niveau: Rénovation, reconstruction ou exécution des réparations importantes confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Par définition, ce type de travaux est donc effectué par le constructeur, ou par le reconstruteur, avec des moyens définis par le constructeur et donc proches de la fabrication.

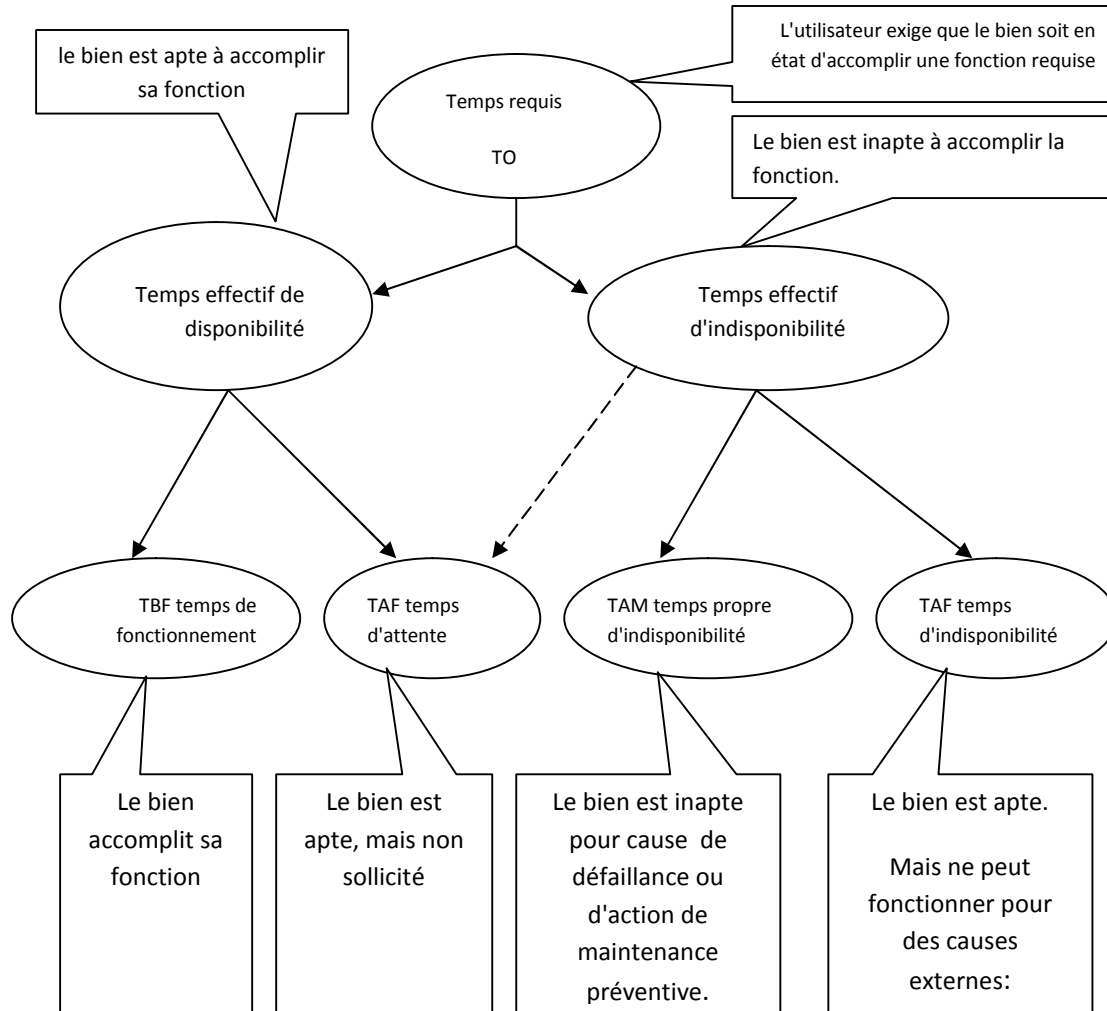
Commentaire

Niveau	Personnel d'Intervention	Moyens
1 ^{er}	Exploitant, sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation
2 ^{eme}	Technicien habilité, sur place	Idem, plus pièces de rechanges trouvées à proximité, sans délai.
3 ^{eme}	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essais, contrôle...
4 ^{eme}	Equipe encadrée par un Technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, matériel d'essais, contrôle...
5 ^{eme}	Equipe complète, polyvalente, en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur

I-3-2 : Les temps relatifs de la maintenance

(D'après la norme AFNOR X 60015)

1- quelques définitions de base



Dans le cadre de la gestion de la maintenance, nous distinguerons les temps d'arrêt TA imputables à la maintenance notés TAM et non imputables à la maintenance TAF (F comme « fabrication »).

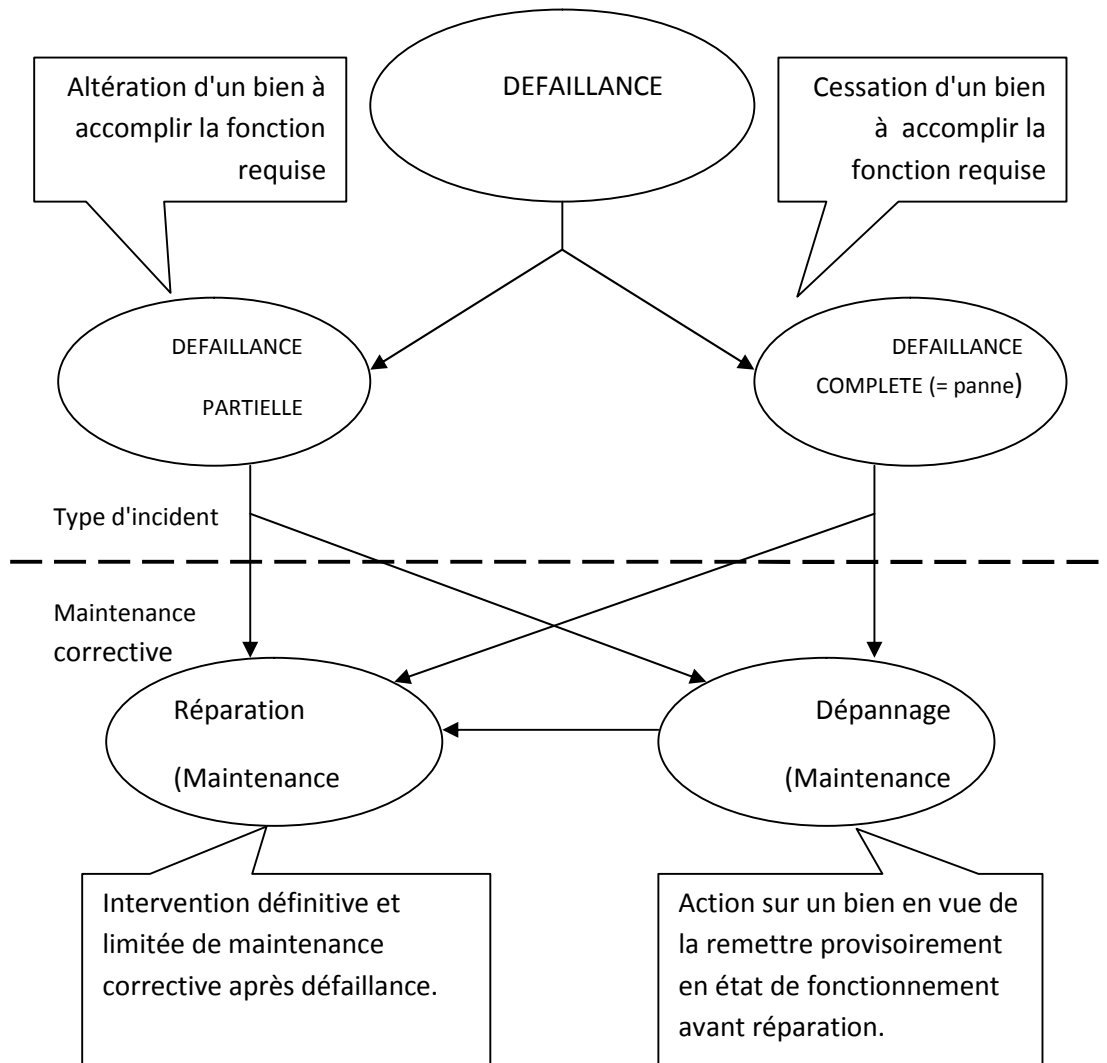
Pour une question de saisie des temps, les temps d'attente seront imputés à la fabrication (TAF). En effet, les compteurs horaires affectés à une machine totalisent les seuls TBF. Une codification peut alors distinguer, pour chaque arrêt, les temps d'attente des différents temps d'indisponibilité.

Nous noterons TO le « temps- requis » de la norme, par référence au « temps d'ouverture » terme couramment utilisé sur les chaînes de production.

$$\mathbf{TO = TBF + TAM + TAF.}$$

I-3-3: Définition de la défaillance

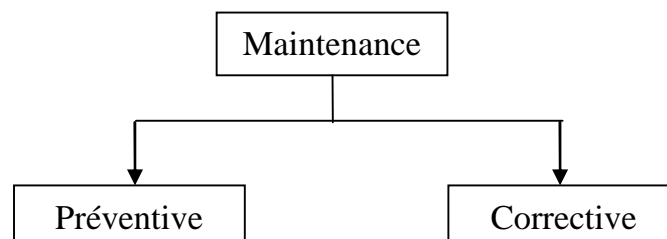
Les défaillances (d'après la norme AFNOR X 60011)



I-4 : LES DIFFERENTES FORMES DE MAINTENANCE

I-4-1 : Introduction:

Le choix parmi les différentes méthodes de maintenance entre dans le cadre de la politique de maintenance et doit se décider au niveau de la direction du service. Cette politique doit être comprise et admise par les responsables de production:

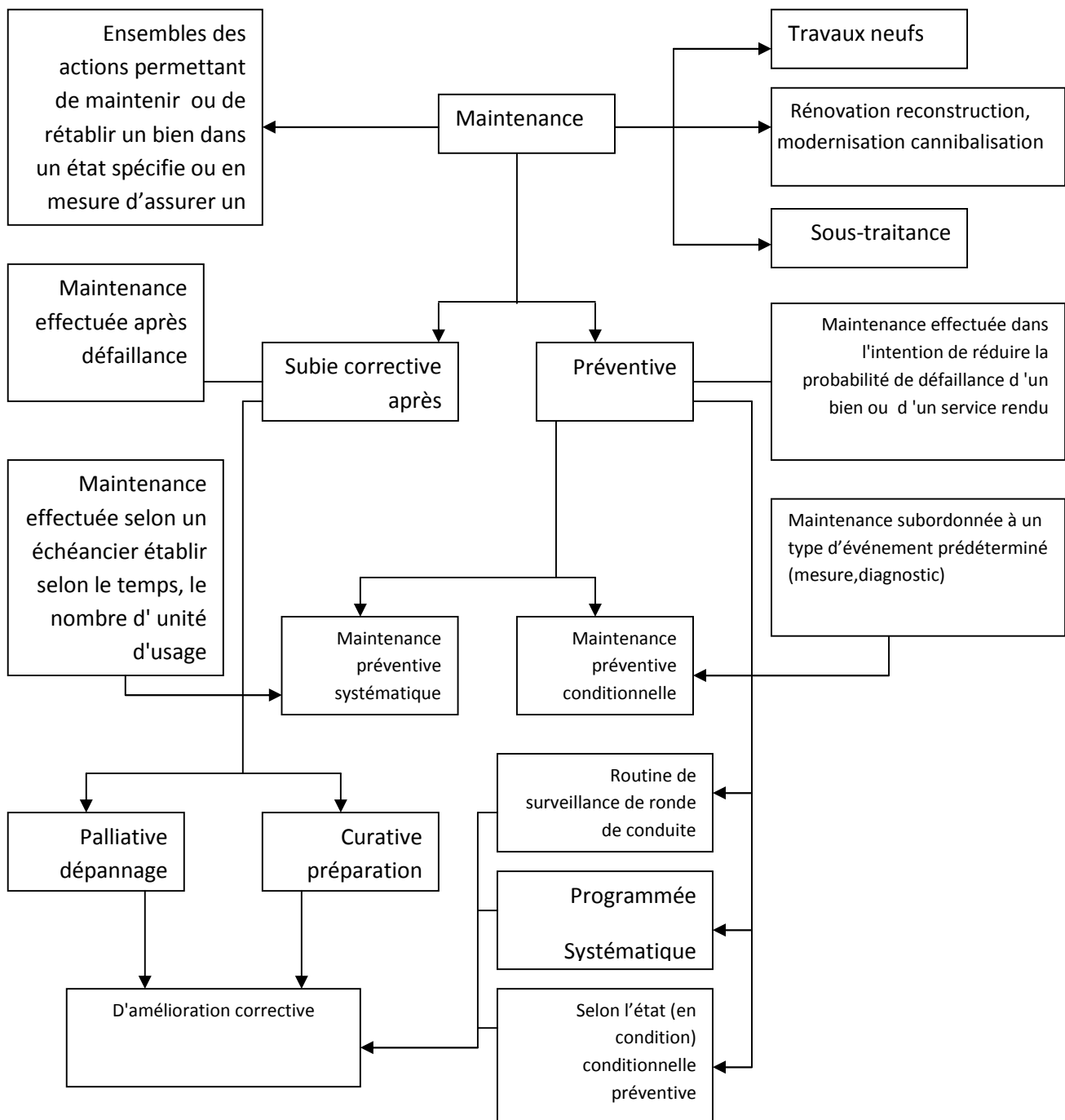


Ces méthodes doivent être standardisées entre les différents secteurs de l'entreprise ce qui n'exclut pas l'adaptation essentielle de la méthode au matériel à ses groupes, fonction, etc.; voir à un organe sensible.

Surtout, l'expérience montre que l'on ne peut pas mettre en œuvre une maintenance préventive efficace et durable. S'il n'existe un consensus véritable autour de son application.

I-4-1-2 : Les formes d'actions d'un service maintenance

Représentants graphiquement, ci-après, les différentes formes d'action possible



I-4-3: Les différents types de la maintenance:

I-4-3-1 : La maintenance corrective :

Définition:

a- définition AFNOR (norme x60010)

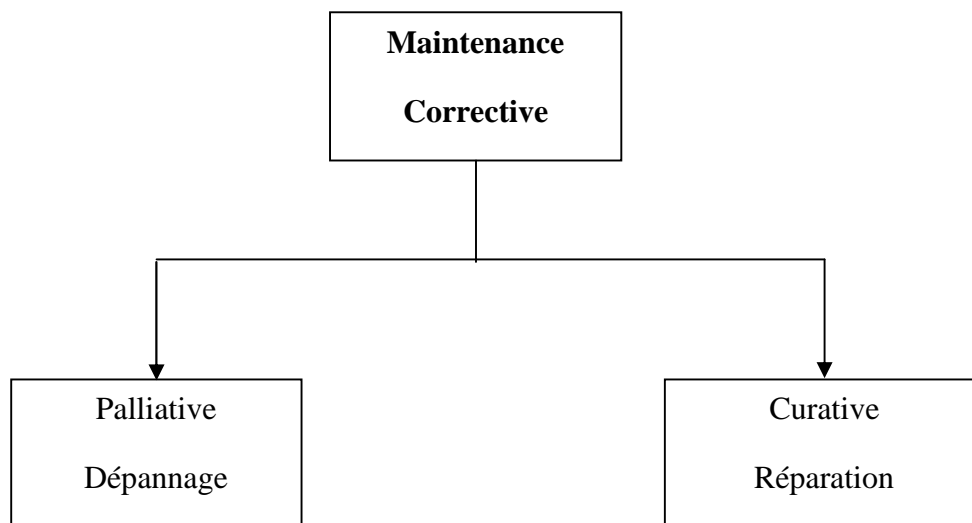
« Opération de maintenance effectuée après défaillance »

-synonyme: maintenance subie. Maintenance fortuite, maintenance après défaillance.

La maintenance corrective peut être subdivisée en deux types de maintenance :

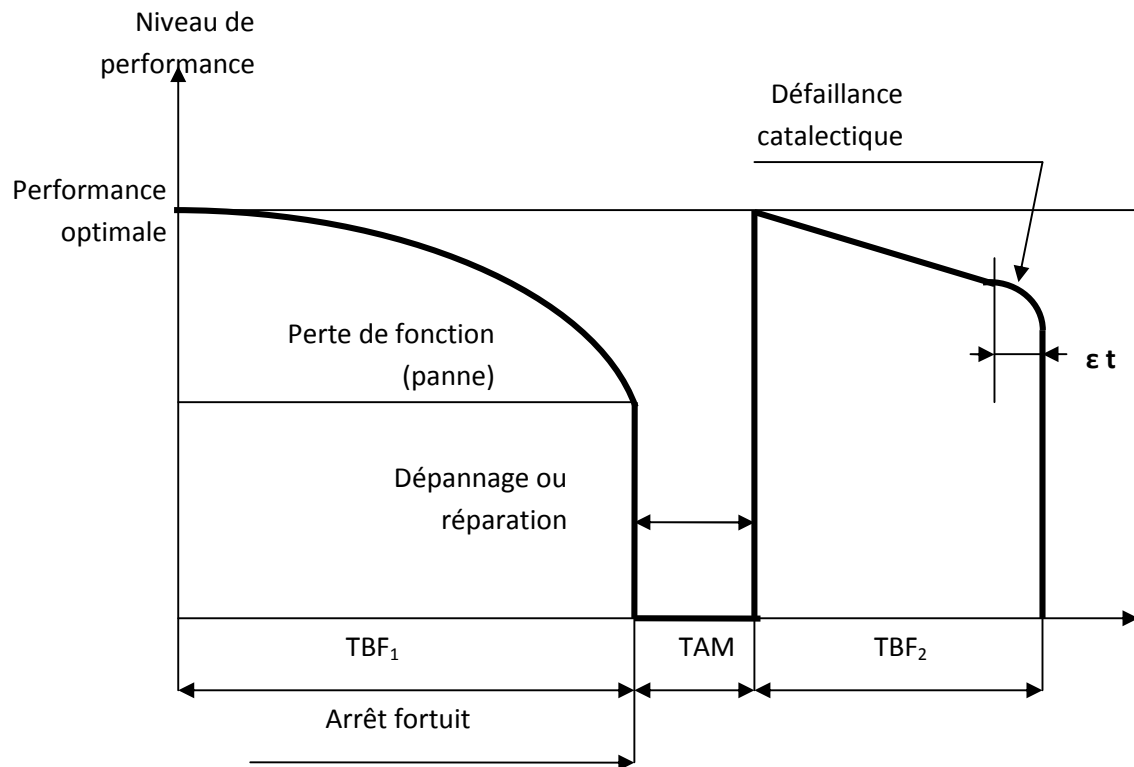
Maintenance palliative (dépannage).

Maintenance curative (réparation).



La maintenance corrective correspond à une attitude de défense (subir) dans l'attente d'une défaillance fortuite, attitude caractéristique de l'entretien traditionnel.

b- Graphe de la maintenance corrective



t: taux de défaillance.

TBF₁: le temps de bon fonctionnement de la première fois.

TAM: temps propre d'indisponibilité. Cause de défaillance au d'action de maintenance préventive (changement, systématique, les roulements. Les courroies).

La maintenance corrective débouche sur deux types d'interventions:

1- Les dépannages: c'est-à-dire une remise en état de fonctionnement effectuée in situ parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné, ont un caractère (provisoire).

Ils caractérisent la **maintenance palliative**.

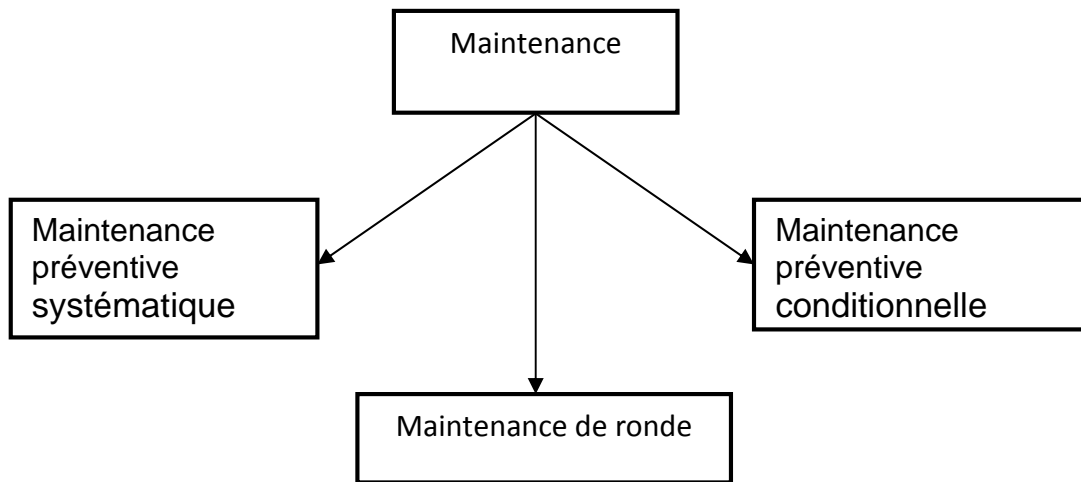
2- Les réparations, faites in situ ou en atelier central, parfois après dépannage, ont un caractère (définitif).

Ils caractérisent la **maintenance curative**.

I-4-3: La maintenance préventive:

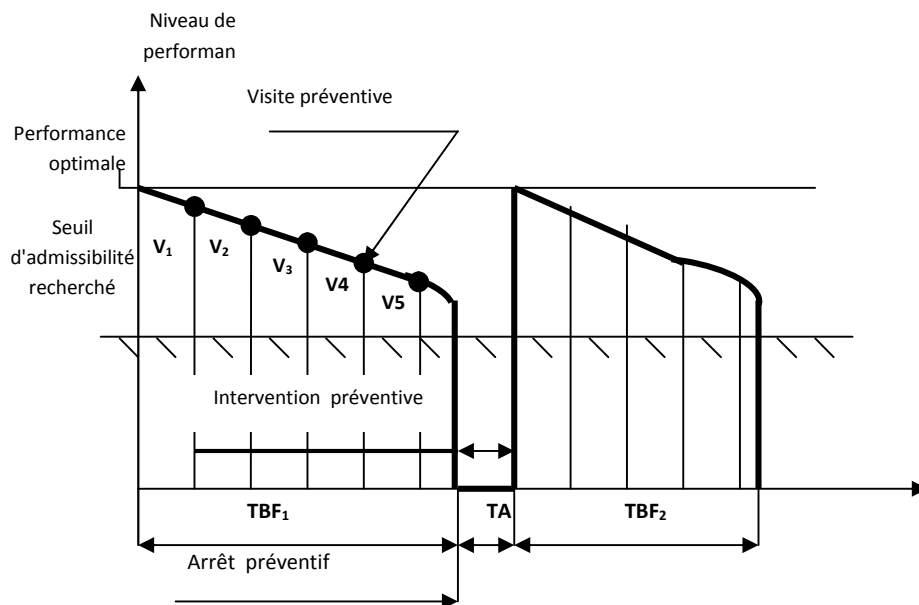
I-4-3-1: Définition AFNOR (norme x 60010)

Maintenance effectuée dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.



I-4-3-2 : Graphe de la Maintenance préventive:

Notation: une défaillance catalectique peut survenir entre deux visites, impliquant une intervention corrective.



TBF₁: Temps de bon fonctionnement n°1.

TA : Le temps d'arrêt.

TBF₂ : Temps de bon fonctionnement n°2.

C'est une intervention de maintenance prévue, préparé et programmée avant la date probable d'apparition d'une défaillance.

I-4-3-3 : Objectifs visés par le préventif:

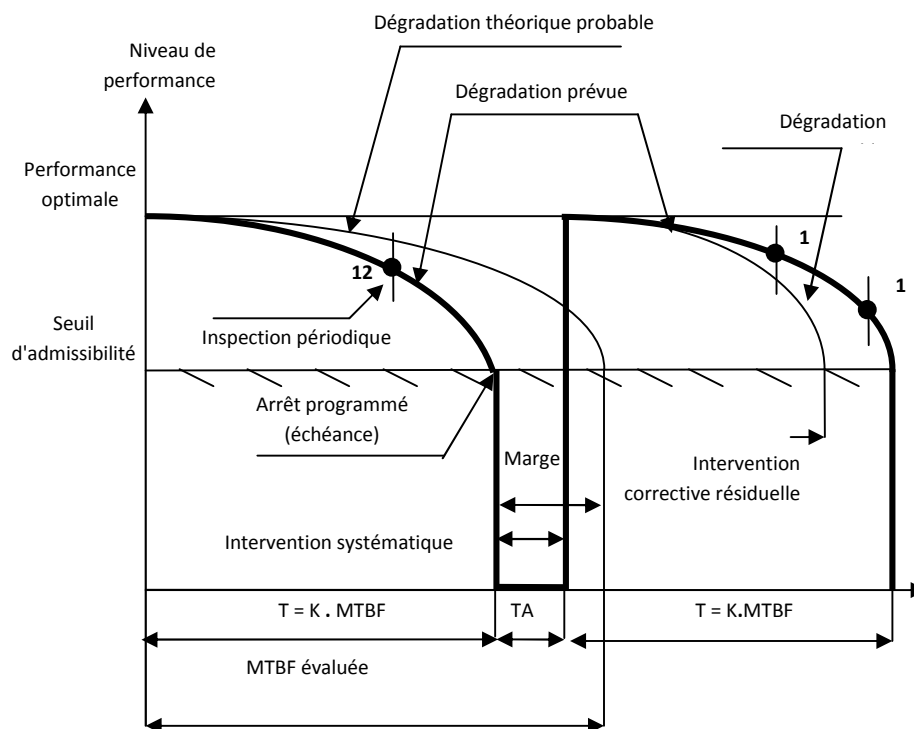
- Augmenter la fiabilité d'un équipement, donc réduire les défaillances en service : réduction des coûts de la défaillance, amélioration de la disponibilité.
- Augmenter la durée de vie efficace d'un équipement.
- Améliorer l'ordonnance des travaux, donc les résultats avec la production.
- Réduire et régulariser la charge de travail.
- Faciliter la gestion des stocks (consommations prévues).
- Assurer la sécurité (moins d'improvisations dangereuses).
- plus globalement, en réduisant la part de « fortuit » améliorer le climat des relations humaines (une panne imprévue est toujours génératrice de tension).

I-4-3-4 : La maintenance systématique

Synonyme: maintenance programmée, planifiée, par potentiel d'heures.

Définition AFNOR (norme x 60010)

« Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi suivant le temps ou le nombre d'unités d'usage ».



I-4-3-5 : La maintenance de ronde:

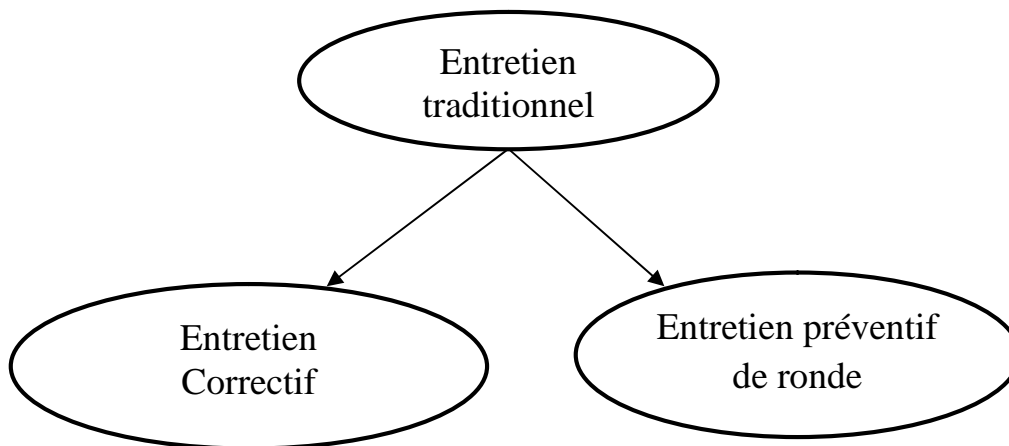
Définition: non pris en compte par 'AFNOR', la maintenance de ronde se caractérise par une surveillance régulière du matériel, sous forme de « ronde » à fréquence courte entraînant des petits travaux quand nécessaire.

Synonyme: entretien de ronde, de conduite, de surveillance, de routine petit entretien.

Objectif: réalisée par un personnel, attentif, elle assure une surveillance quotidienne de l'ensemble des équipements, évitant ainsi l'apparition d'un grand nombre de défaillance mineures qui pourraient à la longue avoir des conséquences majeures.

I-4-3-6 : L'entretien traditionnel:

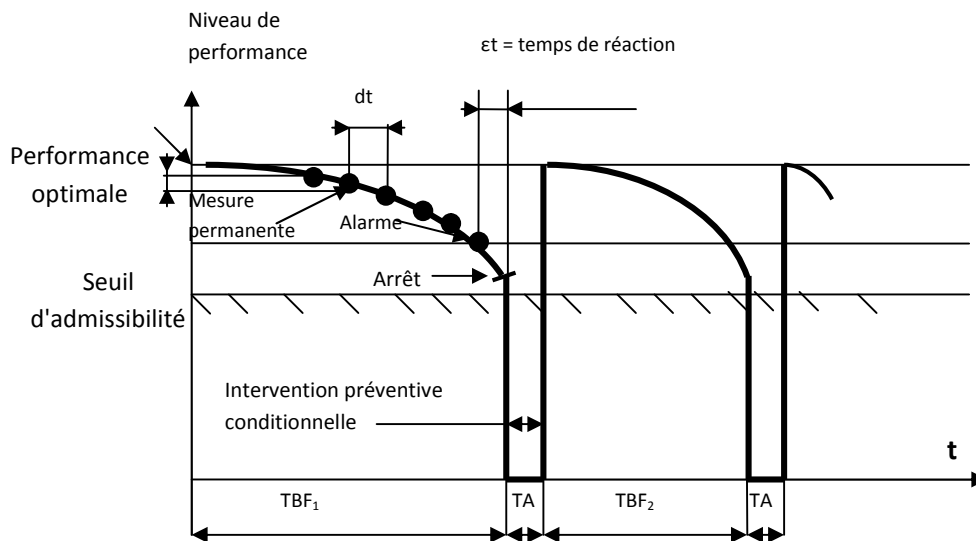
Une façon traditionnelle, l'entretien de ronde a toujours été appliqué tant la partie préventive de l'entretien.



I-4-4 : La maintenance conditionnelle :

Synonyme: « on condition » « selon l'état » ou prédictive, terme réservé par l'usage aux machines tournantes.

définition: Selon l'AFNOR maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure....)



TBF₁: le temps de bon fonctionnement N°1.

TA : le temps d'arrêt

TBF₂: le temps de bon fonctionnement N°2.

Objectifs:

Cette forme moderne de maintenance permet d'assurer le suivi continu du matériel en service dans le but de prévenir les défaillances attendues.

Elle n'implique pas la connaissance de la loi de dégradation.

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

CHAPITRE II

Fonctions de maintenance

II-1 : INTRODUCTION

La fonction « Maintenance » est l'une des trois fonctions techniques de l'industrie : l'étude du produit, la production et la maintenance du parc. Il est évident que la maintenance tend toujours à se démarquer de la production, ceci n'empêche pas l'existence d'une étroite collaboration et coordination des efforts avec tous les services de l'entreprise.

Le graphe de la figure 2-1 montre l'interface d'un service maintenance, il illustre clairement que la maintenance est une fonction intégrée à la vie de l'entreprise et que le technicien de maintenance est un homme de « contact ».

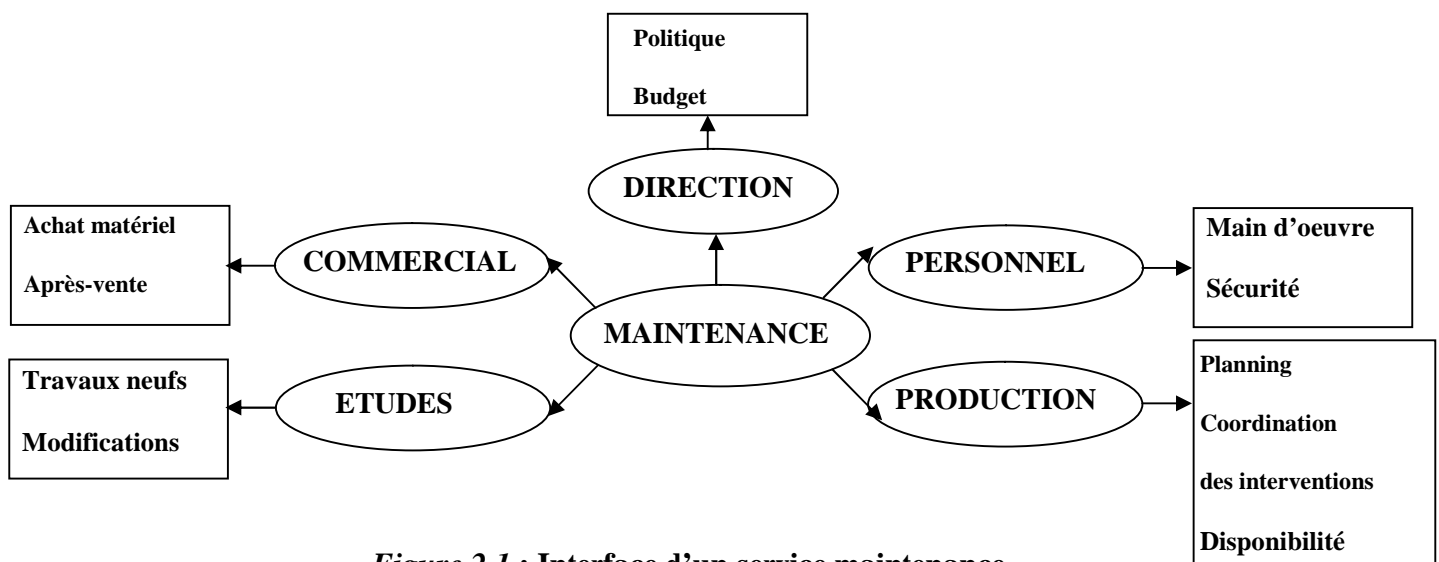


Figure 2.1 : Interface d'un service maintenance

II-2 : PLACE DE LA MAINTENANCE DANS LA STRUCTURE DE L'ENTREPRISE

La position de la maintenance dans la structure générale de l'entreprise influence considérablement l'efficacité de cette fonction. Elle pourra, en fonction de sa position dans la structure générale, obtenir une meilleure coopération des autres fonctions, une meilleure assistance technique ou créer davantage d'intérêt de la part du management.

L'image traditionnelle de l'entretien est celle d'une subordination illustrée par la figure 2-2.

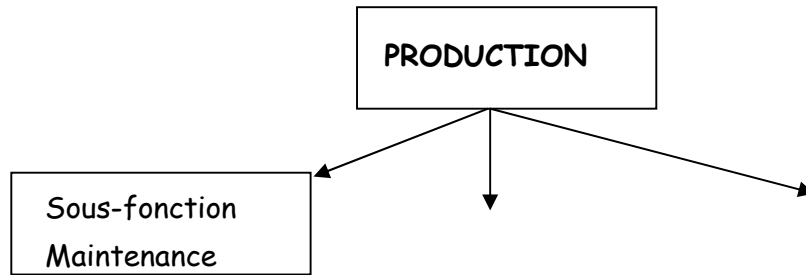


Figure 2.2 : Image traditionnelle de la maintenance

Dans ce schéma, le responsable de la production impose ses critères à court terme, tolérant la lubrification, supportant les arrêts fortuits, mais refusant toute programmation d'arrêts préventifs. Dans ce cas la maintenance ne peut ressembler qu'à un service parmi tant d'autres, et ses exigences passent après celles de la production.

La « promotion » de l'entretien en maintenance passe par « l'horizontalité » des deux fonctions, suivant le modèle de la figure 2-3.

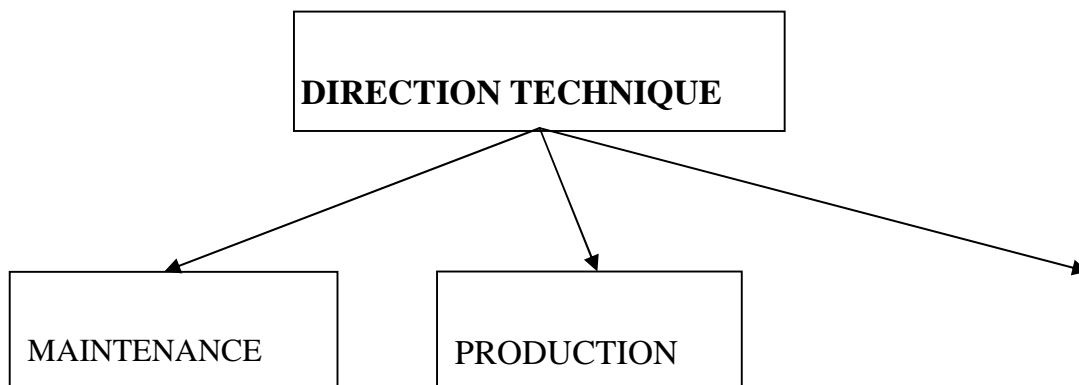


Figure 2.3 : Image actuelle de la maintenance

Dans ce contexte, la maintenance assure la maîtrise de la « possession » d'un équipement :

1. Participer au choix avec la production ;
2. Participer aux négociations d'acquisition à l'installation ;
3. Maîtriser dans l'optique d'une durabilité prédéterminée ;
4. Rechercher l'amélioration et l'optimisation.

II-2-1 : Analyse d'un organigramme d'entreprise

Un organigramme est utile pour établir la position de la maintenance et des autres fonctions de l'entreprise.

II-2-1-1 : Qu'est-ce qu'un organigramme

Il s'agit d'une représentation schématique de la structure d'une entreprise mettant en évidence les domaines et responsabilités de chaque élément composant. Il répond à la question « *Qui fait quoi ?* ».

II-2-1-2 : Intérêt d'un organigramme

Son intérêt premier est de borner les domaines d'action de chaque responsable, évitant ainsi les chevauchements et les luttes d'expansion d'influence.

II-2-1-3 : Exemple d'organigramme

Un organigramme universel qui puisse s'adapter à toutes les situations n'est pas possible. Chaque entreprise présente des traits particuliers et parfois changeants. Néanmoins, selon « FAYOL » il existe dans l'entreprise cinq fonctions de base subordonnées à la direction.

La figure 2-4 montre un exemple d'organigramme qui peut servir de référence pour l'organisation et la place de la maintenance dans la structure générale.

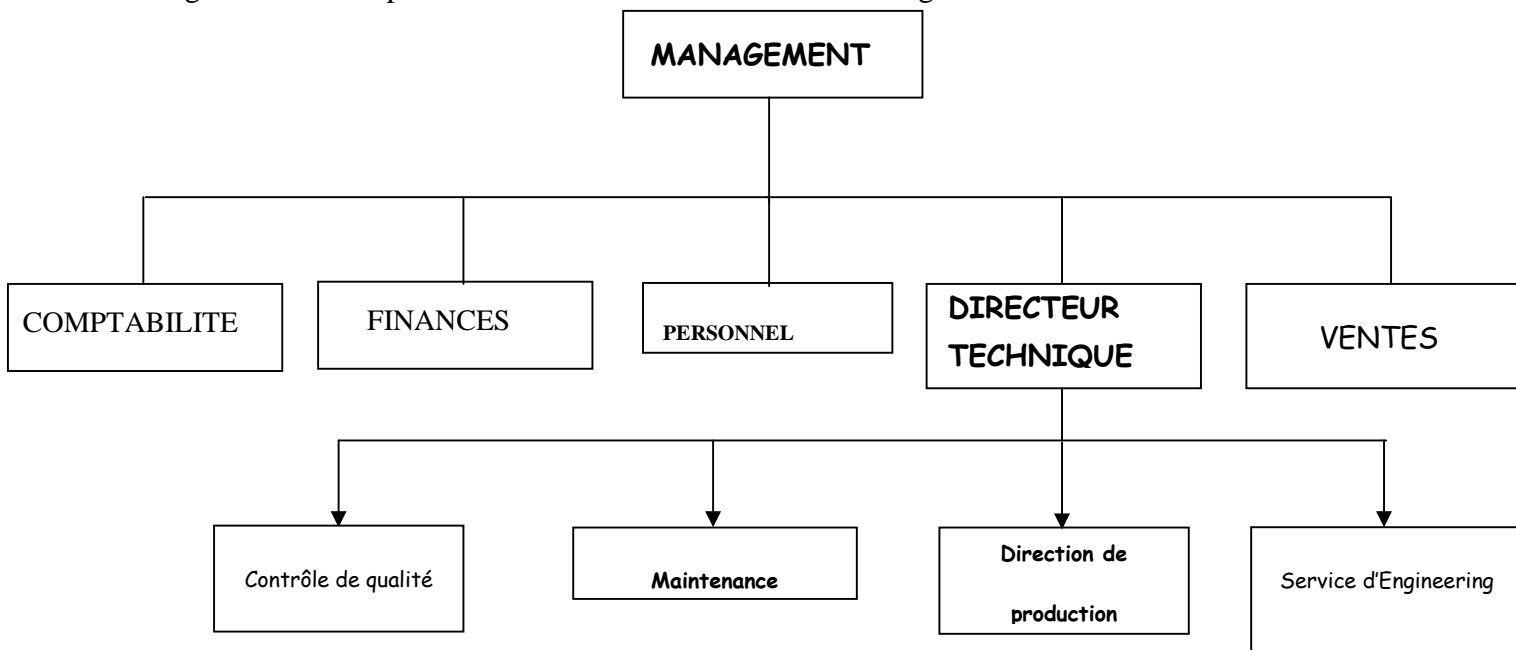


Figure 2.4 : Exemple d'organigramme

II-3 : ORGANISATION INTERNE DU DEPARTEMENT

L'organisation interne du département maintenance exerce aussi un effet sur son fonctionnement, la variété dans ce cas est illimitée selon la taille, la nature et les objectifs de l'entreprise. Pour obtenir une meilleure organisation de l'équipe, les fonctions de maintenance peuvent être classées comme suit :

1. Les spécialités, notamment : Mécanique, électrique, bâtiment, instrumentation, ...etc.
2. Types de service, notamment : Réparation, lubrification, inspection, révision,...etc.
3. Planning des services, notamment : Réparation d'urgence, service de routine,...etc.

L'organigramme de la figure 2-5 montre l'exemple d'organisation d'un service maintenance d'une petite entreprise (8 à 25 agents de maintenance).

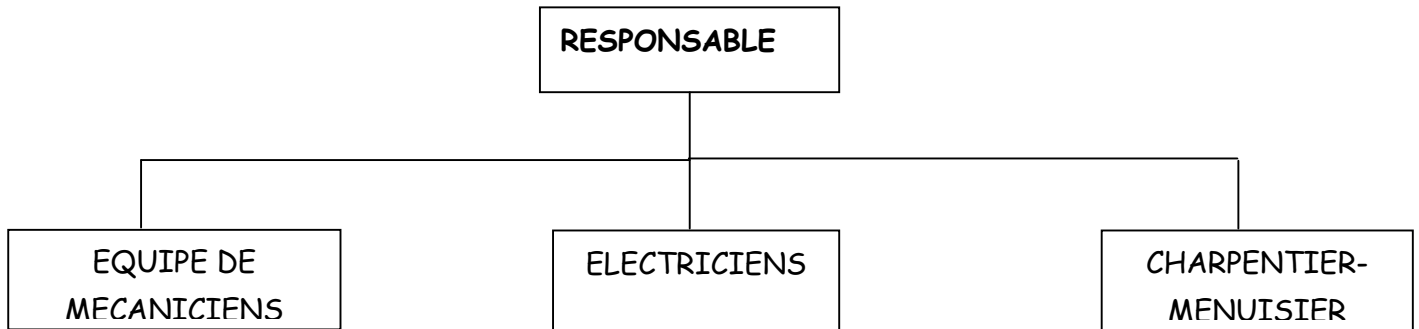


Figure 2.5 : Organigramme d'un petit service de maintenance

D'une manière générale, pour bien assurer ses activités diverses, le service maintenance doit regrouper les fonctions suivantes : (Figure 3-6)

1. La fonction méthode ;
2. La fonction ordonnancement ;
3. La fonction réalisation ;
4. La fonction gestion.

II-3-1 : LA FONCTION METHODES

Ses domaines de responsabilité sont les suivants :

II-3-1-1 : Participation au choix des politiques de maintenance à apporter au matériel

1. Choix des méthodes et des techniques à utiliser ;
2. Choix des moyens à mettre en œuvre ;
3. Détermination des normes d'entretien.

II-3-1-2 : Gestion du parc matériel sur le plan technique et économique

1. Liaison avec le bureau d'étude et le service achat : prise en compte de la maintenance ;
2. Etudes techniques :
 - De fiabilité, de disponibilité, d'amélioration ;
 - De standardisation ;
 - Gestion des PDR ;

- Problèmes de lubrification, ...etc.
- 3. Analyse des coûts et des temps ;
- 4. Sécurité.

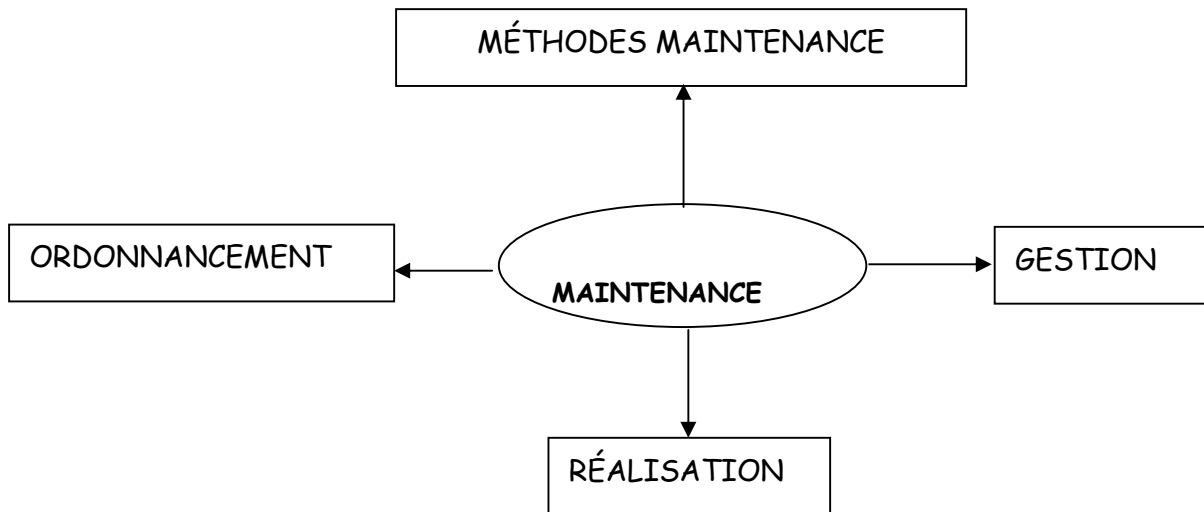


Figure 2.6 : Les différentes fonctions dans un service maintenance

II-3-1-3 : Préparation du travail

1. Préparation des interventions fortuites ou programmées ;
2. Préparation des rondes, visites et expertises ;
3. Préparation des arrêts ;
4. Elaboration des cahiers de charge de sous-traitance.

II-3-1-1-4 : L'assistance technique

1. Localisation des défaillances, diagnostic et expertises ;
2. Réception technique des travaux neufs et du matériel nouveau ;
3. Formation technique du personnel ;
4. Mise en œuvre de techniques particulières, telles que les contrôles non destructifs ou les analyses de vibrations, ...etc.

II-3-2 : LA FONCTION ORDONNANCEMENT

L'ordonnancement est la fonction de l'entreprise chargée de gérer les temps d'activités. Elle occupe une position chronologique dans le déroulement d'une intervention entre les méthodes et la réalisation.

La fonction méthodes affecte une durée à un travail.

La fonction ordonnancement planifie cette tâche, c'est à dire fixe l'heure H du jour J où elle doit débiter.

La fonction réalisation, au moment choisi par l'ordonnancement suivant les prescriptions des méthodes, la met en œuvre.

II-3-2-1 : Les actions d'ordonnancement

Programmation : C'est l'action d'intégrer une tâche « en attente » sur un planning, donc de lui choisir des dates de début et de fin.

Lancement : C'est une sous fonction de l'ordonnancement ayant pour mission de rassembler tous moyens pour assurer leur disponibilité au moment choisi.

Avancement : Autre sous fonction assurant le suivi des travaux. Il contrôle l'état d'avancement des « en cours », leur achèvement, et enregistrer les éventuelles discordances entre les prévisions et les réalisations ce qui permet les correctifs nécessaires à la tenue à jour des planning.

Débloccage : C'est l'action de libérer le lancement d'une tâche après l'enregistrement de la fin de la tâche antécédente.

Approvisionnement : Il est de la responsabilité de l'ordonnancement de veiller à la disponibilité des « consommables », donc d'assurer les approvisionnements nécessaires.

II-3-2-2 : Caractéristiques de l'ordonnancement

Mission : L'ordonnancement est la fonction « Chef d'orchestre », chargée de conduire les événements. Pour ce faire, son rôle consiste à :

- a. Prévoir la chronologie du déroulement des tâches ;
- b. Optimiser l'utilisation des moyens nécessaires, et les rendre disponibles ;
- c. Lancer les travaux au moment choisi ;
- d. Contrôler l'avancement et la fin des tâches et prendre en compte les écarts entre prévisions et réalisations.

Ce qui peut s'exprimer sous la forme :

Prévoir un instant T et un endroit X où un personnel P , muni de l'outillage O et des matières M , exécutera la tâche Y , et ceci en harmonie avec les autres activités.

II-3-3 : LA FONCTION REALISATION

La fonction réalisation a pour objet d'utiliser les moyens mis à disposition, suivant les procédures imposées, pour remettre le matériel dans l'état spécifié.

Le but visé par l'intervention doit être clairement défini dans la préparation :

1. Réalisation des interventions de dépannage de court terme ;
2. Réparer les éléments défectueux ;
3. Faire le compte-rendu ;
4. Réaliser les programmes préparés par les méthodes.

II-3-4 : LA FONCTION GESTION

La gestion du service se fait sous la responsabilité directe du chef de service maintenance. « Gérer », c'est prendre des décisions en connaissance de cause. Mais gérer quoi ?:

- 1. Gestion des matériels**
- 2. Gestion des stocks et approvisionnement**
- 3. Gestion économique**
- 4. Gestion des investissements**
- 5. Gestion des moyens humains**

CHAPITRE III

Documentation en maintenance

Ce chapitre présente deux documents de base dans n'importe quel service de maintenance : le dossier machine et le dossier historique.

III-1 : DOSSIERS MACHINES

Le dossier machine est la référence permettant la connaissance intime d'un équipement, son origine, ses techniques et ses performances.

Le dossier machine comprend deux parties :

- a. Le dossier constructeur avec tous les documents fournis, la correspondance échangée, les documents contractuels.
- b. Le fichier machine interne, standard, établi et tenu à jour par le BDM.

III-1-1 : CONSTITUTION D'UN DOSSIER MACHINE

III-1-1-1 : *Logique de conception*

Le dossier machine doit être conçu pour être opérationnel. Il doit adapter les détails descriptifs et les informations aux besoins des agents de maintenance, en préparation ou en intervention.

III-1-1-2 : *Partie constructeur*

Elle comprend à son tour deux parties :

- a. Documents commerciaux relatifs à la vente
 1. Echange de correspondance ;
 2. Bon de commande et documents contractuels avec les conditions de garantie ;
 3. P.V de réception, certificat de prise en charge avec les réserves du service après vente ;
 4. Références du service après vente, du réseau commercial, du représentant local.
- b. Documents techniques fournis par le constructeur :

Il appartient au service maintenance, lors des négociations d'achat, d'exiger les documents qui lui seront ultérieurement utiles, à savoir :

 1. Caractéristiques de la machine : capacités, performances, consommation, puissance....etc. ;
 2. Liste des accessoires ;
 3. Nomenclatures des pièces détachées (stock minimal, référence) ;
 4. Plans, schémas : électriques, hydrauliques, pneumatiquesetc.

5. Notice de mise en action :
 - a. Elingage, manutention, nettoyage de réception ;
 - b. Encombrement, scellement, fondations ;
 - c. Différents branchements ;
 - d. Rodage, réglages et vérifications divers.

6. Notice de fonctionnement :
 - a. Mise en route ;
 - b. Règles de conduite ;
 - c. Consignes de sécurité.

7. Notice de maintenance :
 - a. Notice de lubrification (types de lubrifiants, points de graissage, fréquence de graissage, ...etc.) ;
 - b. Organigramme de dépannage, documents d'aide au diagnostic des défaillances les plus probables.
 - c. Gammes types de réparations répétitives ;
 - d. Fréquences des visites préventives. Check-list relative à ces visites ;
 - e. Liste des outillages spécifiques.

III-1-1-3 : *Partie interne du dossier machine*

Il appartient au BDM (Bureau De Méthodes) maintenance :

1. D'établir une forme standard de dossier, classé à partir du code inventaire relatif à la machine ;
2. De définir les rubriques utiles ;
3. De tenir à jour toutes les rubriques choisies.

NB : il est particulièrement important de noter toutes les modifications opérées sur le matériel; recherche de panne à partir d'un schéma électrique non corrigé après modification.

III-1-1-4 : *Forme matérielle du dossier machine*

Le dossier machine est évidemment difficile à mettre en mémoire informatique, « schémas, plans, doivent être accessibles aux préparateurs et intervenants »
Nous utiliserons des dossiers dont les rubriques seront séparées par des intercalaires cartonnés et imprimés sous une forme standard.

III-1-1-5 : Exemple de rubriques constituant un dossier machine

Nom machine :	
Code machine :	
Indice de criticité :	
REPERE	TITRE
00	Sommaire
01	Contrat de commande, conditions de garantie, service après vente
02	P.V de réception.
03	Caractéristiques, fiches techniques
03	Codification, découpage structurel
05	Plans d'ensemble, de détails, schémas
06	Notice d'installation, de mise en service
07	Notice de conduite, d'utilisation
08	Consignes de sécurité
09	Notice de lubrification
10	Liste générale des constituants
11	Plans et gammes des pièces de rechange
12	Liste des rechanges de première urgence
13	Notice d'entretien de ronde
14	Planning des visites préventives
15	Check-list des visites préventives
16	Gamme type d'opérations préventives
17	Listes des défaillances possibles prévisibles
18	Schémas logiques de diagnostic-dépannage
19	Outillage spécifique d'intervention

III-2 : FICHER HISTORIQUE D'UNE MACHINE

L'historique est un fichier relatif à chaque machine inventoriée, décrivant chronologiquement toutes les interventions correctives subies par la machine depuis sa mise en service. Il représente le « carnet de santé » de la machine complémentaire du dossier machine.

III-2-1 : Constitution d'un historique machine

III-2-1-1 : Constitution

Elle est fonction de l'exploitation que l'on désire :

Exemple1 : L'historique contiendra ou non les coûts relatifs à chaque intervention.

Exemple2 : L'historique contiendra ou non les « temps d'arrêt » ou « les temps passés » dus à chaque intervention.

III-2-1-2 : *Modèle possible*

Voir tableau page suivante

L'affectation à un groupe fonctionnel se fait à partir d'un code tiré de la décomposition structurelle du dossier machine. Les imputations sont souvent codées suivant les exemples ci-dessous :

Code « a » cause de défaillance

- 0 : accident imprévisible
- 1 : cause intrinsèque détectable
- 2 : cause intrinsèque non détectable
- 3 : défaut d'entretien
- 4 : mauvaise intervention antérieure
- 5 : mauvaise conduite
- 6 : consignes non respectées
- 7 : défaillance seconde
- 8 : autres causes

Code « b » nature

- 1 : origine mécanique
- 2 : origine électrique
- 3 : origine électronique
- 4 : origine hydraulique

Code « c » gravité

- 0 : défaillance critique
- 1 : défaillance majeure
- 2 : défaillance mineure

Remarques

- 1- De façon classique, toutes les défaillances à caractère correctif sont portées sur l'historique.
- 2- Par contre, les interventions préventives systématiques n'y figurent pas (voir échéancier dans le dossier machine).

HISTORIQUE DE LA MACHINE

Code :

Indice de criticité :

Date de mise en service :

Caractéristiques :

Code de découpage fonctionnel

A : groupe fonctionnel a

B : groupe fonctionnel b

C : groupe fonctionnel c

D : groupe fonctionnel d

E : groupe fonctionnel e

F : transmission

Date	Compteur machine	Code d'affectation défaillance	Description Intervention	Durée		Codes imputation		
				Inter.	Arrêt	a	b	c
21-12-2005	17800 h	F	Echange standard Roulement sortie réducteur	5 h	7 h 30	3	1	1
03-05-2006	24600 h	A	Changement courroie de transmission	3 h	4 h	5	1	0
26-07-2006	26000 h	C	Changement moteur électrique	5 h	8 h	0	2	0

III-2-2 : EXPLOITATION DES HISTORIQUES

Les historiques des machines semblables peuvent être réunis pour une exploitation unique.

1. Exploitation en fiabilité

On déduit de l'historique d'une machine ses lois de fiabilité, l'évaluation de son taux de défaillance, son MTBF, sa durée de vie nominale, les périodes d'intervention

correspondant à des seuils de fiabilité prédéterminés. Elle implique la mise en mémoire des TBF, donc la saisie des dates de pannes.

2. Exploitation en disponibilité

La disponibilité se détermine à partir du modèle suivant :

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

Elle implique donc la mise en mémoire des TTR soit en durée d'interventions soit en durée d'arrêt.

3. Exploitation en méthode

- Sélection et amélioration des organes fragiles.
- Préparation aux pannes fréquentes et coûteuses après sélection.

4. Exploitation en gestion de stocks

L'historique peut fournir des éléments de consommation de PDR (pièces de rechange).

5. Exploitation en politiques de maintenance

Elle implique la saisie des temps et des coûts d'interventions, son coût direct main d'œuvre+ matière. Elle permet aussi la ventilation des coûts :

- Par machine, par groupe fonctionnel
- Par atelier, par type de machine
- Par type de défaillance
- Par type d'intervention.

Elle permet la tenu d'un « tableau de bord de gestion» la formation de « ratios », la synthèse d'informations technico-économiques permettant de choisir une méthode de maintenance adaptée à l'équipement dont on possède l'historique.

CHAPITRE IV

Gestion des opérations de maintenance

Quatre méthodes de maintenance seront présentées dans ce chapitre : l'estimation de temps faite par le bureau de méthodes, deux méthodes de planification (ordonnancement) des interventions nommées PERT et Gantt et enfin une méthode de choix des priorités appelée ABC.

IV-1 : Estimation du temps alloué à une intervention (Méthodes)

La connaissance des temps passés et l'estimation des temps à venir sont des conditions nécessaires à la gestion de la maintenance. Il existe cependant plusieurs méthodes pour la mesure industrielle du temps, la plus utilisée en maintenance, vu sa simplicité, est sans doute la méthode des estimations, où on peut procéder de trois manières différentes.

IV-1-1: Estimation « Au jugé »

Le temps estimé d'une intervention dépend de l'expérience personnelle du technicien préparateur. C'est une méthode certes rapide mais peu précise.

IV-1-2 : Estimation « Historique »

Dans cette méthode, le temps alloué d'une tâche est estimé par le dépouillement d'un compte rendu d'une tâche semblable effectuée antérieurement. La mise en mémoire informatique des historiques permet, à cet effet, une rapidité d'exploitation des données.

IV-1-3 : Estimation Analytique

Pour chaque tâche le préparateur va estimer trois temps :

Tr : Le temps « Réaliste », qui est le temps le plus fréquent ;

To : Le temps « Optimiste », ou minimal concevable si tout se passe bien ;

Tp : Le temps « Pessimiste », ou maximal dans le cas où tout se passe mal.

Le temps moyen peut alors se donner par la formule :

$$T_m = \frac{T_o + 4T_r + T_p}{6}$$

Exemple :

Calculer le temps moyen estimé pour le remplacement d'un roulement à billes du type 6205 d'un tour parallèle sachant que les temps estimés sont :

$$T_r = 1\text{h } 30\text{ min}, T_o = 1\text{h}, T_p = 3\text{h}: \quad T_m = \frac{1 + 4 \cdot 1,5 + 3}{6} = 1,7\text{h}$$

On peut aussi estimer le temps moyen T_m par la méthode des probabilités. On attribut à chaque estimation une probabilité (P_i) et on calcule le temps moyen par : $T_m = \sum_1^n P_i \cdot t_i$

Exemple :

Pour le même exemple précédent, il y a 10 % de chances que $T=3\text{h}$, 50 % de chances qu'il soit égale à 1h 30min et 40 % de chances à 1h. Calculer T_m .

$$T_m = 0,1 \cdot 3 + 0,5 \cdot 1,5 + 0,4 \cdot 1 = 0,3 + 0,75 + 0,4 = 1,45\text{h}$$

IV-2: METHODE PERT (PROGRAM EVALUATION AND REVIEW TECHNIQUE)

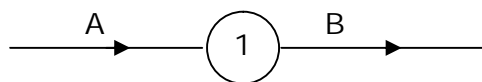
Il s'agit d'une méthode de gestion et de planification des interventions qui comprennent plusieurs tâches à la fois. Elle a vu le jour aux USA en 1956, elle comprend trois méthodes : PERT temps, PERT charge et PERT coût.

IV-2-1 : PERT temps (Méthode du chemin critique ou CPM)

Dans la méthode CPM les tâches sont repérées par des lettres alphabétiques (A,B,C,...) et les étapes (qui représentent la fin d'une tâche et le début d'une autre) par des chiffres (1,2,3,...), le délai de chaque tâche est exprimé en minutes, en heures ou en jours.

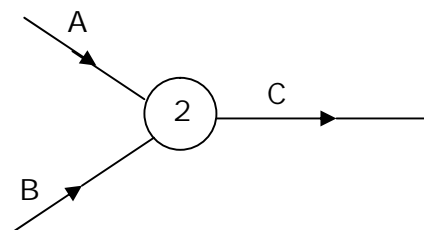
Exemple :

1.

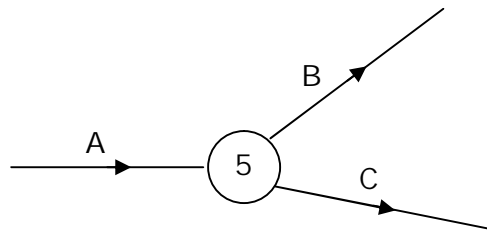


Etape 1 : Fin de la tâche A, début de la tâche B, la tâche B ne peut commencée que si A est terminée (Notion d'antériorité).

2.



Etape 2 : La tâche C ne peut commencer que si A et B soient exécutées. Cela ne veut pas dire qu'ils finiront en même temps.



3.

Etape 3 : Fin de la tâche A début simultané des tâches B et C.

Afin de mieux comprendre le principe de la méthode CPM, on propose l'exemple suivant :

Dans un service de maintenance on veut procéder à une intervention qui comprend 5 tâches (A, B,C,D et E), le service méthode a estimé le temps alloué à chacune d'elles et a établi le tableau ci-dessous :

Tâche	Tâche antécédente	Durée (h)
A	-	3
B	A	6
C	B	2
D	A	5
E	D, C	2

La lecture de ce tableau est très facile, par exemple ; la tâche A doit être exécutée en premier dans un temps de 3 heures, la tâche D ne commencera que si A est finie son temps alloué est de 5h, quant à la tâche E, elle ne commencera que si les tâches D et C soient finies.

A partir de ce tableau, on établit la matrice d'antériorité. Pour ce faire, chaque contrainte est notée par 1 dans la matrice, par exemple ; pour exécuter B il faut finir A, on met 1 devant la ligne B et la colonne A. Après l'obtention de la matrice d'antériorité, on barre les lignes et les colonnes qui n'ont pas d'antériorité (Dans notre exemple il s'agit de la tâche A) de nouveaux zéro apparaissent et de cette façon les niveaux s'en déduisent.

Tâches	A	B	C	D	E	Niveau	Niveau	Niveau	Niveau
						1	2	3	4
A						0 (A)	-	-	-
B	1					1	0 (B)	-	-
C		1				1	1	0(C)	-
D	1					1	0(D)	-	-
E			1	1		2	2	1	0(E)

Cette matrice nous permet alors d'établir un planning de l'intervention comme suit :

1. La première tâche à faire est la tâche A,
2. Les tâches B et D commenceront en même temps après la fin de la tâche A ;
3. Exécuter la tâche C et enfin la tâche E.

Ce planning se traduit par le réseau PERT suivant la figure 4.1

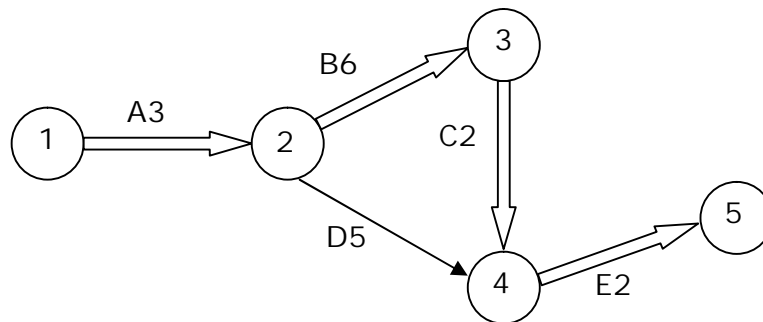


Figure 4.1. Réseau PERT de l'exemple précédent

Remarques :

1. Les chiffres devant la tâche représentent sa durée allouée par le BDM ;
2. Les flèches en double traits représentent le **chemin critique** qui est la période maximale de l'intervention (=13 h).

IV-2-1-1 : Problème de battement

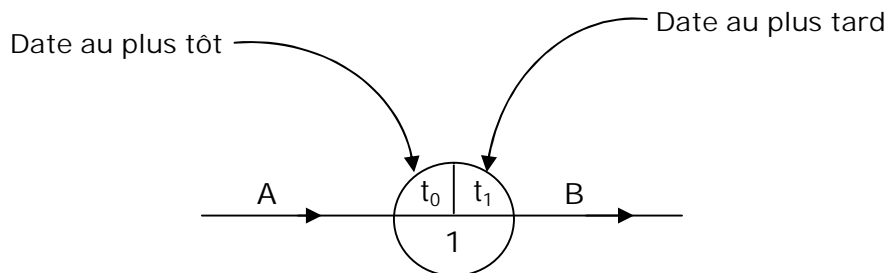
Pour les tâches qui ne sont pas sur le chemin critique, un retard peut être pris sans pénaliser les délais de l'intervention. On définit alors pour chaque tâche les délais « Au plus tôt » et « Au plus tard ».

Le retard (ou la marge) permis peut se calculer par les expressions suivantes :

Marge libre (ml_{ij}) = date au plus tôt « j » - date au plus tôt « i »

Marge totale (mt_{ij}) = date au plus tard « j » - date au plus tôt « i »

La représentation de l'étape margée aura, dans le réseau PERT, pour forme :



Pour l'exemple précédent, on aura donc le tableau suivant :

Tâche	Début		Fin	
	Au plus tôt	Au plus tard	Au plus tôt	Au plus tard
A	0	0	3	3
B	3	3	9	9
C	9	9	11	11
D	3	6	8	11
E	11	11	13	13

Le nouveau réseau PERT

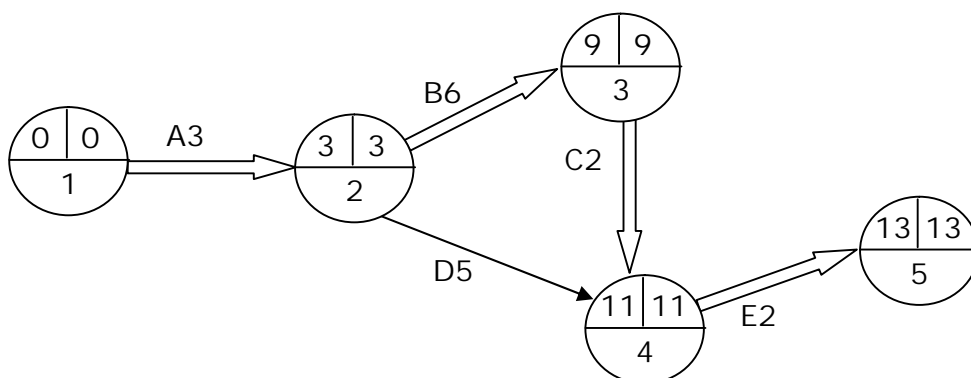


Figure 4.2. Le nouveau réseau PERT de l'exemple précédent

IV-2-1-2 : Diagramme de GANTT

C'est une représentation sous forme de lignes des tâches à entreprendre, elle constitue le planning. Les tâches du chemin critique sont représentées par un rectangle plein, les plus tôt par une ligne et les plus tard par un rectangle hachuré.

Pour l'exemple précédent le diagramme de GANTT aura la forme :

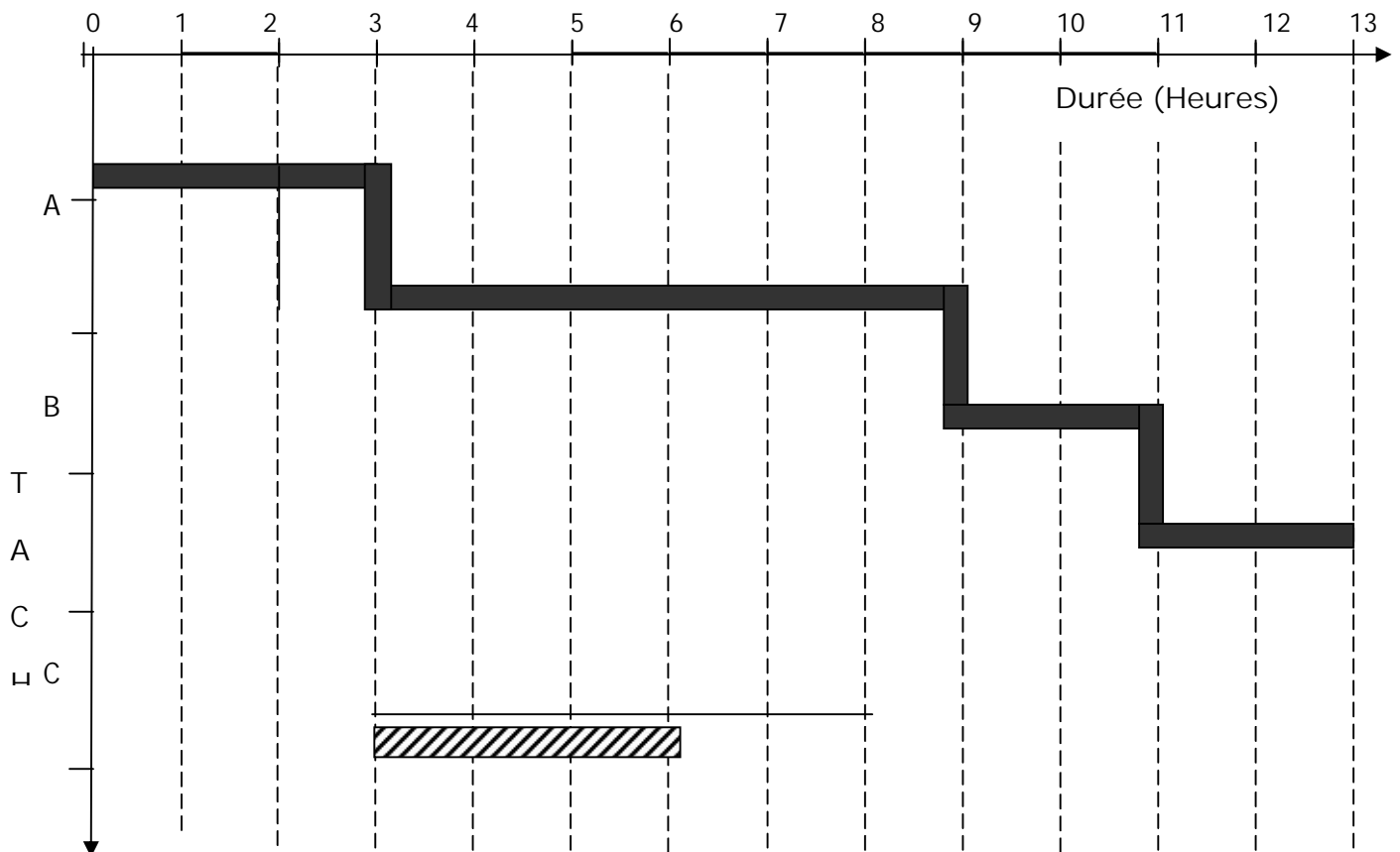


Figure 4.3. Diagramme de GANTT de l'exemple précédent

IV-2-2 : PERT charge

Il fait apparaître la charge de travail (ouvriers) en fonction du calendrier. De ce fait, il est un outil précieux pour la planification. On peut l'établir du PERT temps ou du diagramme de GANTT (à voir dans l'exercice qui suit).

Exercice d'application

Dans un service de maintenance on veut procéder à une intervention qui comprend 10 tâches. Pour ce faire, un tableau montrant la durée de chaque tâche, le nombre d'ouvriers correspondant ainsi que les contraintes d'antériorités a été tracé par la préparation. On

demande à l'ordonnancement de planifier les travaux rigoureusement afin de respecter le délai et la charge de travail.

Tâche	Tâche antécédente	Durée (h)	Charge (ouvriers)
A	J	2	2
B	I,G,J	4	1
C	H	1	4
D	C,H,E	1	3
E	A,F	5	3
F	H	3	1
G	J	1	2
H	-	2	5
I	A,F,H	4	1
J	-	2	2

Plan de travail

1. Tracer la matrice d'antériorités;
2. Tracer le réseau PERT;
3. Calculer les marges et tracer le nouveau réseau PERT ;
4. Tracer le diagramme de GANTT en correspondance avec la charge du travail;
5. Conclusion.

IV-3 : METHODE ABC DE PARETO

IV-3-1 : Origine de la méthode

Elle est issue des travaux de **Wilfredo Pareto** (1848-1923) économiste italien né à paris. Il constata en étudiant la répartition de l'impôt foncier aux USA que 15% des contribuables payaient 85% du total. Depuis, cette méthode se nomme loi de Pareto, loi des 15-85 ou 20-80.

IV-3-2 : Définition et intérêt de la méthode

Elle permet de choisir entre plusieurs problèmes ceux qui doivent être traités en priorité. Elle permet donc de distinguer d'une façon claire les éléments importants de ceux qui le sont moins. Elle évite ainsi de ne pas se laisser accaparer par des travaux certes utiles mais de très faible importance par rapport au volume des autres travaux.

C'est le cas d'un service maintenance, où les tâches sont nombreuses et la main d'œuvre est parfois insuffisante, de plus, les technologies récentes coûtent cher. Il convient par conséquent de s'organiser d'une façon rationnelle, ainsi en appliquant la méthode ABC de Pareto on peut remédier à ce problème en déterminant exactement les types d'interventions à mener en priorité.

IV-3-3 : Méthodologie

Elle consiste à classer les pannes par ordre décroissant de coûts (heures ou argent), chaque panne se rapporte à une machine, ou rubrique. Puis à établir un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes cumulés. On obtient ainsi un graphe montrant trois zones :

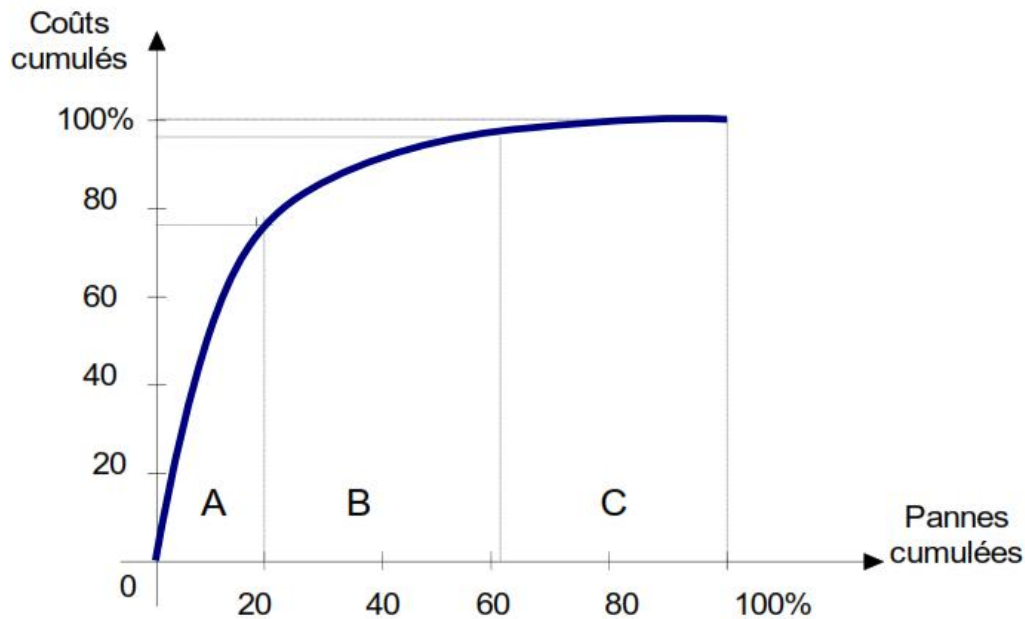
Zone A : Dans cette zone on constate que 20% des pannes représente 80% des coûts, c'est la zone de priorité.

Zone B : Dans cette zone, les 30% de pannes suivantes ne coûtent que 15% supplémentaires.

Zone C : Enfin, dans cette zone, les 50% de pannes restantes ne reviennent qu'à 5% des coûts.

Pour construire cette courbe, il convient d'utiliser le tableau ci-dessous :

N° de machine	Classement par ordre croissant de coûts C_i	Cumul des coûts	% des coûts	Nbre de pannes par machine	Cumuls des pannes	% de pannes cumulées
N_i		C_t	$\frac{C_i}{C_t}$	N_{pi}	N_{pt}	$\frac{N_{pi}}{N_{pt}}$



Avec :

C_i : Coût des pannes par machine, classé par ordre décroissant ;

ΣC_i : Somme de ces coûts ;

$\frac{C_i}{C_t}$: Calculé en pourcentage par rapport au coût total (C_t) ;

N_{pi} : Nombre de pannes attribuées à une machine ;

ΣN_{pi} : Somme de ces pannes ;

$\frac{N_{pi}}{N_{pt}}$: Calculé en pourcentage par rapport au nombre de pannes totales (N_{pt}).

Conclusions

Les résultats obtenus vont ensuite permettre de prendre les décisions en terme de maintenance pour chaque classe :

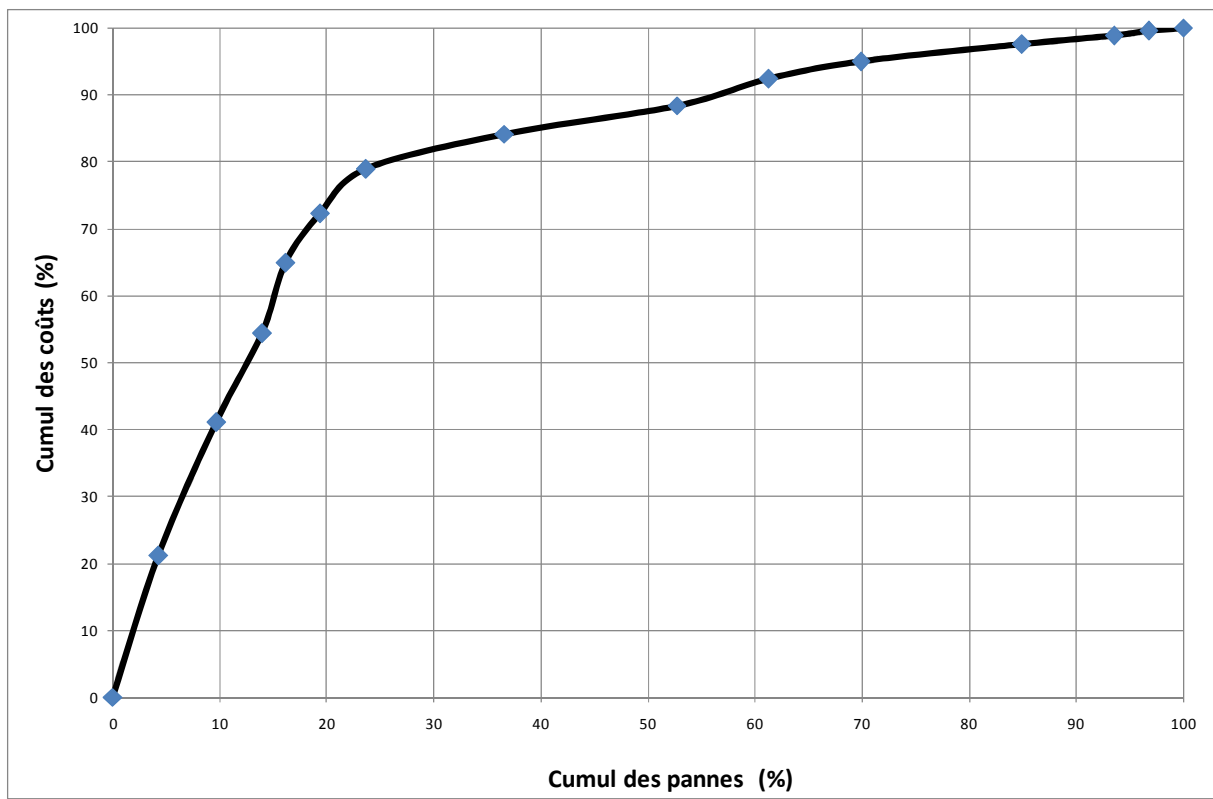
1. On se préoccupe davantage des éléments de la classe A (éléments prioritaires), on organisera une politique basée sur la maintenance préventive systématique et conditionnelle (vibrations, bruit, huile, ...etc.) et une surveillance accrue des éléments fragiles (clés). On améliore donc leur fiabilité et on prévoit des PDR avec une plus grande attention.
2. Pour les éléments de la classe B, on sera moins exigeant sur la politique et les méthodes de maintenance utilisées ;
3. Enfin, pour ceux de la classe C, on n'exige pas ou peu de maintenance préventive.

Exemple d'application

Une entreprise désire augmenter sa productivité en diminuant les pannes coûteuses, pour cela, elle demande au service maintenance de définir des priorités sur les améliorations à apporter. Ainsi, ont été recueillis les éléments suivants :

N° de machine ou sous-système	Nbre d'heures d'arrêt	Nbre de pannes
Machine n°1	100	4
Machine n°2	32	15
Machine n°3	50	4
Machine n°4	19	14
Machine n°5	4	3
Machine n°6	30	8
Machine n°7	40	12
Machine n°8	80	2
Machine n°9	55	3
Machine n°10	150	5
Machine n°11	160	4
Machine n°12	5	3
Machine n°13	10	8
Machine n°14	20	8

N° de machine	Classement des coûts (h)	Cumul des coûts (h)	% des coûts cumulés	Nbre de pannes	Cumul des pannes Npt	% des pannes cumulées
11	160	4	160	21,19	4	4,30
10	150	5	310	41,06	9	9,68
1	100	4	410	54,30	13	13,98
8	80	2	490	64,90	15	16,13
9	55	3	545	72,19	18	19,35
3	50	4	595	78,81	22	23,66
7	40	12	635	84,11	34	36,56
2	32	15	667	88,34	49	52,69
6	30	8	697	92,32	57	61,29
14	20	8	717	94,97	65	69,89
4	19	14	736	97,48	79	84,95
13	10	8	746	98,81	87	93,55
12	5	3	751	99,47	90	96,77
5	4	3	755	100,00	93	100,00
	755	93				



CHAPITRE V

Maintenance conditionnelle :

Une forme moderne de maintenance

V-1 : INTRODUCTION

En réalité les surcharges d'utilisation des matériels peuvent entraîner des défaillances précoces bien avant la date optimale prévue par l'échéancier, ceci constitue une sérieuse limite de la maintenance préventive systématique. C'est pourquoi pour les systèmes mécaniques où la sécurité est de grande importance, la maintenance conditionnelle est appliquée. Le principe de cette maintenance est d'intervenir lorsqu'un seuil prédéfini d'un indicateur est atteint. Bien que le problème de ce type soit la prédéfinition de ces seuils, plusieurs méthodes et techniques sont utilisées et constituent actuellement le pilier d'une stratégie de maintenance moderne.

V-2 : TECHNIQUES DE MAINTENANCE CONDITIONNELLE

Les mesures de température et de pression permettent un suivi et donc une surveillance permanente de l'état de l'installation. En les comparant à des seuils prédéfinis, elles permettent un verdict rapide sur l'état de fonctionnement entraînant l'arrêt de tout le système si besoin est. Le problème de cette technique est le fait qu'elle ne permet pas de savoir l'origine du problème, ni d'ailleurs un diagnostic précis. L'analyse des lubrifiants permet la mesure de la teneur en polluants de l'huile issus de la dégradation des pièces mécaniques (présence de métaux ferreux ou non ferreux) ou représentatifs d'un type de fonctionnement (résidus de combustibles, produits de combustion). C'est donc un bon indicateur de la présence d'une avarie, mais pas de sa(s) origine(s) car les particules, détectées le plus souvent par une spectrométrie, peuvent provenir de n'importe quelle pièce du système. Malgré cette limite, l'analyse d'huile reste très utilisée notamment dans les moteurs thermiques. Enfin l'analyse vibratoire est sans doute la technique la plus fiable car elle permet la détection et le diagnostic à la fois. Dans les conditions normales toutes les machines vibrent et ont donc une *signature vibratoire* particulière. Une première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle d'une panne, produit une modification dans cette signature. Par conséquent les images vibratoires des principaux défauts qui peuvent parvenir sur une machine ont été définies tout au long de ces dernières années. Ainsi est fondée cette approche

qui, profitant du magnifique développement des techniques de traitement de signal, constitue aujourd'hui le moyen le plus efficace permettant la détection, le diagnostic voire la prédiction.

V-3 : ANALYSE VIBRATOIRE EN MAINTENANCE PREDICTIVE

L'analyse vibratoire est certainement l'outil favori dans la maintenance prédictive des machines tournantes. Les techniques d'analyse vibratoires ont tellement évoluées qu'on est passé d'une détection tardive à la prédiction. Dans ce contexte l'ingénieur de maintenance pourra détecter le problème dès sa naissance, suivre son évolution dans le temps et choisir le moment opportun pour intervenir de manière à faire un compromis entre disponibilité de la main d'œuvre, des pièces de rechanges et les surcharges de la production, bref c'est le paradis sur terre.

V-3-1 : Outils d'analyse vibratoire

V-3-1-1 : Suivi par mesures globales : Ces mesures, réalisées généralement dans le cadre d'un suivi de routine, se résument à l'enregistrement de quelques grandeurs significatives de l'état de fonctionnement de la machine, le plus souvent : le déplacement, la vitesse ou l'accélération. Les valeurs mesurées sont ensuite comparées aux normes régissant le domaine des vibrations des machines afin de situer la « santé vibratoire » de la machine dans quatre zones : bonne, acceptable, pas acceptable, médiocre. Dans certaines installations à risque, un système de sécurité en ligne existe, il compare en temps réel les valeurs mesurées avec celles normales et peut si besoin est émettre un signal sonore de danger (seuil d'alarme), voire l'arrêt de toute l'installation (seuil d'arrêt). La figure (5.1) montre un exemple de ces seuils.

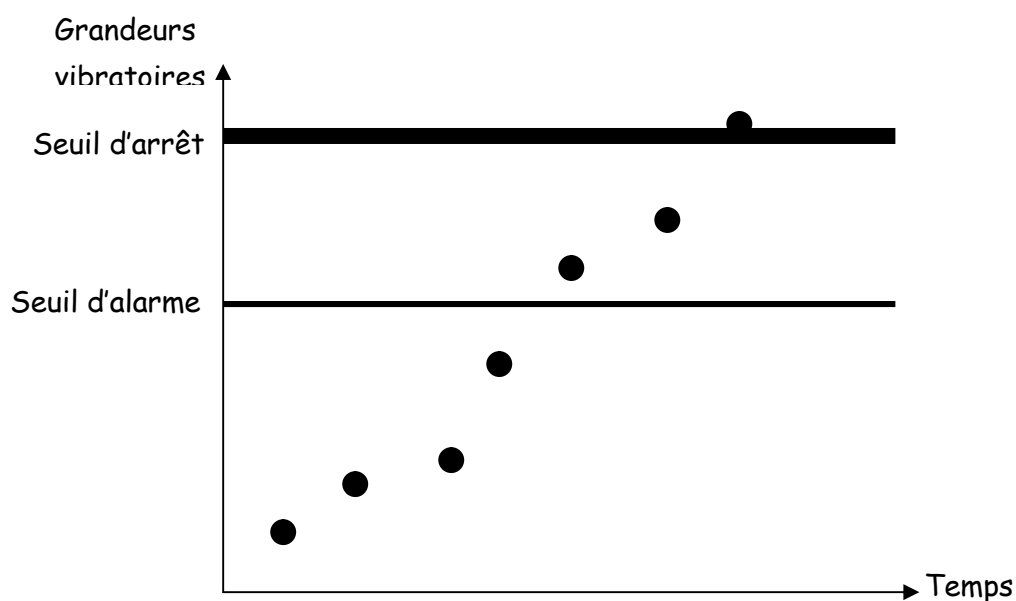


Figure V-1 : Evolution d'une grandeur vibratoire

D'autres indicateurs existent, n'étant peut être pas intégrés dans l'appareil de mesure, ils peuvent être calculés à partir du signal temporel. On peut citer à cet effet le RMS (Root Mean Squart), la valeur moyenne, l'énergie ou des indicateurs plus spécifiques à des défauts bien déterminés tels que les roulements et les engrenages, à l'image du facteur de crête et le kurtosis.

3.1.2. Analyse du signal vibratoire : Les mesures globales ne donnent aucune information sur l'origine du défaut. Pour permettre le diagnostic d'un éventuel défaut déjà détecté par une mesure globale on utilise une multitude d'outil de traitement de signaux qui permettent de mettre en évidence le(s) défaut(s). La technique la plus utilisées et l'analyse spectrale. C'est sans doute la technique la plus ancienne, ses bases mathématiques remontent au dix septième siècle suite aux travaux de Sir Isac Newton, le premier qui a introduit le mot *spectre* comme terme scientifique. Ce n'est qu'en 1822 que l'ingénieur Français Jean Baptiste Joseph Fourier introduisît sa célèbre *transformée* qui porte d'ailleurs toujours son nom. Plusieurs travaux ont succédé à ceux de Fourier, les plus marquants sont sûrement ceux des Américains Cooly et Tuky qui, en 1956, ont donné naissance à un algorithme permettant une transformée de Fourier rapide, fréquemment nommée *FFT (Fast Fourier Transform)*. Mathématiquement la transformée de Fourier permet de mettre en évidence les différentes périodicités contenues dans le signal original $s(t)$, il est donc décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires s'exprimant par :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

La transformée de Fourier *discrète* correspondante s'exprime par :

$$S(k) = \sum_{i=1}^{Ne} s(i) e^{-2\pi j \frac{ki}{Ne}} \quad (2)$$

Cette transformée est calculée à partir d'un signal de Ne points, le vecteur obtenu possède k points. La résolution du spectre est de k/Ne . Pour une fréquence d'échantillonnage donnée, plus le nombre de points du signal est grand, plus la résolution est fine.

Le principe de l'analyse spectrale en vibrations est le fait que chaque composante de la machine induit une fréquence caractéristique fonction de la vitesse de rotation. Chaque défaut possède sa propre composante fréquentielle qui le distingue d'un autre et permet sa détection facilement sur le spectre. Ainsi les signatures fréquentielles des différents défauts qui peuvent se manifester sur une machine tournante ont été définies. Interpréter un pic sur un spectre nécessite donc le maximum d'informations sur la cinématique ainsi que les différents organes constitutifs. Pour illustrer l'approche fréquentielle de la détection des défauts de roulements,

nous présentons sur la figure (5.2) le spectre d'un roulement défectueux. Le roulement, à une rangée de rouleaux cylindriques du type Nu 205, est monté sur un tour parallèle et tourne à 34,5 Hz. Sur le spectre apparaît, en plus des composantes fréquentielles du système (vitesse de rotation et ses harmoniques), un pic correspondant à environ 130 Hz qui n'est pas une harmonique de la vitesse de rotation mais une fréquence typique d'un défaut sur la bague extérieure. En réalité bien que nous allons nous limiter à cette technique, il faut savoir qu'il existe beaucoup d'autres.

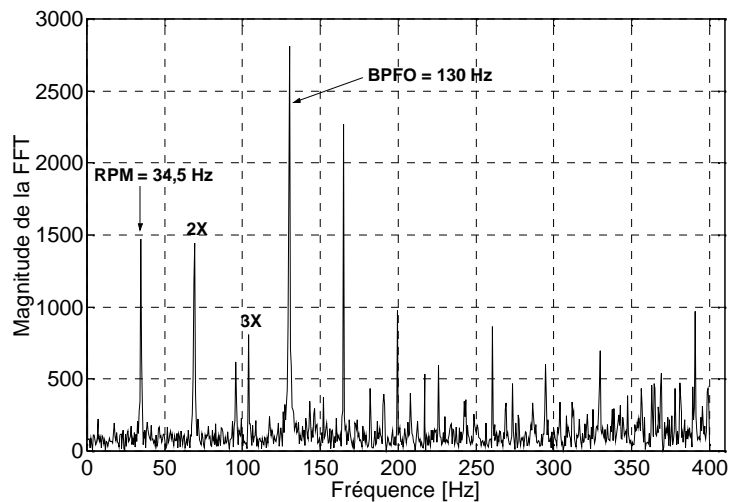


Figure V-2 : Spectre d'un roulement avec un défaut sur la bague extérieure. (Roulement Nu 205, $N=34,5$ Hz)

3.2. Images vibratoire des principaux défauts de machines tournantes

A titre d'exemple nous pouvons citer les principaux défauts successibles de toucher une machine tournante, à savoir :

1. Le balourd ;
2. Le mésalignement ;
3. Les défauts de roulements ;
4. Les défauts d'engrenages.

CHAPITRE VI

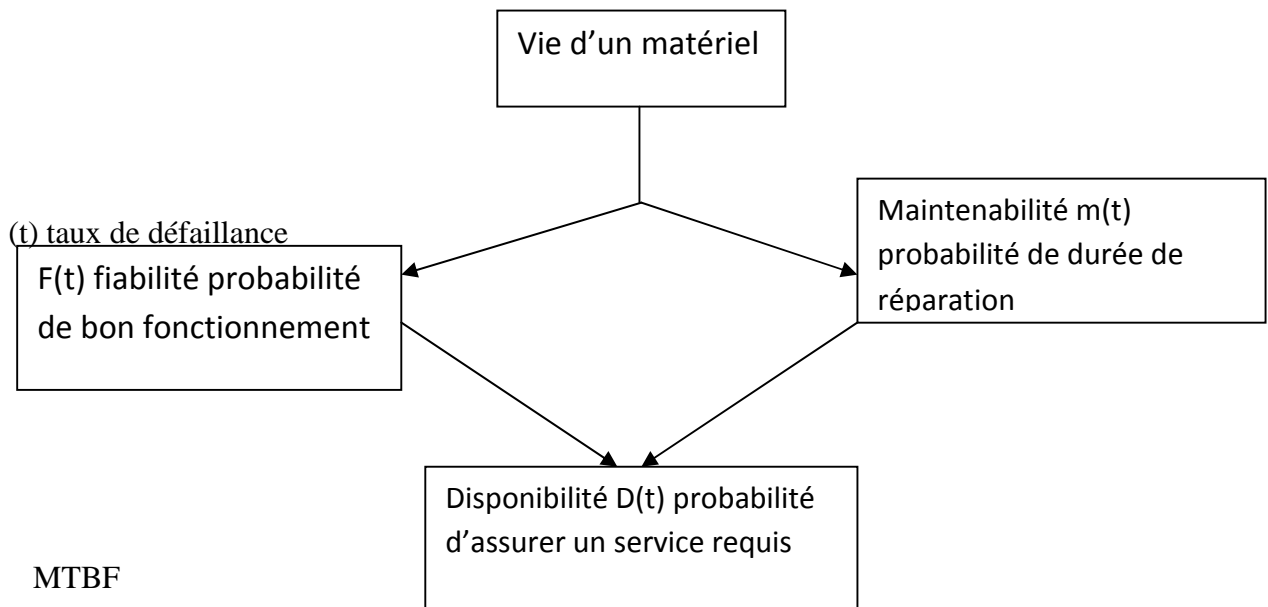
CONCEPT FMDS

(Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité et Sécurité)

VI-1 : GENERALITES

VI-1-1 Relation entre les différents paramètres de la FMD

(Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité)



MTBF

Moyenne des temps de bon

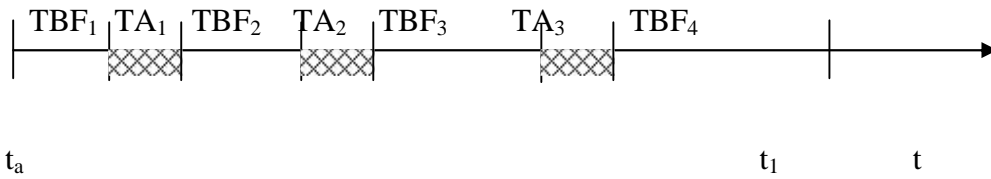
Fonctionnement.

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

Ces trois concepts sont envisagés soit de façon prévisionnelle. (Avant usage) soit de façon opérationnelle (pendant ou après usages).

Les trois fonctions précédentes notées respectivement F(t). m(t). D(t) sont des fonctions du temps. Il apparaît indispensable de préciser la notion du temps en maintenance par référence à la norme x60-015.

La vie d'une machine

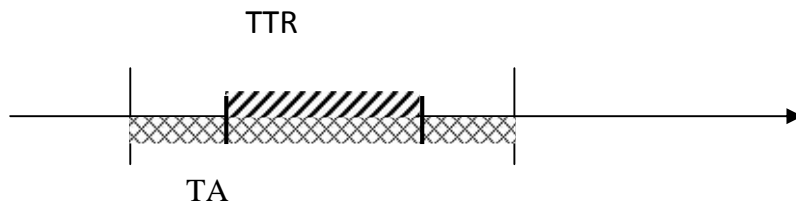


TBF : temps de bon fonctionnement

TA : temps d'arrêt

Ces durées peuvent être observées ou estimées.

Une partie (variable) des temps d'arrêt (TA) est constituée des TTR (temps techniques de réparation).



VI-1-2 : NOTIONS DE FIABILITE

VI-1-2-1 Généralités

La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à fonctionner sans incidents pendant un temps donné.

La non-fiabilité augmente les coûts d'après vente, application des garanties, frais judiciaires, etc. Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production en pratique, le coût total d'un produit prend en compte ces deux tendances.

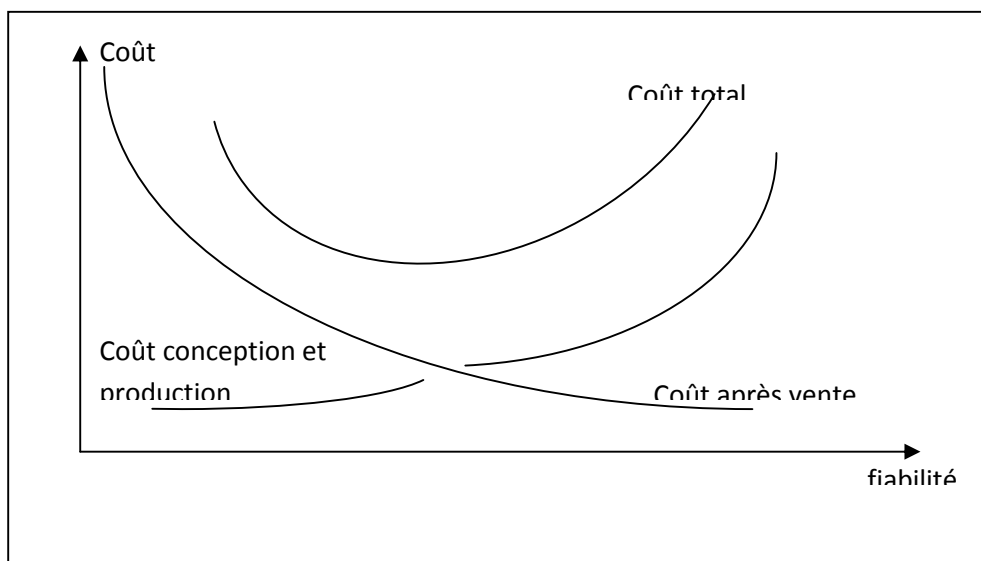


Figure VI-1 : Evolution des coûts en fonction de l'augmentation de la fiabilité

Remarques

- La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de chaque composant. Plus les composants sont nombreux ou complexes est plus la fiabilité est difficile à maîtriser.
- Une très haute qualité pour chaque composant n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage les interactions qui se produisant diminuent la capacité de l'ensemble.
- Une grande fiabilité sous certaines conditions n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions.

VI-1-2-2- Définitions

1- Fiabilité (F) : c'est la probabilité ($0 < F < 1$) qu'a un produit d'accomplir de manière satisfaisante une fonction requise sous des conditions données et pendant une période de temps donnée.

2-Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF)

Taux de défaillances ou taux d'avarie (λ) : il représente le pourcentage de défaillances pendant un temps donné.

$$\lambda = \frac{\text{Nombre total de défaillance pendant le service}}{\text{Durée totale de bon fonctionnement}}$$

Les unités sont : le nombre de défaillances par heure, le pourcentage de défaillance pour 1000 heures.

Remarque : la durée de bon fonctionnement est égal à la durée total en service moins la durée des défaillances.

Un produit ayant $10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$ pour 1000 heures (ou $10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$ par heure) présente un bon niveau commercial de fiabilité.

MTBF (Mean Time Between Failures) temps moyen entre défaillances.

$$\text{MTBF} = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement entre les } n \text{ défaillances}}{\text{Nombre des temps de bon fonctionnement}}$$

3-Allures typiques du taux de défaillance

Plusieurs fonctions ou modèles statistiques peuvent être utilisés pour représenter $\lambda(t)$ qui peut être constant, croissant ou décroissant au cours du temps t . Pour la majorité des produits industriels, les variations de $\lambda(t)$ au cours du temps (sortes de courbes en baignoire) présentent trois zones typiques.

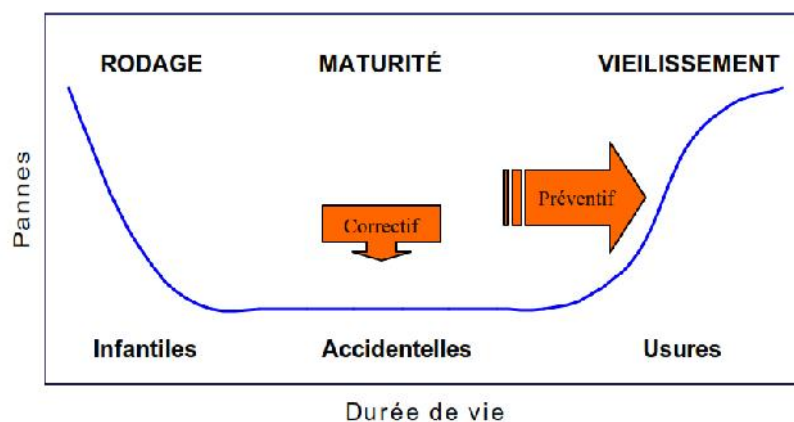
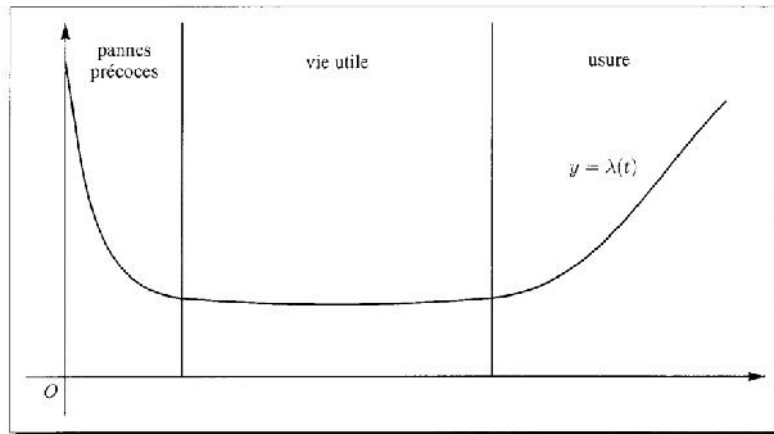


Figure VI-2 : Courbe en baignoire

Zone 1 (Début de la vie du produit : Pannes précoces) : les défaillances sont dites de jeunesse (composants neufs avec défauts de fabrication. $\lambda(t)$ décroît avec le temps.

Zone 2 (Maturité ou pleine activité du produit : Vie Utile) : $\lambda(t)$ est sensiblement constant. C'est le domaine des défaillances imprévisibles ou aléatoires.

Zone 3 (Vieillesse du produit : Usure) : les défaillances sont dues à l'âge ou à l'usure des composants. $\lambda(t)$ croît avec le temps du fait de la dégradation du matériel (usure mécaniques, fatigue, dérive des composants électroniques...). Les lois de fiabilité utilisables sont : loi

normale, Gamma, log normale ou Weibull. La durée de vie usuelle d'un produit s'arrête au début de la zone 3.

Remarque : Dans le cas des équipements mécaniques (t) la courbe est légèrement croissante dans la zone 2 par rapport à celle des équipements électroniques.

VI-1-3 Maintenabilité et maintenance

VI-1-3-1 Définitions

a) maintenance : cette fonction consiste à faire revenir (dépannage ou réparation) ou à maintenir (action préventive) tout dispositif dans son état de fonctionnement normal. Elle s'exprime au moyen de la maintenabilité.

b) maintenabilité : Elle traduit la probabilité de remettre un système en état de fonctionner, en un temps donné, dans des conditions données et en retrouvant la fiabilité initiale. Elle s'exprime à l'aide du **MTTR** Augmenter la maintenabilité d'un produit c'est le rendre le plus facilement réparable.

c).Indicateurs ou critères de maintenabilité (MTTR) et (μ)

MTTR (Mean Time To Repair) moyenne des temps de réparation

$$\text{MTTR} = \frac{\text{Somme des temps de Réparation}}{\text{Nombre de Réparation}} = \text{Temps moyen d'une réparation}$$

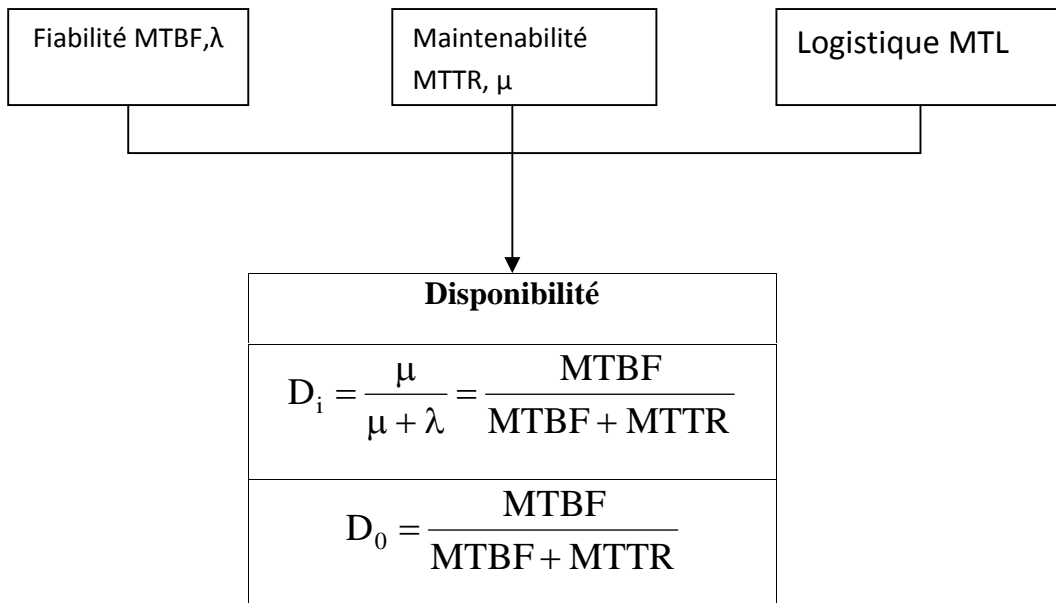
d).Taux de réparation (μ) :

Si μ est constant au cours du temps alors $\mu = 1/\text{MTTR}$

VI-1-4 : Disponibilité

Elle traduit l'aptitude d'un dispositif à être en état de fonctionner dans des conditions données. Elle met en évidence l'aptitude à la réparation d'un dispositif en mesurant l'efficacité de la maintenance.

Une haute disponibilité exige une excellente fiabilité (peu de défaillance), une bonne maintenabilité (une grande rapidité ou de remise en état) et une bonne logistique de maintenance (bonnes procédures d'entretien et de réparation, des moyens en personnel, des stocks de composants).



VI-1-4-1 : Définitions

a) Taux de disponibilité (D)

$$D = \frac{\text{Temps d'utilisation et temps d'attente}}{\text{Temps d'utilisation et temps d'attente} + \text{Temps de maintenance}}$$

b) Disponibilité intrinsèque D_i

Elle exclut la maintenance préventive, les délais logistiques (attentes fournitures...) et les délais administratifs.

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

c) Disponibilité opérationnelle D_0

Elle prend en compte les délais logistiques avec le MTL (Moyenne des Temps Logistiques de maintenance).

$$D_0 = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR + MTTL}$$

VI-2 : ETUDE DES MODELES DE FIABILITE

VI-2-1 : Définition et généralité :

D'après la norme AFNOR x 60 – 501 : « la fiabilité est la caractéristique d'un dispositif exprimée par la probabilité que ce dispositif accomplisse un fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période de temps déterminée ». Cette probabilité est généralement notée $R(t)$ (probabilité de bon fonctionnement), il symbole $R(t)$ vient du mot anglais, « Reliability ». On trouve généralement deux types de fiabilité celle estimée au début par le constructeur du bien appelée « fiabilité prévisionnelle » et celle réelle obtenue après une suite de défaillances potentielles appelée « fiabilité opérationnelle ».

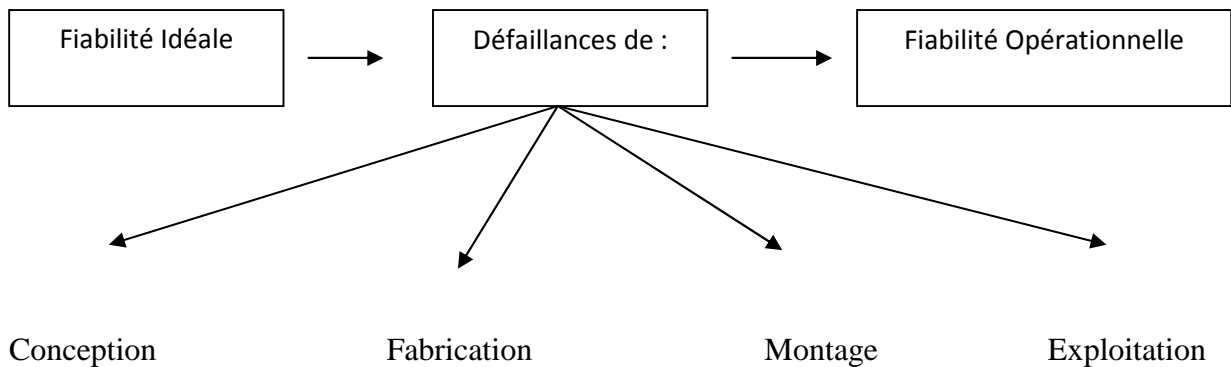


Figure VI-3 : Type de fiabilité

VI-2-2 : Fonction de défaillance : Fonction de fiabilité

On appelle fonction de défaillance la fonction F définie pour tout $t \geq 0$ par : $F(t) = P(T \leq t)$: Le nombre $F(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population ait une défaillance avant l'instant t :

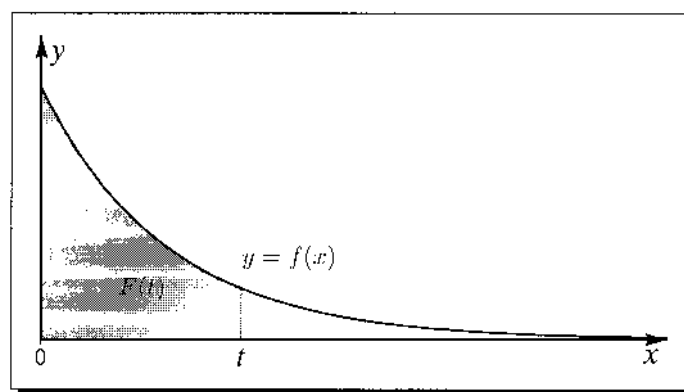


Figure VI-4 : Fonction de défaillance

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité R définie pour tout $t \geq 0$ par : $R(t) = 1 - F(t)$.

Le nombre $R(t)$ représente la probabilité qu'un dispositif choisis au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant t .

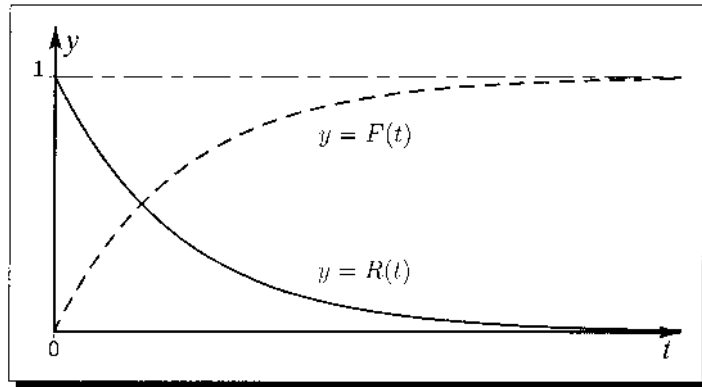


Figure VI-5 : Fonction de fiabilité

VI-2-3 : Expression mathématique de la fiabilité :

Un dispositif, mis en service pour la première fois, tombera inévitablement en panne à un instant T , non connu à priori, T est une variable aléatoire de fonction de répartition $F(t)$

* $F(t)$ est la probabilité pour que le dispositif soit en panne à l'instant t : $F(t_i) = \text{Prob}(T < t_i)$

* $R(t_i)$ est la probabilité de bon fonctionnement à l'instant t : $R(t_i) = \text{Prob}(T > t_i)$

Donc : $F(t_i) + R(t_i) = 1$ Ou : $\int_0^{t_i} F(t) dt + \int_0^{\infty} R(t) dt = 1$

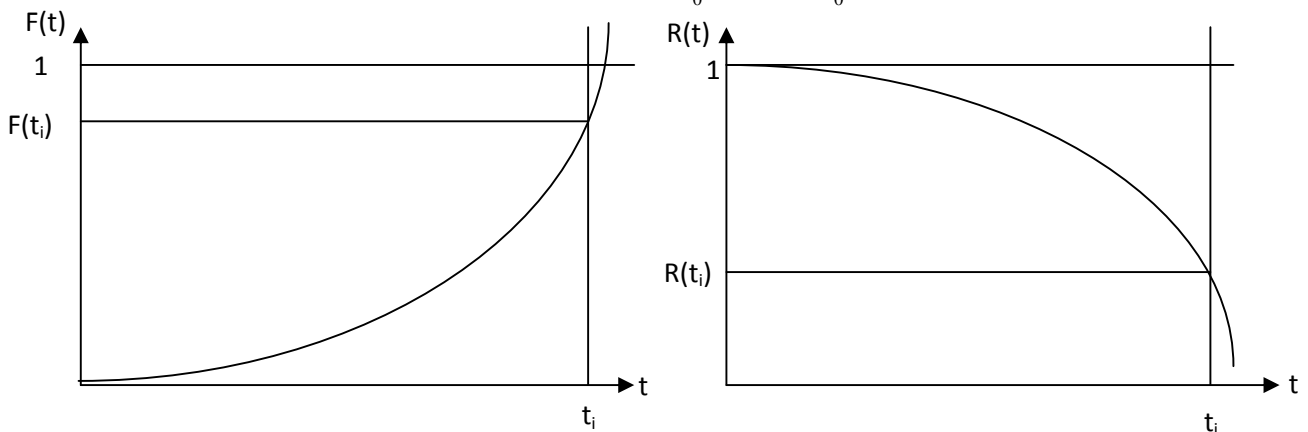


Figure : VI-6 : Schémas de $F(t)$ et de $R(t)$

Par hypothèse on dit que : $f(t)dt = \{f(t+dt) - F(t)\} / R(t)$

C'est la probabilité conditionnelle entre t et $(t + dt)$, notons que $\lambda(t)$ est aussi appelé fonction de hasard $h(t)$. ($F(t=0)=0$), on obtient :

$$\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{dF(t)}{1-F(t)} \Rightarrow -\int_0^t \lambda(t) dt = \int_0^t \frac{-dF(t)}{1-F(t)} = -\int_0^t \lambda(t) dt = [\ln(1-F(t))]_0^t = \ln[1-F(t)]$$

Donc $e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = 1 - F(t) \Rightarrow F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ Sachant que $R(t)=1-F(t)$

$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ et sachant que $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \Rightarrow f(t) = \lambda(t) \cdot e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$

Ces formules sont les lois fondamentales liées à la fiabilité, elles permettent de tracer expérimentalement la fiabilité d'un matériel en fonction du temps, ainsi que la détermination du taux de défaillance $\lambda(t)$.

La moyenne des temps de bon fonctionnement MTBF correspond à l'expérience mathématique de la variable aléatoire T : $MTBF=E(T)=\int_{-\infty}^{+\infty} t \cdot f(t) dt$

On peut démontrer par intégrale par partie que : $MTBF = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) dt$

Pour étudier la fiabilité, il est plus pratique d'utiliser un modèle et de vérifier ensuite sa validité par le test d'adéquation. Nous allons dans ce chapitre présenter deux modèles (bien qu'ils existe beaucoup d'autre), l'un utilisé dans le cas particulier où le taux de défaillance est constant appelé « Modèle exponentiel » le deuxième certainement le plus utilisé, peut s'adapter aux différents cas du taux de défaillance appelé « Modèle de Weibull ».

VI-2-4 : MODELES DE FIABILITE :

VI-2-4-1 : Modèle Exponentiel :

Il est appliqué dans le cas où le taux de défaillance est constant (période maturité) voir courbe en baignoire. On peut donc calculer l'allure de la fonction de fiabilité $R(t)$ par :

$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$ il vient avec λ constant : $R(t) = e^{-\lambda t}$

La densité de probabilité des défaillances $f(t)$ est $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1-R(t))}{dt} = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$

La fonction de réparation $F(t)$: $F(t) = 1 - e^{-\lambda t} = \int_0^t f(t) dt$ Le taux de défaillance est donnée

par : $f(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{constant}$: L'espérance mathématique : $E(t) = \text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$

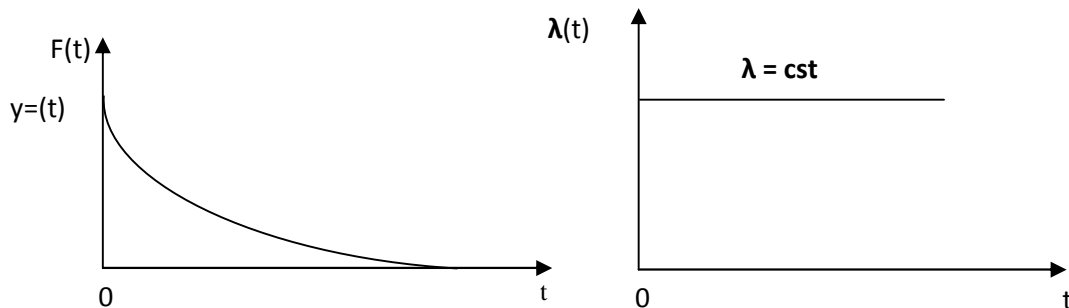


Figure VI-7 : Allure des courbes de $F(t)$ est de $f(t)$

VI-2-4-2 : Modèle de Weibull :

Présentation de la méthode :

Le modèle de Weibull est très souple car la loi est à trois paramètres (γ , λ , x) qui permettent d'ajuster correctement tous les résultats expérimentaux, contrairement au modèle exponentiel. La loi de Weibull couvre le cas où le taux de défaillance est variable et permet de s'ajuster aux périodes de jeunesse et aux différentes formes de vieillissement son utilisation implique des résultats d'essais sur échantillons ou la saisie des résultats en fonctionnement (TBF), ils permettent donc d'estimer la fonction de réparation $F(t)$ et de fiabilité $R(t)$.

La détermination des trois paramètres de la loi de Weibull permet à partir des tables (voir annexes), d'évaluer la MTBF et l'écart type par ailleurs la connaissance du paramètre de forme (γ) permet de déterminer la période de vie du matériel.

EXPRESSIONS MATHÉMATIQUES :

1- **Expression de la densité de probabilité $f(t)$:** elle est donnée par :

$$f(t) = \frac{\gamma}{y} \left(\frac{t-x}{y} \right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-x}{y} \right)^\gamma}$$

Où : γ : est appelé paramètre de forme $\gamma > 0$

y : est appelé paramètre d'échelle $y > 0$

x : est appelé paramètre de position $- \infty < x < +\infty$

2- **Expression de la fonction de répartition $F(t)$:**

Elle est donnée par : $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-x}{y} \right)^\gamma}$

3- Expression de la fiabilité R(t):

Elle est donnée par : $R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-x}{y}\right)^s}$

4- Expression du taux de défaillance (t) :

Elle est donnée par : $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{s \left(\frac{t-x}{y}\right)^{s-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-x}{y}\right)^s}}{e^{-\left(\frac{t-x}{y}\right)^s}} = \frac{s}{y} \left(\frac{t-x}{y}\right)^{s-1}$

Cas particulier : Dans le cas où $s = 1$ et $x = 0$, on retrouve la distribution exponentielle (constant), dans ce cas :

$$\lambda(t) = \frac{1}{y} = \frac{1}{MTBF}$$

5- Exploitation du coefficient de forme :

Si $s < 1 \Rightarrow \lambda(t)$ décroît avec le temps (période de jeunesse)

Si $s = 1 \Rightarrow \lambda(t)$ est constant (période de maturité)

Si $s > 1 \Rightarrow \lambda(t)$ qui croît avec le temps (période de vieillesse)

Dans le cas où $s > 1$, on peut procéder à une analyse plus fine.

Si $1,5 < s < 2,5 \Rightarrow$ il s'agit du phénomène d'usure, de corrosion ...etc.

6- L'espérance mathématique et l'écart type

$$E(t) = x + yr \left(1 + \frac{1}{s}\right)$$

γ : Symbole d'une fonction eulérienne :

Donc : $MTBF = A +$

L'écart type : $\sigma = \sqrt{v(t)}$ où $v(t)$ est donnée par : $V(t) = y^2 \left[\gamma \left(1 + \frac{2}{s}\right) - y^2 \left[\gamma \left(1 + \frac{1}{s}\right) \right]^2 \right]$

Où $V(t) = y^2 \left[\gamma \left(1 + \frac{2}{s}\right) - \left[\gamma \left(1 + \frac{1}{s}\right) \right]^2 \right]$ donc : $y = \sqrt{\gamma \left(1 + \frac{2}{s}\right) - \left[\gamma \left(1 + \frac{1}{s}\right) \right]^2}$

En posant le terme $\gamma \left(1 + \frac{2}{s}\right) - \left[\gamma \left(1 + \frac{1}{s}\right) \right]^2 = B$, on obtient : $\sigma = y \cdot B$

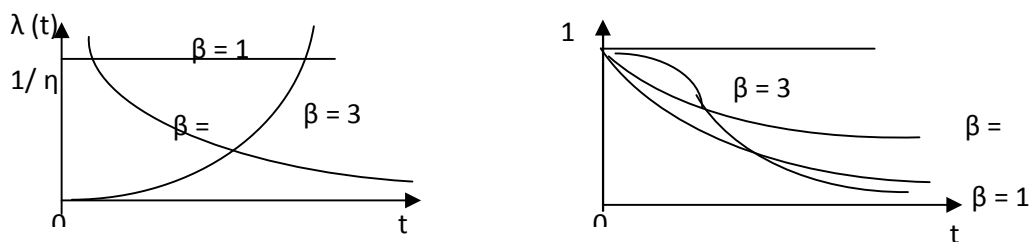


Figure VI-8 : Allures de $\lambda(t)$ et de $R(t)$ pour différentes valeurs de β

Estimation des paramètres de loi de Weibull :

Un des problème essentiel de la loi de Weibull est l'estimation des paramètres (, ,), pour cela nous disposons de deux méthodes ; la première est entièrement par calcul, qui fait intervenir des équations différentielles difficiles à résoudre, de ce fait, elle est peut utilisée. L'autre méthode est graphique, elle utilise un papier à échelle fonctionnelle dit papier de Weibull ou graphique d'Allen plait. Cette méthode est la plus utilisée.

1. Papier d'Allen plait : Figures VI-8 et VI-9
2. Papier d'Allen plait comporte 4 axes :

Sur A, nous trouvons t ;

Sur B, nous trouvons F(t) en %

Sur a, nous trouvons Ln(t)

Sur b, nous trouvons 1 / (1-F(t))

Il porte également un référentiel secondaire (X.Y) qui permet de déterminer par : $Y = .X$
 On les expressions de F(i) seront données plus loin dans le chapitre

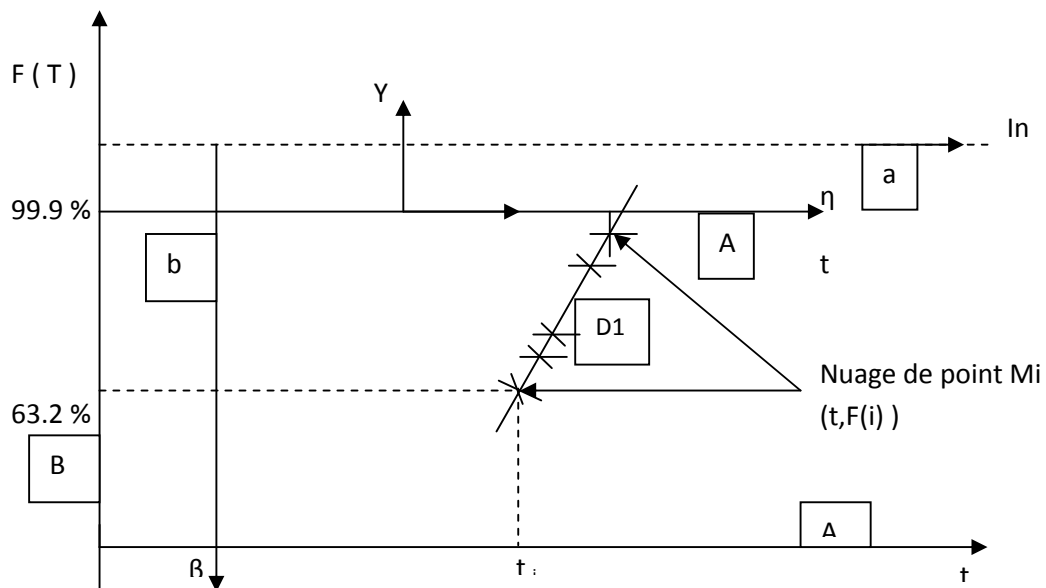


Figure VI-9 : Présentation du papier d'Allen plait

Cas où $\gamma = 0$

1. Calcul de

Dans ce cas le nuage des points forme une droite D1

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \text{Donc : } \text{Ln}\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \text{Ln}\left(e^{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}\right) \text{ puis :}$$

$$\text{LnLn}\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \text{Ln}\left(\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right) = \beta \text{Ln}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right) = \beta \text{Ln}(t-\gamma) - \beta \text{Ln}\eta$$

On pose $X = \text{Ln}(t - \eta)$ et $Y = \text{LnLn}\frac{1}{1-F(t)}$ Donc $C = -\beta \text{Ln}\eta$

On obtient : $Y = \beta X + C$ (relation linéaire entre X et Y) dont β est la pente de la droite D1 obtenue par les points $M_i (t_i, F(i))$.

Au point $t = \eta$, qui est l'origine du repère (X,Y), $\text{Ln}\eta = 0$ donc $C = 0$. Donc β est la pente de la droite D2/D1 passant par l'origine de (X,Y) et qui coupe l'axe b en un point égale à $\frac{1}{\beta}$.

2- Intérêt de détermination de β :

Il permet d'obtenir la forme de la courbe du taux de défaillance aux différentes périodes de la vie d'un matériel, on peut l'utiliser comme un outil de diagnostic des modes de défaillance. β est un nombre sans dimension.

3- Calcul de η :

C'est le paramètre d'échelle, il se lit à l'intersection de la droite tracée et de la ligne 63,2 %. En effet, pour l'ordonnée $Y=0$ on a $F(t) = 63,2\%$.

$$Y = \text{LnLn}\frac{1}{1-f(t)} = 0, \text{ ce qui donne :}$$

$$\text{Ln}\frac{1}{1-F(t)} = 1(\text{Ln} = 0) \text{ et } 1 - F(t) = e^{-1}, \text{ donc : } F(t) = 1 - e^{-1} = 1 - 0,368 = 0,632$$

(63,2 %.) D'où pour $Y=0$, $\text{Ln}\eta = X$ ce qui donne $X = \eta$. Comme $X = \text{Ln}(t - \eta)$ on a $t = \eta$. η est la valeur lue directement sur le graphique d'Allen plait pour l'ordonnée 63,2 %. Car l'échelle des abscisses est en $\text{Ln} t$. L'unité de η est l'unité de temps.

La figure Suivante montre un exemple de détermination de β et de η dans le cas où $\gamma = 0$

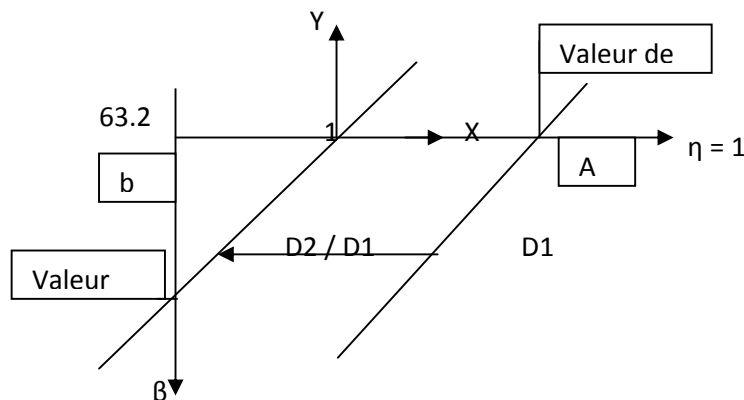
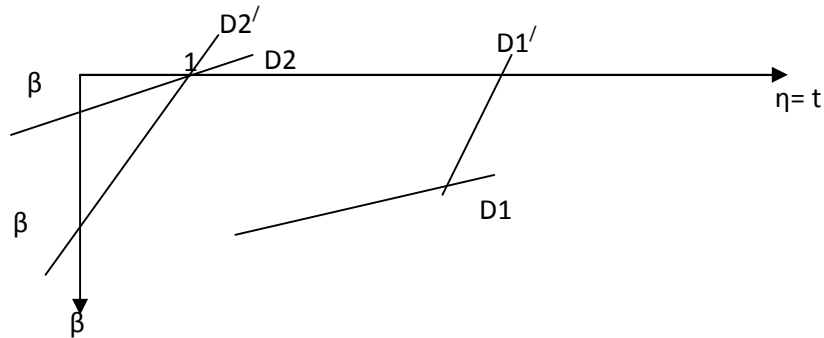


Figure VI-10: Détermination des paramètres β et η sur la papier d'Allen plait dans le cas où $\gamma = 0$

Un cas particulier de la loi de Weibull est celui où le nuage de points met en évidence deux droites, c'est à dire deux populations correspondant a deux modes de défaillances successifs et différents.

Exemple :



Dans cet exemple, on déduit qu'il s'agit de défaillances de jeunesse dues à un mauvais montage ($\beta = 0.4$), suivie de défaillances dues à l'usure ($\beta = 3.5$).

Cas où $\beta < 0$:

Si le nuage de point fait apparaître une courbure telle que l'ajustement par une droite ne peut se faire qu'avec un mauvais indice de corrélation.

Une première méthode consiste à translater tous les point en ajoutant ou retranchant à leurs $\ln(t)$ une même valeur (qui sera x) jusqu'à ce que le nuage de points translaté soit ajustable par une droite D1.

Le redressement de la courbe peut se faire par tâtonnement par translation de plusieurs point de valeur

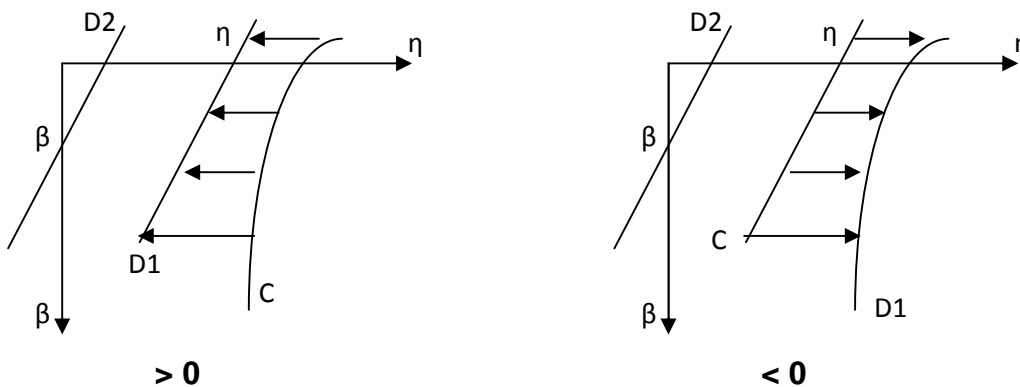
Croissantes, jusqu'au redressement jugé.

Il peut se faire suivant la formule suivante :

$$x = \frac{t_2^2 - t_1 \cdot t_3}{2t_2 - t_1 - t_3}$$

Mode opératoire :

Nous prenons trois points a_1, a_2 et a_3 de la courbe C1 telle que $(a_1, a_2) = (a_2, a_3) = \Delta$
 Les points a_1, a_2 et a_3 sont espacés mais pas extrême, nous lisons les valeurs a_1, a_2 et a_3 sur l'axe des t (axe A) il reste à appliquer la formule, ci-dessus pour trouver x pour tracer la droite D1. L'intersection de D1 avec l'axe de $\ln(t)$ donne la valeur de $\ln(t_0)$.



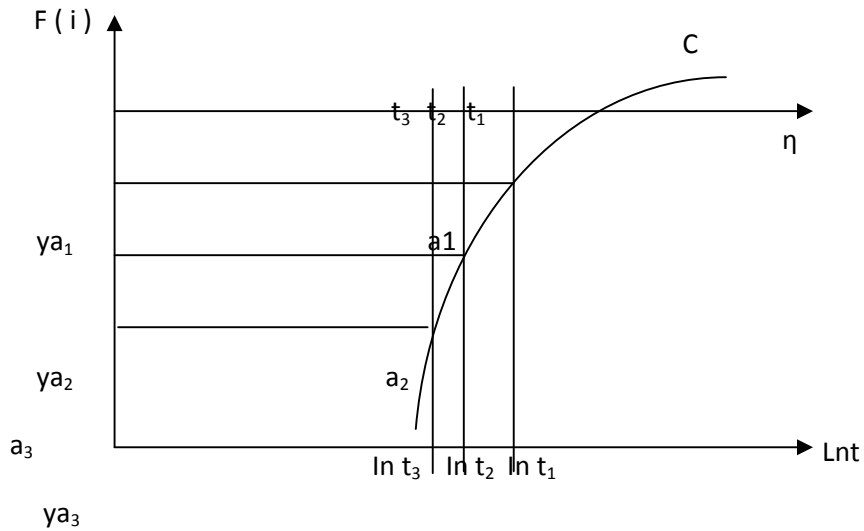


Figure VI-11 : Méthode des trois points

Détermination des F(i)

- **Cas des grands échantillons :**

Soit N le nombre d'échantillons (TBF_i) Si N > 50

$$F(i) = \frac{i}{N}$$

- **Cas des petits échantillons :**

Si $50 > N > 20$ nous utiliserons alors la formule d'approximation des **rangs moyens** :

$$F(i) = \frac{i}{N + 1}$$

Si $20 > N$ nous utiliserons la formule d'approximation des **rangs médians**

$$F(i) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}$$

VI-2-5 : NOTION DE NIVEAU DE CONFIANCE POUR F(t) :

Après la détermination de la fonction de défaillance F(t), nous effectuerons une probabilité à 90%, c'est-à-dire 90 chances sur 100 que F(t) soit comprise dans un intervalle [] Appelé **intervalle de confiance**. La probabilité 0.90 est le **niveau de confiance**.

Les tables 1 représentent les limites à 5 % et à 95 % dans le cas de l'approximation par les rangs médians.

TEST DE KOLMOGOROV SMIRNOV :

Le principe de ce test est de comparer la fonction réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique. On mesure point par point l'écart entre ces deux fonctions par le modèle :

$$D_{ni} = |f(t) - F(t)|$$

Telle que $F(t)$ est la fonction de répartition réelle, elle peut être obtenue par la méthode des rangs moyens : $F(t) = \frac{i}{n+1}$

$F(t)$ est la fonction théorique.

Le test se résume à vérifier si : $D_n > D_{n,\alpha}$: Tels que : $D_n = \max |f(t) - F(t)|$, et $D_{n,\alpha}$ est donnée par la table de Kolmogorov-Smirnov (voir annexe).

Donc pour accepter le modèle et par suite les valeurs de la fonction $F(t)$ il suffit que ces valeurs doivent se trouver dans une zone autour de $F(t)$ (Voir figure) de telle façon que.

$F(t) - D_{n,\alpha} \leq F(t) \leq F(t) + D_{n,\alpha}$

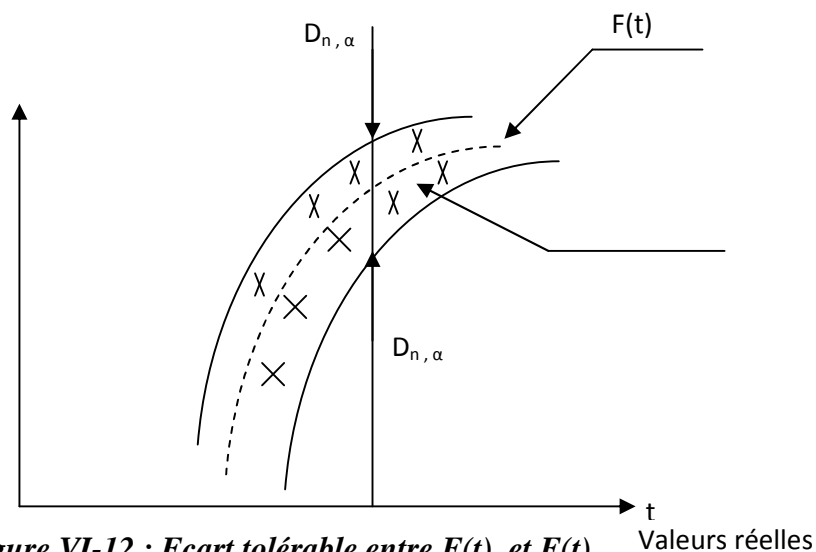


Figure VI-12 : Ecart tolérable entre $F(t)$ et $f(t)$

DUREE DE VIE ASSOCIEE A UN SEUIL DE FIABILITE

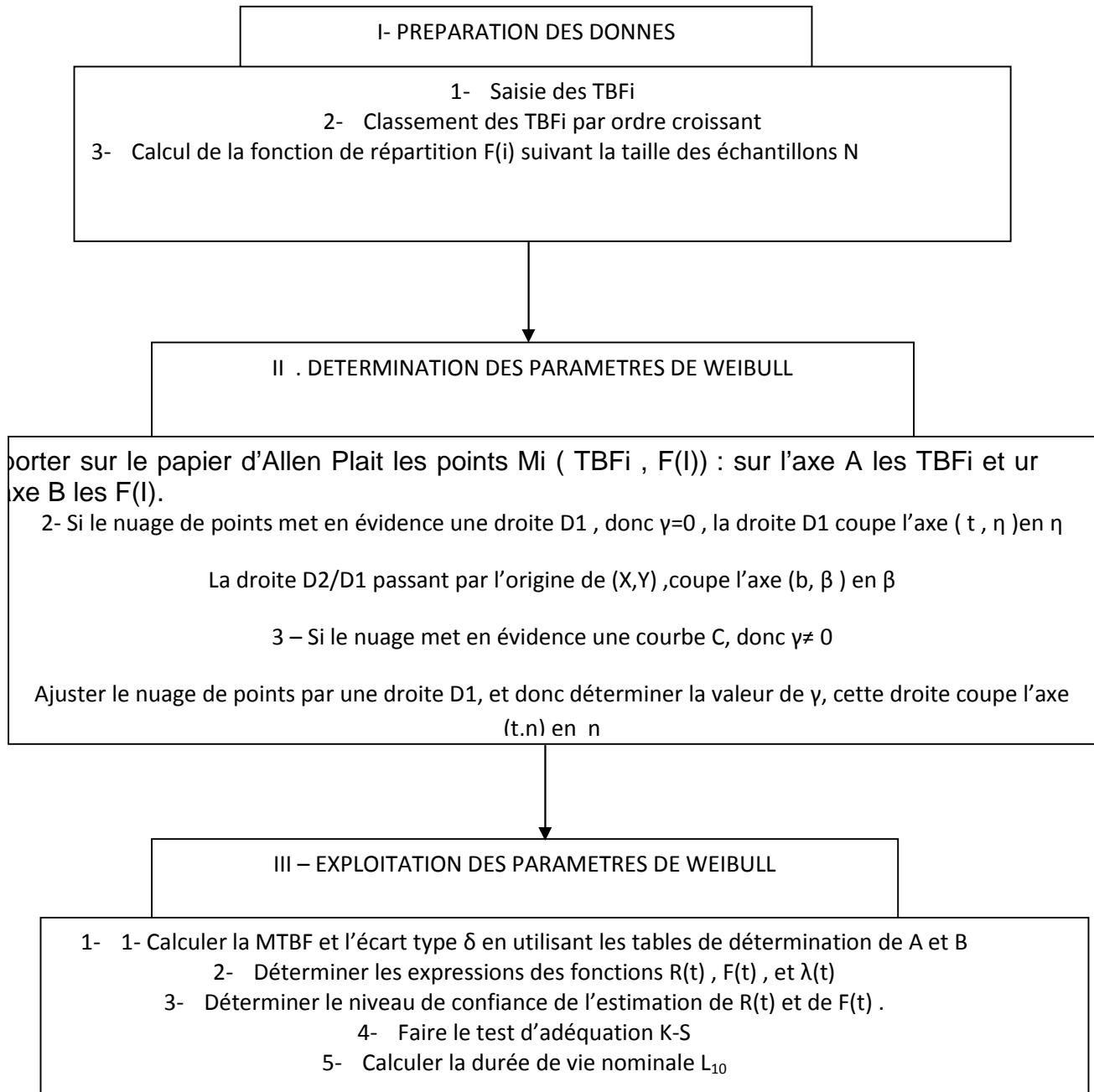
On peut, pour n'importe quel instant t , déterminer la fonction de fiabilité $R(t)$ réciproquement. On peut à partir d'un seuil de fiabilité $R(t)$, de trouver l'instant t correspondant.

Nous savons que : $R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ Donc $\text{Ln}R(t) = -\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta$

$$\text{Ln} \frac{1}{R(t)} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta \quad \left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)} \right]^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right) \quad \text{D'où } t = \lambda + \eta \left[\text{Ln} \frac{1}{R(t)} \right]^{\frac{1}{\beta}}$$

En particulier, pour $R(t) = 0,9$: $L_{10} = \lambda + \eta [0.105]^{\frac{1}{\beta}}$

RESUME DE LA METHODE DE WEIBULL



VI-3 : NOTION DE MAINTENABILITE :

VI-3-1 : Définition de la maintenabilité :

D'après la norme AFNORX 60 =010 : dans des conditions données d'utilisation, la maintenabilité est l'aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accompli sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

La maintenabilité est donc une caractéristique précisant la facilité et la rapidité avec lesquelles un dispositif peut être remis en état. Cette définition, par analogie avec celle de la fiabilité comprend la notion de probabilité, on peut écrire donc $M(t) = \text{Prob}(t < T)$, c'est la probabilité qu'un système en arrêt au temps $t = 0$ soit en service au temps T .

VI-3-2 : Notion de temps technique de réparation : (TTR) :

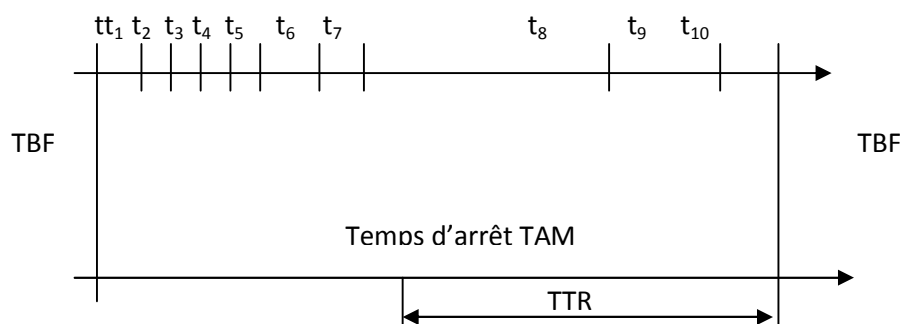
Les temps techniques de réparation TTR sont, comme les TBF, saisis à partir de l'historique des pannes ils comprennent les :

- 1/ temps de diagnostic et de vérification de la réalité de la panne (fausse alerte).
- 2/ temps de localisation de la panne.
- 3/ temps de démontage et remontage.
- 4/ temps de réparation ou de changement de l'élément.
- 5/ temps de contrôle et d'essais de remise en route.

Les temps annexes de maintenance (la différence entre le temps d'arrêt et les TTR) sont des temps perdus qui ne font pas partie de l'opération de maintenance corrective mais constitués généralement des :

- 1/ temps d'arrivée sur place des dépanneurs.
- 2/ temps logistique.
- 3/ temps de préparation.
- 4/ temps administratifs.....ect.

Ces temps sont détaillés dans le schéma de la figure suivante.



Décomposition du temps d'arrêt

t_0 : date de panne

t_0-t_1 : détection de la panne.

t_1 : alarme.

t_2 : réception de la demande de travail par le service maintenance.

t_2-t_3 : transmission de la DT.

t_3 : prise en charge par les techniciens de maintenance.

t_3-t_4 : vérification de l'existence de la défaillance, test, diagnostic, expertises.

t_4-t_5 : préparation de l'intervention.

t_5-t_6 : attente d'approvisionnement.

- t_6 : lancement de l'intervention.
- $t_6. t_7$: nettoyage, démontage de l'ensemble concerné.
- $t_7. t_8$: durée d'intervention (dépannage, réparation on ou changement d'organe).
- $t_8. t_9$: remontage.
- $t_9. t_{10}$: durée d'essais, de réglage et de test de bon fonctionnement.
- t_{10} : date de mise en route.

VI-3-3 : Expressions mathématique de la maintenabilité :

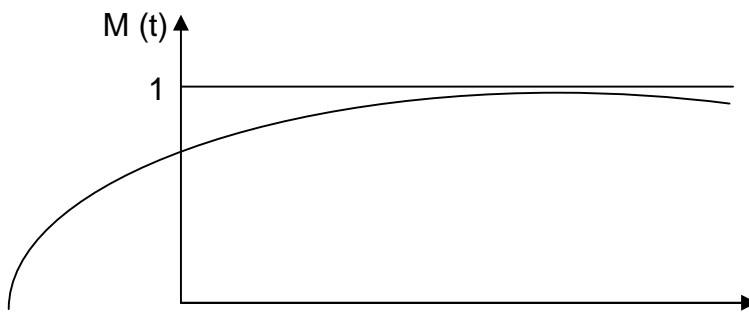
Comme pour l'étude de fiabilité, la variable ici est le temps (TTR) la densité de probabilité est notée $g(t)$. La fonction de réparation, par analogie avec celle de fiabilité est donnée par : $M(t) = \int g(t)dt$

Le taux de réparation est noté $u(t)$ est égale à : $\sim(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$

Alors : $g(t) = \sim(t).e^{-\int \sim(t)dt}$

Par hypothèse. Il est sou sent considère comme constant, les expressions précédentes reviennent alors à : $M(t) = 1 - e^{-\sim t}$ $MTTR = \frac{1}{\sim}$ $g(t) = \sim . e^{-\sim t}$

La MTTR est donnée par : $MTTR = \frac{\sum TTR}{n}$, $\sim = \frac{1}{MTTR}$.



Allure de la maintenabilité M (t) .

VI-3-4 : Analogie entre la fiabilité et la maintenabilité :

Le tableau ci-dessous illustre l'analogie entre les deux notion fiabilité et maintenabilité.

Fiabilité	Maintenabilité
Variable aléatoire (TBF)	Variable aléatoire (TTR)
Densité de probabilité $f(t)$	Densité de probabilité $g(t)$
Fonction de réparation $F(t) = \int f(t)dt$	Fonction de réparation $M(t) = \int g(t)dt$
Taux de défaillance $\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)}$	Taux de réparation $\sim(t) = \frac{g(t)}{1 - M(t)}$
$MTBF = \int t.f(t)dt = \int (1 - F(t))dt$	$MTTR = \int t.g(t)dt = \int (1 - M(t))dt$
$f(t) = \lambda(t)e^{-\int \lambda(t)dt}$	$g(t) = \sim(t).e^{-\int \sim(t)dt}$

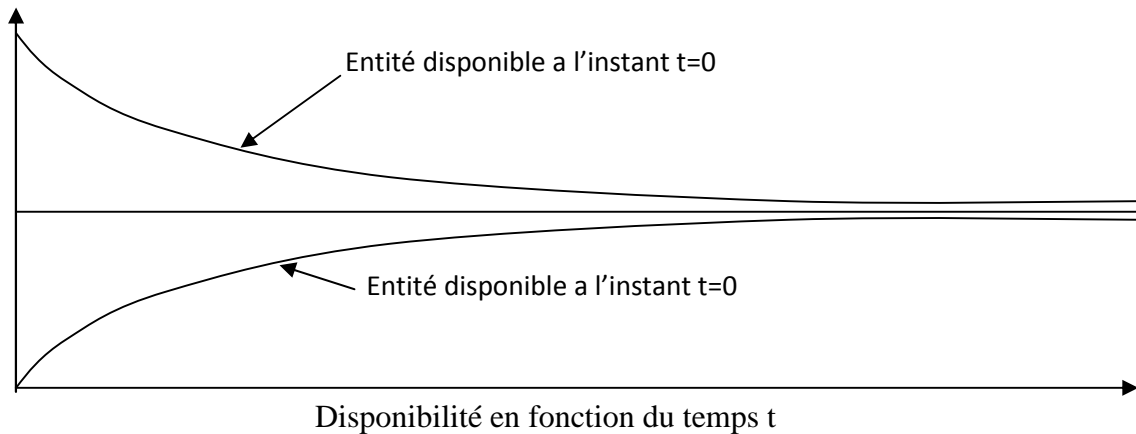
VI-4 : NOTION DE DISPONIBILITE

Définition

La norme NF X 60-500 définit la disponibilité comme l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée.

La probabilité associée $A(t)$ à l'instant t est aussi appelée disponibilité et s'exprime par $A(t) = \text{PCE non défaillante à l'instant } t$.

La disponibilité $A(t)$ est une grandeur instantanée, l'entité peut donc avoir subi une panne puis une réparation avant l'instant t , contrairement à la fiabilité qui est une grandeur mesurée sur une durée (intervalle $[0, t]$). La confusion entre la disponibilité et la fiabilité est au fait que ces deux concepts sont équivalents quand le système est non réparable.



Comme la fiabilité, plusieurs types de disponibilité peuvent être utilisés :

- la disponibilité instantanée prévisionnelle (définie ci-dessous) ;
- la disponibilité moyenne sur un intervalle de temps donné $[t_1, t_2]$ de la disponibilité prévisionnelle, mesurée en phase opérationnelle par la durée de fonctionnement effectif divisée par la durée donnée.

La figure ait apparaître que la disponibilité dépend de quatre facteurs essentiels :

- 1- La fiabilité.
- 2- La maintenabilité.
- 3- La logistique.
- 4- Les politiques de maintenance.

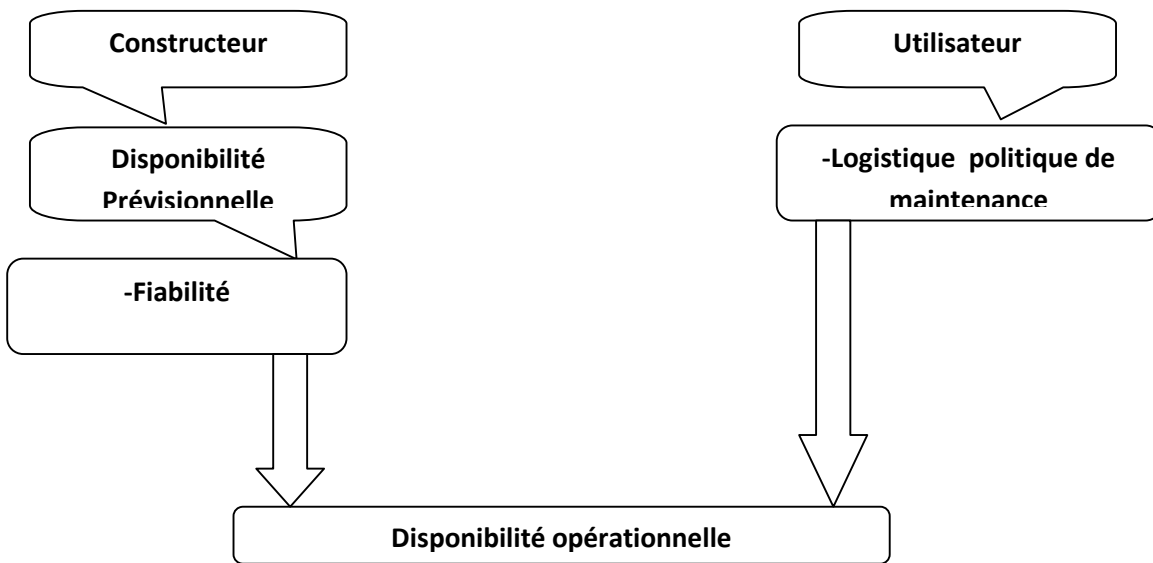


Figure VI-12: types de disponibilité

Modèles de disponibilité opérationnelle :

Dans ces modèles, on va prendre en compte plusieurs facteurs et par la suite définir plusieurs modèles de disponibilité.

Modèle 1 :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$
 C'est le modèle de base. MTBF : moyenne des temps de bon fonctionnement.

Modèle 2 :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTA}$$
 Prise en compte du temps d'arrêt (TAM), MTA : Moyenne des temps d'arrêt.

Modèle 3 :

$$D = \frac{MTBM}{MTBM + MMT}$$
 Prise en compte des actions préventives (MTBM) et de la moyenne des actions préventives et correctives (MMT)

Modèle 4 :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MMR + MTL}$$
 Prise en compte de la moyenne de temps logistique MTL.

Modèle 5 :

$D = \frac{MTBF + RT}{MTBF + RT + MDT}$ Prise en compte du temps moyen dans lequel les système est en attente mais apte a fonctionner (Read time) et de $MDT=MMT+MTL+MTA$

MTA : Temps administratif. MDT :Moyenne des demandes de travail

Modèle 6 :

$D = \frac{TCBF}{TCBF + TA}$ prise en compte des cumules un bon fonctionnement.

TCBF : temps cumule de bon fonctionnement et d'arrêt. TA : temps d'attente.

VI-5 : AMELIORATION DE LA DISPONIBILITE :

Pour améliorer la disponibilité on va s'orienter vers les facteurs intervenants à savoir:

* **Fiabilité** : Améliorer la fiabilité par des études appropriées, une bonne maintenance préventive, surveillance accrue, modifications techniques

* **Maintenabilité** : améliorer la maintenabilité par l'utilisation des systèmes d'aide au diagnostic, arbre de défaillance, disponibilité des accessoires et des pièces de rechange (P.D.R), formation spécialisée du personnel, ...etc.

* **Logistique** : Utilisation des logiciels gestion de maintenances GMAD et des stocks , une bonne organisation interne OT (Ordre de Travail) , DT(Demande de Travail) , B T (Bons de Travail), équipes spécialisées,...etc. .

VI-6 : ETUDE DE LA FIABILITE D'UNE TURBINE A VAPEUR

Sur le papier d'Allen Plait nous avons mis les points M_i ayant abscisses les TBF fois 100 et pour ordonnées la fonction de répartition $f(i)$ calculée par la méthode des rangs

moyens ($N=30$) par la formule $f(i) = \frac{i}{N+1}$

Ordre	TBF	F(t)	$F(t) = \frac{i}{N+1}$	$D = f(t) - F(t) $
01	7	0,0023	3,2	3,19
02	7	0,0023	6,4	6,39
03	10	0,0035	9,6	9,59
04	14	0,0053	12,6	12,89
05	18	0,0071	16,1	16,09
06	18	0,0071	19,3	19,26
07	19	0,0076	22,5	22,49
08	19	0,0076	25,8	25,79
09	22	0,0091	29	28,99
10	23	0,0096	32,2	32,19
11	31	0,013	35,4	35,38
12	42	0,019	38,7	38,68
13	46	0,021	41,9	41,87
14	67	0,034	45,1	45,06
15	95	0,051	48,3	48,24
16	107	0,059	51,6	51,54
17	112	0,062	54,8	54,73
18	112	0,062	58	57,93
19	132	0,075	61,2	61,12
20	143	0,082	64,5	64,41
21	209	0,12	67,7	67,58
22	236	0,14	70,9	70,76
23	306	0,19	74,1	73,91
24	334	0,21	77,4	77,19
25	465	0,29	80,6	80,31
26	487	0,31	83,8	83,49
27	574	0,42	87	86,58
28	745	0,52	90,3	89,78
29	954	0,56	93,5	92,94
30	1560	0,78	96,7	95,92

Détermination des paramètres de la loi de Weibull :

Nous traçons les points N_i (TBF_i , $F(i)$) nous obtenons ainsi la droite D_1 . Puisque le nuage de points met en évidence une droite donc $\gamma = 0$.

La droite D_1 coupe l'axe de (T,y) en $y = 11 \cdot 100 = 1100h$

La droite $D_2 // D_1$ coupe l'axe en (b, s) en $s = 1,2$

En tenant compte de la valeur de $\beta=1.2$ nous confirmons l'état de la turbine ainsi que son age, la turbine est en période de vieillesse ce qui nécessite une maintenance corrective avec une maintenance préventive beaucoup plus conditionnelle.

Validation du modèle (K.SMIRNOV)

Le principe de test est de comparer la fonction réelle de répartition des défaillances à la fonction de répartition théorique. On mesure point par point l'écart entre les deux fonctions par le modèle : $D_n = |f(t) - F(t)|$

Le test se résume à vérifier si : $D_n > D_{n,x}$ tels que :

$D_n = \max|f(t) - F(t)|$ et $D_{n,x}$ est donnée par la table de KOLMOGOROV SMIRNOV (voir annexe) donnée pour accepter le modèle et par la suite les valeurs de la fonction $F(t)$.

Calcul de MTBF :

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 1100 \\ s = 1.2 \end{cases} \begin{cases} A = 0,94 \\ B = 0,78 \end{cases}$$

$$MTBF = u + A \cdot y$$

$$MTBF = 0 + (0,94 \cdot 1100) = 1034h$$

$$\text{L'équation de } R(t) = e^{-\left(\frac{t}{y}\right)^s} \quad R(t) = e^{-\left(\frac{1034}{1100}\right)^{1,2}} \quad R(t) = 39,51 \%$$

$$\text{L'équation de taux de défaillance : } \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad \lambda(t) = \frac{1,2}{1100} \left(\frac{1034}{1100}\right)^{1,2-1} \quad \lambda(t) = 0,0010774$$

$$\text{L'équation de la fonction de réparation} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad F(t) = 60,48\%$$

$$\text{L'équation de } f(t) = \frac{s}{y} \left(\frac{t}{y}\right)^{s-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{y}\right)^s} ; f(t) = \frac{1,2}{1100} \left(\frac{1034}{1100}\right)^{1,2-1} \cdot e^{-\left(\frac{1034}{1100}\right)^{1,2}} ; f(t) = 0,000425$$

Références bibliographiques

- [1] ALAIN BOULENGER, Aide-mémoire Maintenance conditionnelle, Dunod, 2008
- [2] ALAIN BOULENGER, Analyse vibratoire en maintenance : Surveillance et diagnostic des machines, 2003
- [3] ARNOUX H., *Environnement, Sécurité et Maintenance*, Techniques de l'Ingénieur, traité de maintenance, MT 9 555.
- [4] AUBERVILLE J.M., *Maintenance industrielle, de l'entretien de base à l'optimisation de la sûreté*. Editions Ellipses 2004.
- [5] BOULENGER A., *Maintenance conditionnelle par analyse vibratoire*. Techniques de l'Ingénieur, traité de maintenance, MT 9 285.
- [6] F. CASTELLAZZI, *Ménotech : maintenance industrielle*. 1998
- [7] FRANÇOIS MONCHY, *La fonction maintenance : Formation à la gestion de la maintenance industrielle*, 1990
- [8] FRANÇOIS MONCHY, *Maintenance : Méthodes et organisations*, 2010
- [9] FRANÇOIS MONCHY., *La fonction maintenance*, Editions Masson 1995.
- [10] JEAN HENG, *Pratique De La Maintenance Préventive : Mécanique ,Pneumatique ,Hydraulique électricité ,froid*, 2002
- [11] JEAN-PIERRE VERNIER, *Aide-mémoire Maintenance et GMAO : Tableaux de bord, organisation et procédures*, 2010
- [12] LARBI.BENALI, *La Maintenance Industrielle : 5ème année d'ingénieurs en génie mécanique*, 2006.
- [13] LYONNET P., *La maintenance, mathématiques et méthodes*, Editions Techniques et documentation, Lavoisier 1992.
- [14] MECHIN B., *Introduction aux méthodes de maintenance*, Techniques de l'Ingénieur, traité de maintenance, MT 9 280.
- [15] MOREL J., *Surveillance vibratoire et maintenance prédictive*, Techniques de l'Ingénieur, Traité Mesures et Contrôle, R 6 100.
- [16] NASRI, M'BAREK, *Maintenance des installations industrielles : concepts, mises en œuvre et applications*, Ellipses, 2014
- [17] REILLER, ALAIN, *Analyse et maintenance des automatismes industriels : génie industriel : cours, exercices et sujets d'examen résolus*, Ellipses 1999
- [18] S. BENSAADA, *La maintenance industrielle*. 2002
- [19] THOMAS, MARC, *Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines*, presses de l'université du Québec (PUQ), 2012

NB : Les références citées sont disponibles à la bibliothèque universitaire de Guelma