

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



MAINTENANCE DES SYSTEMES INDUSTRIELS.

« Cours pour Masters, Génie Industriel ».

Dr. Messaoud BENZOUAI.

Maitre de conférences 'B'

Faculté de technologie

Département Génie Industriel

Contact : m.benzouai@univ-batna2.dz

Table des matières

Objectifs et plan du cours	01
Chapitre I : Concepts de la maintenance industrielle	02
1. Définitions	02
2. Objectifs généraux de la maintenance	02
3. Les secteurs d'activité à maintenance	02
4. Structure d'un système de production	04
5. Les différentes formes de la maintenance	04
6. Autres activités de la maintenance	09
7. Choix d'une politique de maintenance	09
8. Les cinq niveaux de la maintenance	10
9. Autres approches de la maintenance	10
9.1. La télémaintenance	10
9.2. La TPM et le TRS	11
Chapitre II : Analyse des temps de maintenance et concepts FMD	14
1. Analyse des temps de maintenance	14
1.1. Temps relatifs aux états d'un système	14
1.2. Classification des temps de maintenance	14
1.3. Les temps d'activité humaine en maintenance	15
1.4. Nature des durées d'intervention en maintenance	15
1.5. Opération de la maintenance corrective	17
1.6. Estimation du temps alloué à une intervention	17
1. Concepts FMD	18
2.1. Fiabilité	18
2.2. Maintenabilité	19
2.3. Disponibilité	19
2.4. Facteur de fiabilité, maintenabilité et disponibilité	20
2.5. Temps caractéristiques de la sureté de fonctionnement	22
Chapitre III : Comportement du matériel en service / étude des défaillances	23
1. Définitions et vocabulaires de défaillance	23
2. Classification et types de défaillances	23

3. Le taux de défaillance	24
3.1. Définition du taux de défaillance	24
3.2. Durée de vie d'un équipement / courbe en baignoire	24
3.3. Calcul du taux moyen de défaillance	26
4. Exploitation des relevés des défaillances / Analyses par l'outil Pareto	27
4.1. Relevés des défaillances	27
4.2. Analyse qualitative / Expertise	28
4.3. Analyse quantitative et amélioration des concepts FMD	28
4.3.1. Loi de Pareto	29
4.3.2. Méthodologie	30
4.4. Application	32
Chapitre IV : Analyse de la fiabilité par les lois de probabilités	34
1. Introduction.....	34
2. Notions de variable aléatoire, densité de probabilité et fonction de répartition	34
2.1. Variable aléatoire.....	34
2.2. Densité de probabilité et fonction de répartition	34
2.3. Les fonctions fiabilité et de défiabilité	35
2.4. Détermination expérimentale de la fiabilité	35
2.5. Le taux de défaillance instantané	36
2.6. Analyse de la fiabilité à partir des lois de probabilités	37
2.6.1. Analyse par la loi normale	37
2.6.2. Analyse par la loi exponentielle	38
2.6.3. Analyse par la loi de Weibull	39
2.6.4. Application	45
Annexes	47
Bibliographie	49

Objectif du cours.

L'existence d'un service de maintenance a pour raison le maintien des équipements en bon état de fonctionnement et aussi la diminution des pannes. En effet, ces dernières coûtent cher, elles occasionnent :

- des couts d'intervention, de réparation ;
- des coûts de non qualité du produit ;
- des coûts indirects, tels que : frais fixes non couverts (salaires,...etc), des dépenses supplémentaires pour pallier aux pertes de production et surtout la perte de l'image de marque de l'entreprise, d'où perte de clients.

De ce fait il faut tout mettre en œuvre pour éviter la panne et agir rapidement lorsqu'elle survient afin d'augmenter la disponibilité du matériel.

Ce cours destiné pour les Masters en Génie industriel vise cet objectif.

Plan du cours.

Afin d'aboutir à notre objectif, ce cours est structuré en quatre chapitres, dont chacun d'eux vise un objectif partiel :

- Le premier chapitre est consacré à l'approche maintenance, en donnant à l'étudiant les concepts de base pouvant lui permettre d'appréhender d'une manière facile les enseignements donnés aux chapitres suivants. Durant ce chapitre l'étudiant saura distinguer la différence entre les différentes activités et taches de la maintenance. La maintenance améliorative, la télémaintenance et la méthode TPM avec son taux de rendement synthétique sont abordés. Il est à noter que selon le programme thématique, ce cours, ne vise pas l'aspect gestion de la maintenance industriel.
- Le deuxième chapitre traite les temps relatifs à la maintenance, et essentiellement les temps d'activité humaine en maintenance, en donnant à l'étudiant la manière d'agir pour déterminer un temps d'intervention en maintenance corrective. Aussi les concepts de base de la fiabilité, maintenabilité et disponibilité, sont donnés tout en donnant à l'étudiant l'aspect pragmatique de ces concepts.
- Dans le troisième chapitre, le comportement du matériel est analysé à partir de la connaissance de la défaillance en premier lieu et de son traitement en second lieu et ce à partir de l'exploitation des données recueillies sur site (Historique machine) en initiant l'étudier à travers un exemple applicatif ' comment agir pour améliorer la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.
- Le quatrième chapitre donne à l'étudiant un autre aspect d'analyse en se servant toujours des données historique à travers les modèles fiabilistes. Dans ce chapitre une large place est donnée au modèle exponentielle et surtout au modèle de Weibull.

Chapitre I : CONCEPTS DE DE LA MAINTENANCE INDUSTRIELLE.

1. Définitions.

Définition 1 : / (AFNOR (NF X 60-010).

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

- **Maintenir**: Notion de «prévention» d'un système en fonctionnement.
- **Rétablir** : Notion de «correction» consécutive à une perte de fonction.
- **État spécifié ou service déterminé** : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux,

NB : Entretenir, c'est subir alors que maintenir, c'est prévoir et anticiper

Définition 2 : / (AFNOR, 2001),

Ensemble de toutes les actions **techniques, administratives** et de **management** durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le **maintenir** ou à le **rétablir** dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

2. Objectifs généraux de la maintenance.

Les services de maintenance doivent définir leurs objectifs qui doivent correspondre à la politique de leur entreprise. Il s'agit des aspects : Financier, Technique et Humain.

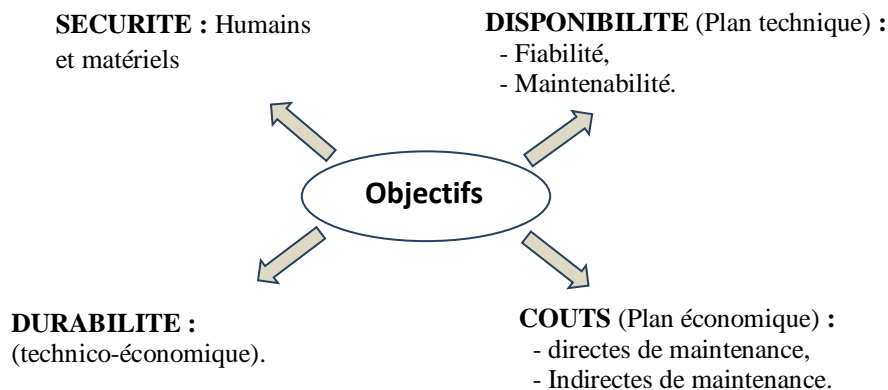


Figure 1.1 : Principaux objectifs de la maintenance

Exemples d'objectifs : Assurer la production prévue (quantité) ; Assurer la qualité du produit fabriqué (qualité) ; Respecter les délais (temps) ; Rechercher les coûts optimaux (rentabilité) ; Préserver l'environnement (environnement) ; Assurer la sécurité des employés

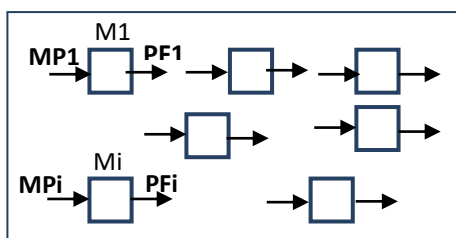
3. Les secteurs d'activités à maintenance :

L'importance de la maintenance diffère selon le secteur d'activité :

La maintenance sera inévitable et lourde dans les secteurs où la sécurité est capitale. Inversement, les industries manufacturières à faible valeur ajoutée pourront se satisfaire d'un entretien traditionnel et limité.

- Importance fondamentale : nucléaire, pétrochimie, chimie, transports (ferroviaire, aérien, etc.)
- Importance indispensable : entreprises à forte valeur ajoutée, de procès, construction automobile.
- Importance secondaire : entreprises sans production de série, équipements variés

a. Entreprises manufacturières :



Spécificités :

- Machines indépendantes
- Grand parc machines,
- Produits finis nombreux.

Objectifs :



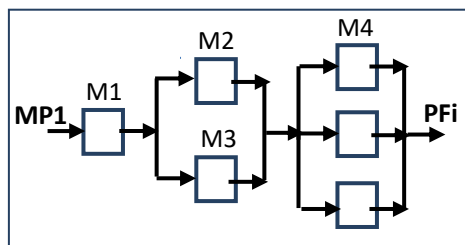
Disponibilité

(Mi : Machine i ; MPi : Matière première i ; PFi : Produit fini i)

NB : Le service maintenance subi une faible pression.

Exemple d'industrie : Chaudronnerie (production de vis, écrou, rondelle, tige ...etc).

b. Entreprises à procès :



Spécificités :

- Machines dépendantes
- Postes série / parallèle,
- Peu de produits Finis.

Objectifs :

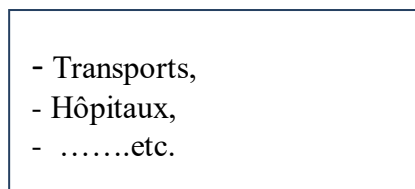


- **Disponibilité.**
- **Coûts**

NB : Le service maintenance subi une forte pression.

Exemple d'industrie : Laiterie, papeterie, raffinerie, produit pharmaceutique,etc.

c. Entreprises de service :



Spécificités :

- Equipements indépendants,
- Equipements diversifiés

Objectifs :



- **Sécurité.**
- **Disponibilité.**

NB : Le service maintenance subi une très forte pression.

4. Structure d'un système de production.

La structure générale de tout système (machine) de production se résume par la figure 1.2 suivante :

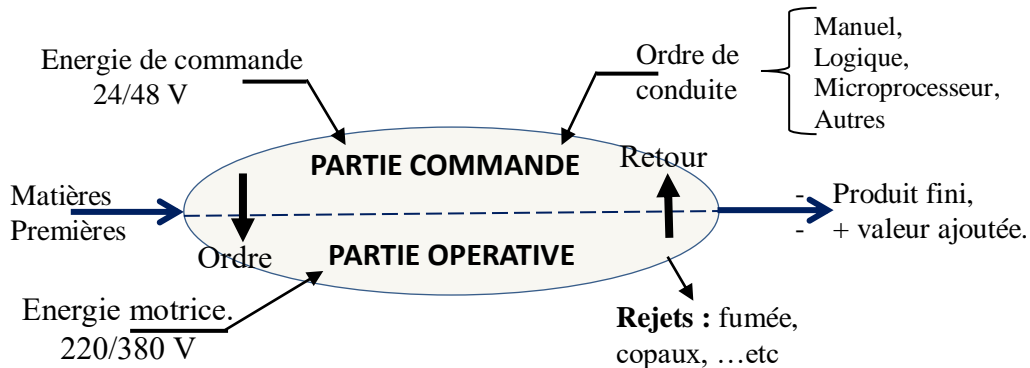


Figure 1.2 : Structure générale d'un système de production

5. Les différentes formes de maintenance,

Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : maintenir et rétablir. Le premier fait référence à une action préventive (voir figure 1.4). Le deuxième fait référence à l'aspect correctif.

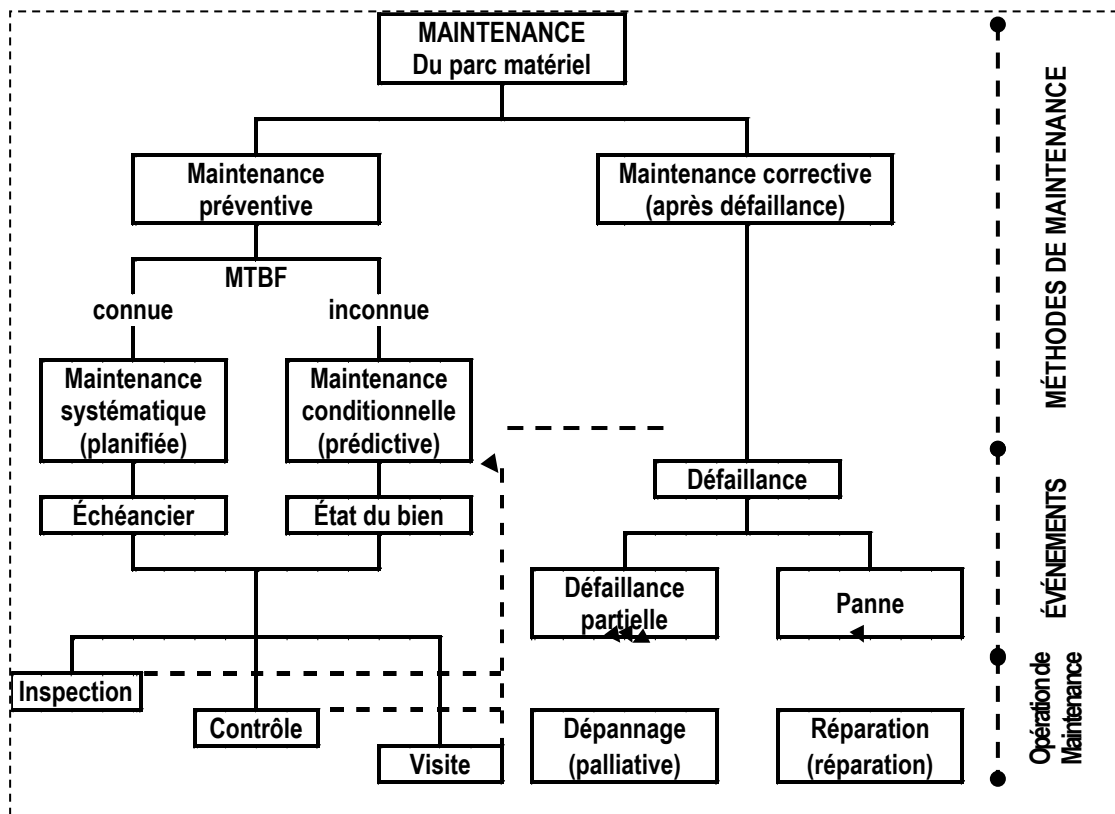


Figure 1.4 : Types de maintenance

Nous présentons ci-après les définitions et caractéristiques de chaque type de maintenance :

5.1. Maintenance corrective : (Extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319 : avril 2001)

a) Définition : Exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise.

C'est une maintenance qui intervienne après défaillance (Total ou Partiel), caractérisée par :

- Caractère aléatoire;
- Nécessite des ressources humaine compétentes;
- Nécessite la disponibilité de ressources matérielles (pièces de rechange et outillage).

b) Les principales opérations de maintenance corrective :

La maintenance corrective débouche sur deux types d'intervention. Le premier type est à caractère provisoire, ce qui caractérise la maintenance palliative (dépannage). Le deuxième type est à caractère définitif, ce qui caractérise la maintenance curative (réparation).

- **Le dépannage :** Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.
- **La réparation :** Actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne.

c) Graphe caractéristique « Maintenance corrective »

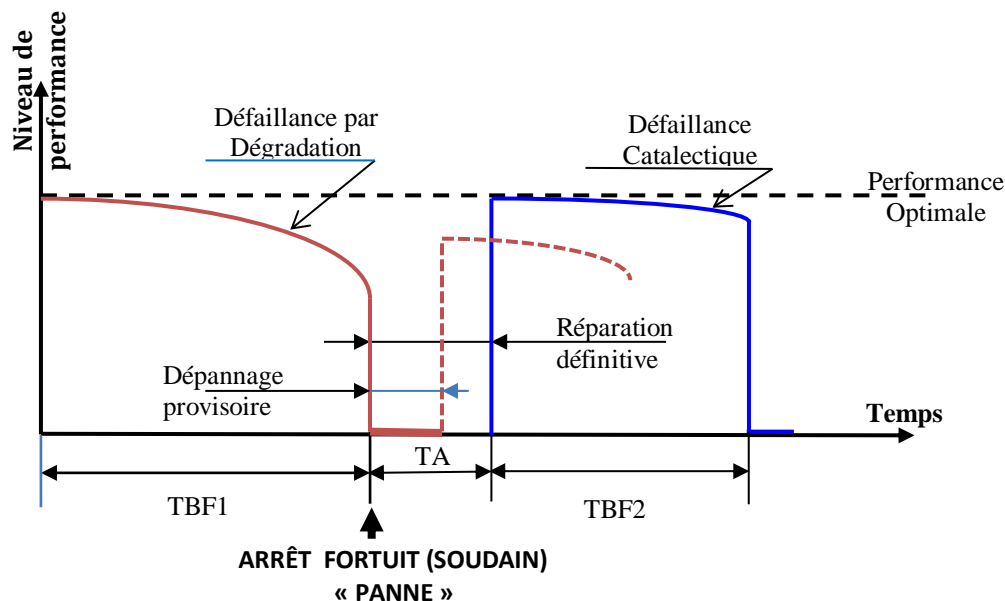


Figure 1.5 : Principe de la maintenance corrective.

5.2. Maintenance Préventive : (Extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319)

Définition : Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. »

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

Remarque : trop de maintenance préventive n'est souvent pas économiquement viable. Chaque industrie doit trouver le niveau à atteindre. En moyenne le cout de maintenance préventive ne doit pas dépasser les 25 à 35 % du cout total de la maintenance (coûts directs et indirects).

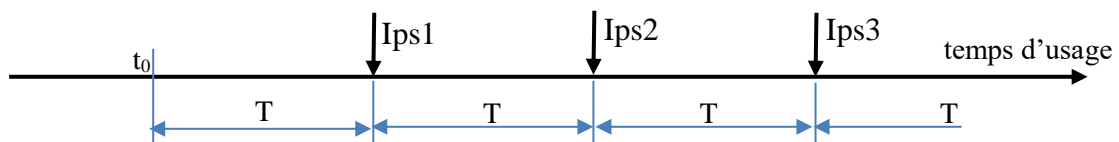
On distingue deux types de maintenance préventive :

Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier (période fixe) établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

5.2.1. Maintenance préventive systématique.

a) Définition : Exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (EN 13306 : avril 2001).

La figure ci-après montre que l'intervention préventive systématique (Ipsi) s'effectue après un échéancier (période) d'intervention prédéterminée (T) constante)



Les interventions (Ips) consistent le plus souvent en un changement de composant, mais peuvent consister également en visites préventives, réglages, étalonnages, etc.

b). Graphe caractéristique « Maintenance préventive systématique ».

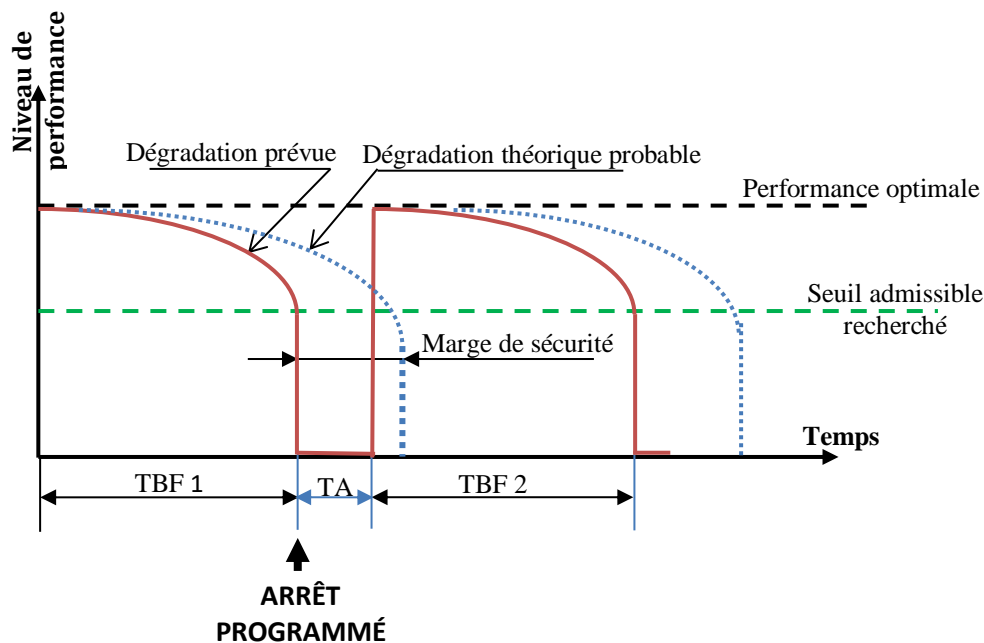


Figure 1.7 : Principe de la maintenance préventive systématique.

c). Activités de la maintenance préventive systématique.

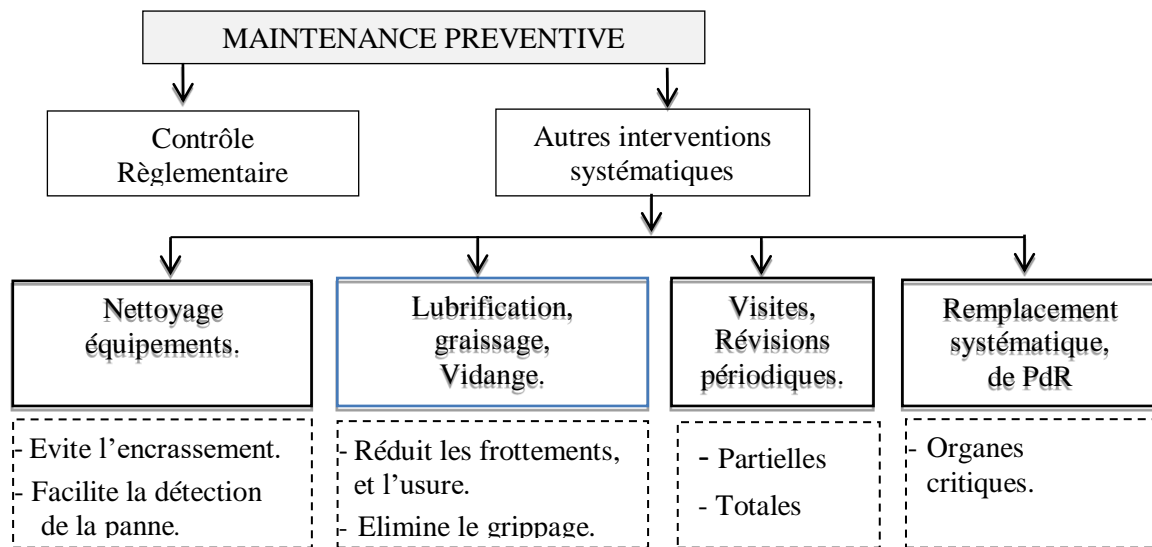


Figure 1.8 : Activités de la maintenance systématique.

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

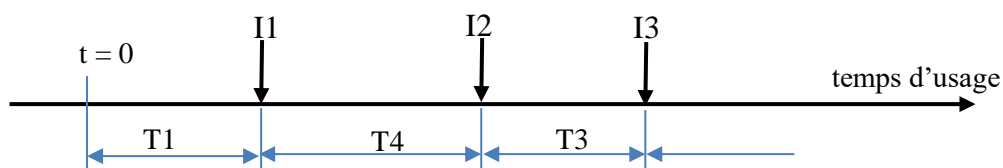
Inconvénients : La maintenance préventive systématique génère un inévitable « gaspillage de potentiel » d'utilisation d'un module ou d'un composant. Pour une courroie de transmission ou un joint, ce n'est économiquement pas grave. Lorsqu'il s'agit d'un sous-ensemble coûteux, c'est plus discutable. C'est pourquoi la détermination de la période d'intervention optimale (T) est une problématique pour ce type de maintenance.

5.2.2. Maintenance préventive conditionnelle (Extrait norme NF EN 13306 X 60-319)

a). **Définition :** Basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent.

Problématique : Tout le problème est de déterminer T. La période T doit être définie en fonction du risque de panne $MTBF = \text{Moyenne des temps de bon fonctionnement}$.

On a Intervalle de maintenance $I(n) - I(n-1) = k \cdot MTBF$ (k étant < 0)



I_i : intervention ; $T_1 \neq T_2 \neq T_3$.

b). Graphe caractéristique « Maintenance préventive conditionnelle ».

La figure suivante illustre le principe de la maintenance conditionnelle. Elle se rapporte au suivi par mesures périodiques (surveillance) ou en temps réel à travers des capteurs d'une dégradation jusqu'au seuil d'alarme qui déclenche une intervention préventive conditionnelle. Le temps de réaction est le temps nécessaire pour préparer et programmer l'intervention à savoir : Qui (nom du technicien), Quand (date et heure d'intervention), avec quels moyens (outillages et pièces de rechangesetc nécessaires pour l'intervention) et ce sans dépasser le seuil admissible.

Les principaux paramètres mesurés à travers des capteurs peuvent porter par exemple sur :

- Le niveau et la qualité d'une huile ;
- Les températures et les pressions ;
- La tension et l'intensité du matériel électrique ;
- Les vibrations et les jeux mécaniques ;
- Etc.

De tous les paramètres énumérés, pour les machines tournantes l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. La surveillance peut être soit périodique, soit continue.

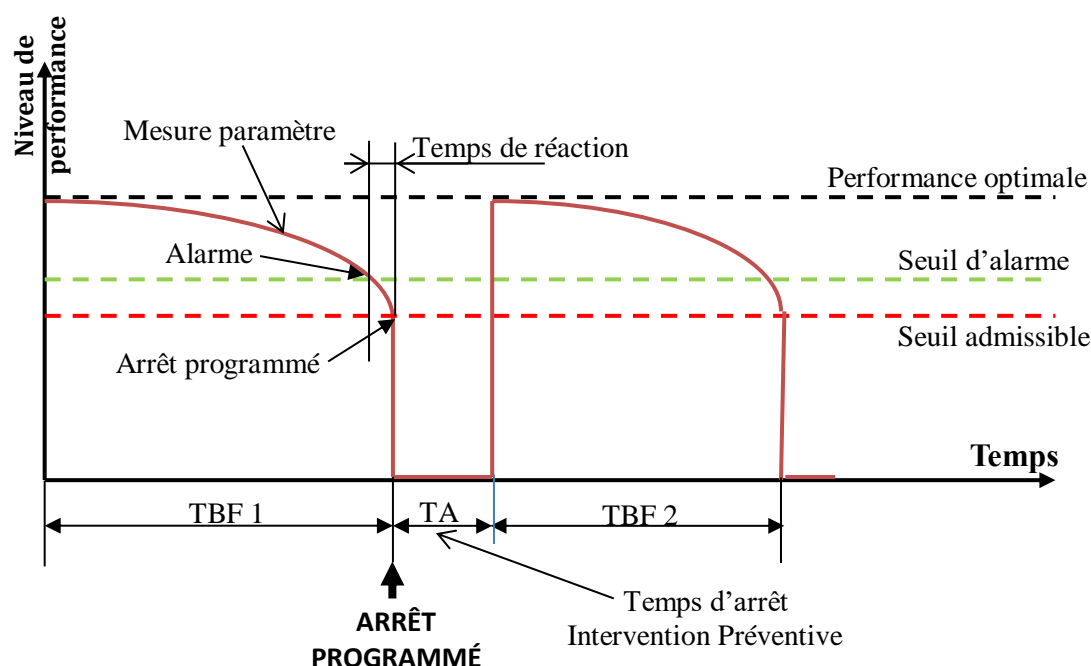


Figure 1.9 : Principe de la maintenance préventive conditionnelle.

Avantage : L'un des avantages de la maintenance conditionnelle est de pouvoir vérifier, voire mesurer l'efficacité de l'intervention. En effet, il est possible de comparer les valeurs des paramètres « après » aux valeurs « avant » qui marquaient la normalité (valeurs de référence).

Contrairement à la maintenance systématique, la maintenance conditionnelle ne permet pas de changer des modules ou pièces plus ou moins neufs.

6. Autres activités de la maintenance.

La maintenance améliorative : L'amélioration des biens d'équipements qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration.

Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences d'interventions ; l'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance), l'augmentation de la sécurité du personnel et autres. On cite les opérations :

- **La rénovation :** Inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défectueux, conservation des pièces bonnes.
- **La reconstruction :** Remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes.
- **La modernisation :** Remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

7. Choix d'une politique de maintenance.

Le choix du type de maintenance le mieux adapté dans chaque cas dépend généralement de :

- du type de défaillance : nouveau, cyclique ou aléatoire.
- de l'aptitude du personnel de maintenance.
- de la connaissance des coûts de maintenance (coûts directs, coûts indirects, investissements).
- de l'organisation du travail (méthode, préparation, planning, pièces de rechange, moyens d'investigation, etc.).

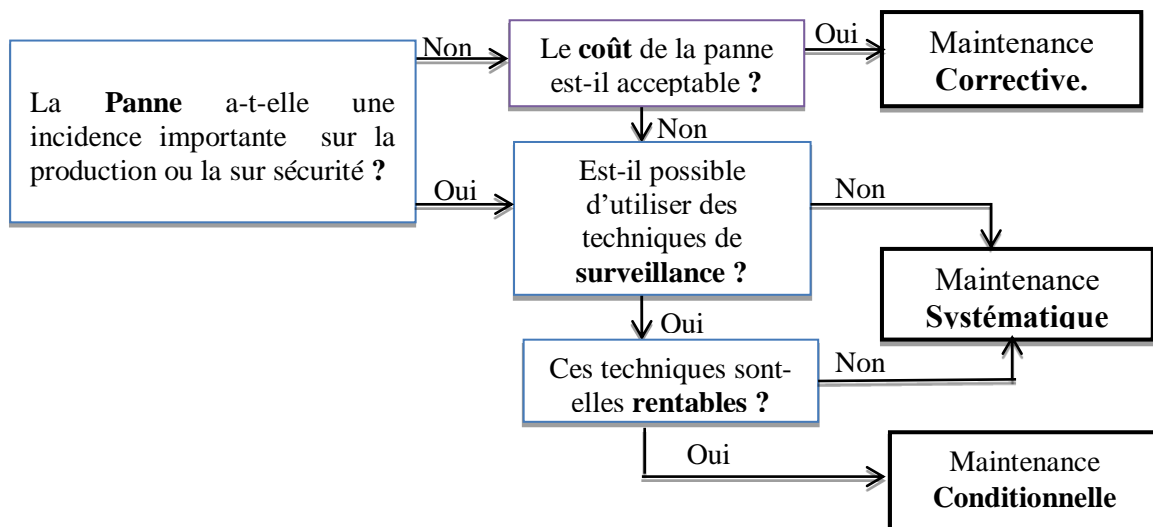


Figure 1.10 : Politique de maintenance.

8. Les cinq niveaux de maintenance

Les interventions de maintenance peuvent être donc classées par ordre croissant de complexité (tableau 1.1), selon norme X60-000 de 2002.

Tableau 1.1 : Les cinq niveaux de la maintenance.

Niveau	Personnel d'intervention	Nature de l'intervention	Moyens requis
1	Exploitant sur place. (Opérateur machine)	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échanges d'éléments en toute sécurité.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite.
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place.	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive	Outillage standard et rechanges situés à proximité
3	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance.	Identification et diagnostics de pannes, réparations par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc, d'essai, de contrôle.
4	Équipe encadrée par un technicien spécialisé en atelier central.	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révisions	Outillage général et spécialisé.
5	Équipe complète polyvalente en atelier central.	Travaux de rénovation, de reconstruction, réparations importantes confiées à un atelier central. Souvent externalisés	Moyens proches de ceux de la fabrication par le constructeur

9. Autres approches de la maintenance.

9.1. La télémaintenance :

La télémaintenance est une forme évoluée de maintenance. Elle est basée sur le principe suivant : les capteurs, mesurant des grandeurs intimement liées à l'état de la machine, sont reliés à une centrale de surveillance qui enregistre toutes les alarmes et les mesures. Des tableaux synoptiques visualisent la localisation de l'information.

Cette technique permet d'une part, le suivi et l'enregistrement des données sur chaque machine pour des fins de comparaison et d'autre part, la détection d'aléas de fonctionnement.

L'agent de surveillance qui constate une évolution d'une dégradation ou l'apparition d'un défaut, a la responsabilité de mettre hors service, de consigner la partie lésée de l'installation et d'alerter les agents d'intervention. Cette technique voit son application dans les chaînes de production automatisées ou auto-programmables.

Cette technologie permet de faire le contrôle et le suivi de l'évolution de l'état des machines de production à l'interne ou à l'externe.

9.2. La Maintenance Productive Totale (TPM) et le TRS :

9.2.1. Définition

Nakajima définit la T.P.M comme une approche où tous les employés participent à la maintenance préventive par des activités d'équipe. Il ajoute que le terme «Total» de TPM a trois significations : le rendement global des installations, un système global de réalisation et une participation de tout le personnel. La TPM vise à modifier la manière de penser des employés vis-à-vis de la maintenance et à améliorer leur niveau de connaissance. La maintenance est donc l'affaire de tous les employer.

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

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

La TPM implique donc un décloisonnement de ces services en faisant participer le personnel de production aux tâches de maintenance. Elle vise ainsi à atteindre le zéro panne, en procédant comme suit :

- Les opérateurs sont chargés de tâches de maintenance du 1 niveau (nettoyage, lubrification, examen externe, etc.). Ils ont la responsabilité de leur machine ;
- Le service maintenance intervient comme spécialiste pour des tâches plus complexes ;
- La TPM fait participer des petits groupes analogiques aux cercles de qualités ayant pour objectif l'amélioration de la maintenance dans l'intérêt de l'entreprise. Les objectifs de TPM sont :
 - Réduction du délai de mise au point des équipements.
 - Augmentation de la disponibilité, et du taux de rendement synthétique (T.R.S.).
 - Augmentation de la durée de vie des équipements.
 - Participation des utilisateurs à la maintenance appuyés par des spécialistes de maintenance.
 - Pratique de la maintenance préventive systématique et conditionnelle.

9.2.2. Principes de la TPM :

a) Auto-maintenance :

- Les opérateurs sont chargés de tâches de maintenance du 1 niveau (nettoyage, lubrification, examen externe, etc.). Ils ont la responsabilité de leur machine ;
- Le service maintenance intervient comme spécialiste pour des tâches plus complexes ;

b) Amélioration du rendement des machines (TRS) :

La démarche TPM cherche à diminuer les 06 pertes de rendement de l’outil de production :

- Pertes dues aux Pannes durables
- Pertes dues aux réglages ;
- Pertes dues aux arrêts mineurs ;
- Pertes dues aux ralentissements ;
- Pertes dues aux défauts qualité ;
- Pertes dues aux démarrages ;

b.1). Nature des pertes de temps de productivité

Les six « grosses pertes » ont été classées en trois familles dans une logique TPM , c’est-à-dire sans se soucier des fonctions(production ,maintenance ,qualité) responsables ou victimes de ces pertes .

Temps requis (OA)				
Temps de marche brut (OB)			Perte d’arrêts de la machine	
			2. Arrêts induits	1. Arrêts propres (pannes)
Temps de marche net (OC)		Perte de productivité		
		4. Ralentissement	3. micro-arrêts	
Temps utile (OD)	Perte de non-qualité			
	6. perte au démarrage	5. défauts de qualité		

C’est ce que le taux de rendement synthétique va mettre en évidence.

$$TRS = \frac{\text{Temps utile}}{\text{temps requis}} = \frac{\text{temps requis} - \sum \text{pertes}}{\text{temps requis}} =$$

b.2) Le taux de rendement synthétique (TRS)

Le TRS est un indicateur de performance d’un équipement, également nommé taux de rendement global (TRG) ou rendement opérationnel (RO). Sa structure est toujours de la forme $TRS = T_1 \times T_2 \times T_3$.

Pour mieux réduire les six grosses pertes la TPM a pour vocation de mesurer le TRS. .

- **Forme générale de l’indicateur TRS**

La formule du taux de rendement synthétique est :

$$TRS = \frac{OD}{OA} = \frac{OB}{OA} \times \frac{OC}{OB} \times \frac{OD}{OC}$$

Valeur d'excellence (acceptable) : $TRS > 0,90 \times 0,95 \times 0,99 = 0,85$.

- **Taux brut de fonctionnement : perte dues aux arrêts durables.**

$$\frac{OB}{OA} = \frac{T_{requis} - \sum T_{Arrets}}{T_{requis}} = \frac{T_{de\ marche}}{T_{de\ requis}} = \tau_1$$

Valeur d'excellence : $> 0,90$.

Le temps requis est la durée pendant laquelle l'équipement est censé produire. Les temps d'arrêts doivent être discriminés lors de leur saisie en temps d'arrêt propres (sur pannes) et en temps d'arrêt pour causes externes :

- En temps d'arrêt induits par l'interdépendance des machines,
- En temps d'attente,
- En temps d'arrêt pour changement de production (reformatage) ou d'outillage.

- **Taux net de fonctionnement : pertes par ralentissements**

$$\frac{OC}{OB} = \frac{\text{Temps de cycle reel} \times \text{quantite produite}}{\text{Temps de marche}} \times \frac{\text{Temps de cycle theorique}}{\text{Temps de cycle reel}} = \tau_2$$

$$= \text{Taux de marche} \times \text{Taux d'allure}$$

Valeur d'excellence : $> 0,95$.

Ce taux d'allure est également nommé le « rendement vitesse ».

- **Taux de qualité : pertes dues aux défauts de qualité**

$$\frac{OD}{OC} = \frac{\text{Pieces entrees} - \text{pieces defectueuses}}{\text{pieces entrees}} = \tau_3$$

Valeur d'excellence : $> 0,99$.

L'amélioration du taux de qualité passe par les techniques de la TQC (total quality control) et spécifiquement par la MSP (maîtrise statistique des procédés). Sur certains processus, la part des « pertes au démarrage » peut n'être pas négligeable, cette perte étant accentuée par la tendance à plus de flexibilité et la réalisation de séries courtes.

Chapitre II : ANALYSE DES TEMPS DE MAINTENANCE ET CONCEPTS FMD.

1. Analyse des temps de maintenance.

1.1. Temps relatifs aux états d'un système.

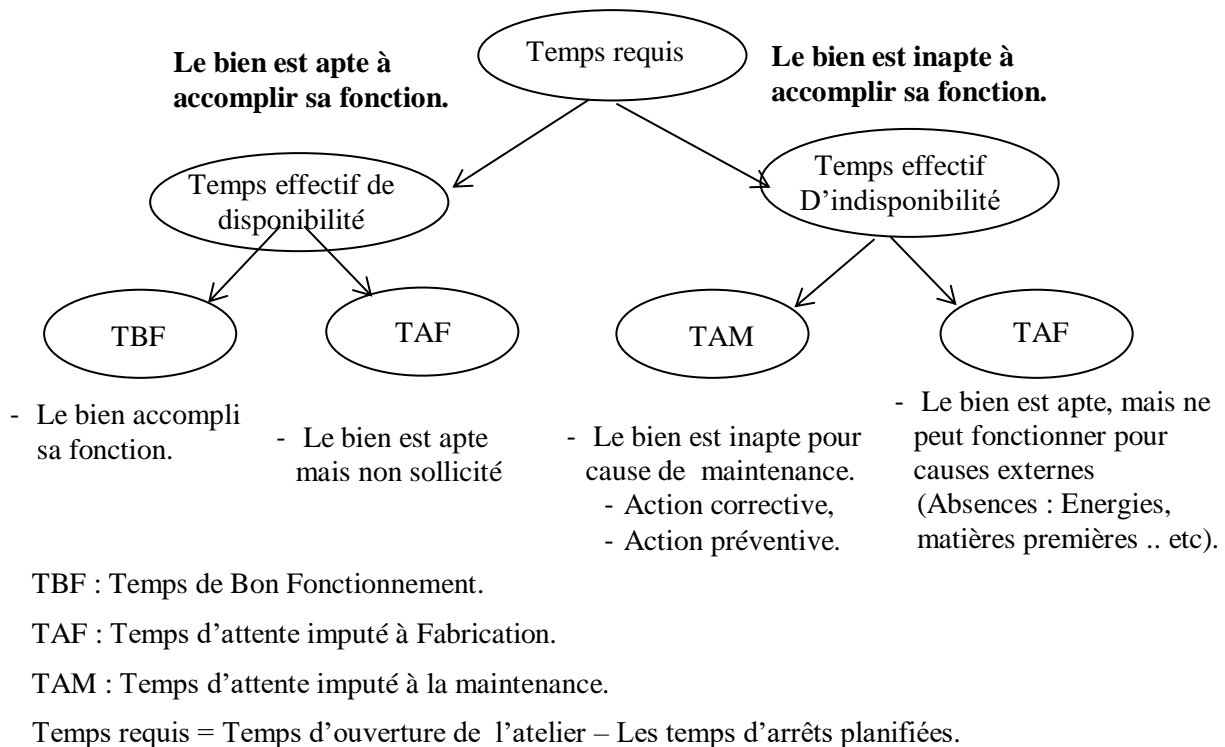


Figure 2.1 : Temps relatifs aux états d'un système

1.2. Classification des temps de maintenance :

La maintenance a pour devoir de maîtriser à la fois les temps machines (temps de bon fonctionnement et le temps d'arrêt) et les temps d'activité humaine (les techniciens d'intervention).

- Temps machines : Ils concernent les états successives caractérisant la disponibilité et la non disponibilité des systèmes. Pour ses temps des saisies automatiques de dates et de durées ou des relevés de compteurs associés à des systèmes d'imputation des causes d'arrêts sont nécessaires.
- Temps d'activité humaine (technicien) : Comme ses temps relèvent d'interventions humaines, ils posent un problème de saisi délicat. Comme leur connaissance et aussi indispensable que la connaissance des temps machines, un effort d'explication destiné aux techniciens est souvent nécessaire.

La maîtrise de ces temps résultant de la performance intrinsèque de l'équipement (fiabilité) et de la performance humaine associées aux arrêts (Maintenabilité), va donc permettre de gérer la maintenance d'un équipement à partir des causes d'indisponibilité à l'aide d'indicateurs de maintenance.

1.3. Les temps d'activité humaine en maintenance.

La maîtrise des temps d'activité de tous les techniciens de maintenance est à la base de la pyramide de la gestion d'un service maintenance :

- Sans estimation des « temps alloués », pas de planification d'activités ;
- Sans estimation de temps, pas de coûts prévisionnels, donc pas de gestion prévisionnelle ;
- Sans les relevés des « temps passés », pas de coûts de maintenance, donc pas de gestion possible du budget ;
- Sans relevés exacts des temps passés, pas d'analyse des activités, donc pas de propositions d'améliorations.

L'analyse des temps d'activité humaine repose donc sur 4 temps : les temps prévus (Prévisions), les temps programmés (Programmation, les temps passés (Réalisation) et les temps relevés (Durée réelle relevée).

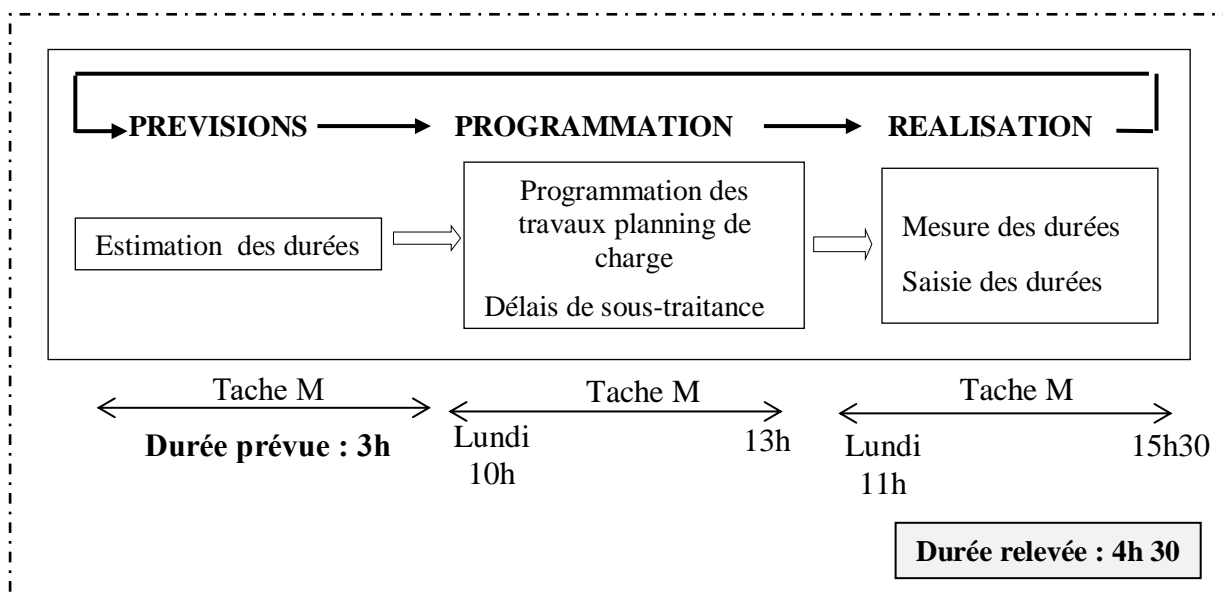


Figure 2.2 : Temps d'activité humaine

1.4. Nature des durées d'intervention de maintenance corrective.

Les temps de maintenance comprennent les temps de maintenance préventive et les temps de maintenance de corrective. Les temps de maintenance corrective sont d'une utilité importante devant ceux de la maintenance préventive qui est toujours programmée, c'est pourquoi, on analyse les temps de maintenance corrective.

Les temps de maintenance corrective se décomposent en temps actifs et en temps annexes. Les temps actifs de maintenance corrective comprennent.

Parmi les temps actifs de maintenance corrective on trouve :

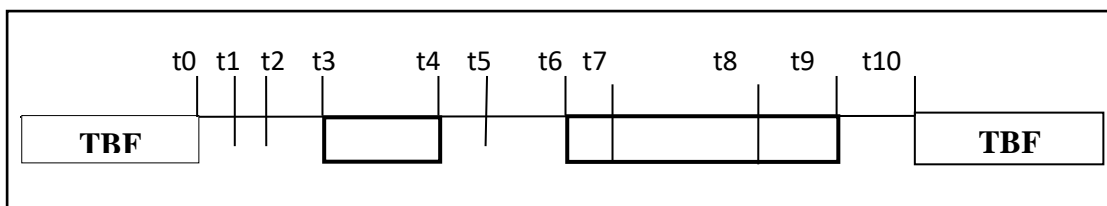
- Le temps de localisation de la défaillance ;
- Le temps de diagnostic ;

- Le temps de dépannage et de réparation ;
- Le temps de contrôle et d'essai finals

Parmi les temps annexes de maintenance corrective on trouve :

- Les temps administratifs (temps de saisie et traitement des documents) ;
- Les temps logistiques ou durées d'attente des ressources nécessaires à l'exécution de l'intervention ;
- Les temps techniques annexes (exemple : attente de refroidissement d'un équipement) ;
- Le temps de préparation du travail (étude, méthode, ordonnancement)

Ci-après le chronogramme des temps actifs et annexes en maintenance corrective :



- Avant T0 et après T10 : durées de bon fonctionnement TBF ;
- T0 : apparition de la défaillance ;
- T0-T1 : durée de détection de la défaillance ;
- T1 : émission de la demande de travail DT ;
- T2 : accusé de réception, la DT est enregistrée par le service maintenance ;
- T3 : prise en charge par un technicien disponible ;
- T3-T4 : tests, localisation, diagnostic, expertise ;
- T4-T5 : préparation de l'intervention, consignation, procédures de sécurité ;
- T5-T6 : programmation de l'intervention, attente d'approvisionnement ;
- T6 : lancement de l'ordre de travail OT ;
- T6-T7 : nettoyage, accès, dépose sous ensemble ;
- T7-T8 : démontage et intervention proprement dite ;
- T8-T9 : remontage et repose ;
- T9-t10 : essais, contrôles, réglages et déconsignation ;
- T10 : équipement à nouveau opérationnel (TBF).

Remarque : (T3-T4) et (T6-T10) : temps passés saisis sur le bon de travail BT. Il s'agit des TTR : temps techniques de réparation.

1.5. Opérations de la maintenance corrective.

Après apparition d'une défaillance, le technicien de maintenance doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous.

Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- Test : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence ;
- Détection ou action de déceler l'apparition d'une défaillance ;
- Localisation ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
- Diagnostic ou identification et analyse des causes de la défaillance ;
- Dépannage, Réparation ou remise en état (avec ou sans modification) ;
- Contrôle du bon fonctionnement après intervention ;
- Amélioration éventuelle : c'est à dire éviter la réapparition de la panne ;
- Historique ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

1.6. Estimation du temps alloué à une intervention (MTTR).

Soit une intervention corrective, réalisée N fois et connue par retour d'expérience (historique). L'histogramme des TTR qui donne une fonction de distribution a toujours la même allure caractérisée par :

- Temps optimistes TO : temps minimaux,
- Temps pessimistes TP : temps maximaux,
- Temps réaliste TR : le temps le plus fréquent.

La MTTR est approximée par la moyenne statistique des TTR.

Pour une distribution dissymétrique la MTTR est estimée par :

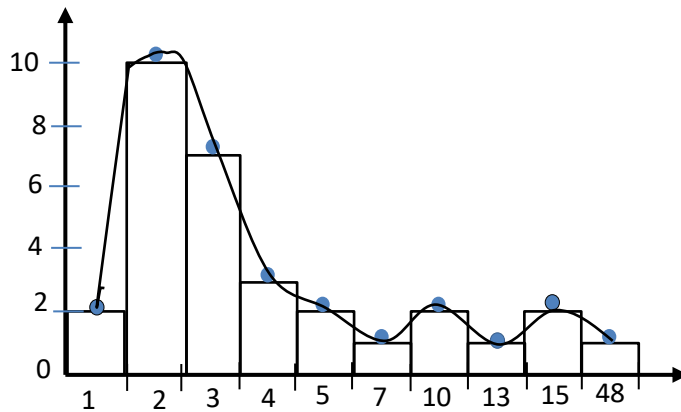
$$MTTR = \frac{TO + 4TR + TP}{6}$$

Si $N > 50$, on estime :

- TO = 10% des temps lui soient inférieurs,
- TP = 10% des temps lui soient supérieurs,
- TR = temps le plus fréquent,

Exemple d'application : Une série d'interventions sur des moto-variateurs a donnée les historiques suivants :

Temps d'arrêt	1	2	3	4	5	7	10	13	15	48
Fréquence	2	10	7	3	2	1	2	1	2	1



La distribution est bien dissymétrique,

TO = 1 heure.

TP = 48 heures.

TR = 2 heures.

$$MTTR = \frac{TO + 4TR + TP}{6} = \frac{1 + 4 \times 2 + 48}{6} = 9,3 \text{ H}$$

2. Concepts FMD et sureté de fonctionnement.

Sureté de fonctionnement : « Ensemble des aptitudes d’un produit qui lui permettent de disposer des performances spécifiées, au **moment voulu**, pendant la **durée prévue**, **sans dommage** pour lui-même et son environnement ».

Les composantes de la sureté de fonctionnement sont :

2.1. Fiabilité :

« Aptitudes d’un bien à accomplir une **fonction requise**, dans des **conditions d’utilisation** données, durant un **intervalle de temps** donné ».

$R(t) = P \{S \text{ non défaillant sur l’intervalle } [0,t] \}$: C’est la probabilité qu’un système S fonctionne sans subir de panne sur l’intervalle $[0,t]$.

- Fonction requise : ou accomplir une mission ou rendre le service attendu. La définition de la fonction requise implique un seuil d’admissibilité en de  duquel la fonction n’est plus remplie.
- Conditions d’utilisation : définition des conditions d’usage, c’est à dire l’environnement et ses variations, les contraintes mécaniques, chimiques, physiques, etc. Il est évident que le même matériel placé dans 2 contextes de fonctionnement différents n’aura pas la même fiabilité.
- Période de temps donnée : définition de la durée de mission T en unités d’usage. Exemple : on se fixe un minimum $R(T_m) = 0,9$ pour une durée de mission $T_m = 8000$ heures ; à tout instant T_i de la mission est associée une fiabilité $R(t_i)$.

On ne peut parler de mesure de fiabilité qu’après avoir acquis une expérience suffisante dans l’exploitation du système ou éventuellement par des essais appropriés.

On distingue :

- a) La fiabilité estimée ou intrinsèque :
- b) La fiabilité prévisionnelle :
- c) La fiabilité opérationnelle : c'est la fiabilité mesurée sur des dispositifs en exploitation normale. Elle dépend des conditions réelles d'utilisation et du support logistique.

Remarque : « Le temps de bon fonctionnement MTBF reflète la fiabilité », revient à dire améliorer la fiabilité, augmenter le temps de bon fonctionnement, c'est-à-dire diminuer le taux de panne $\lambda(t)$.

Pour améliorer la fiabilité (augmenter le MTBF, réduire $\lambda(t)$) c'est :

- Faire une bonne maintenance préventive.

2.2. Maintenabilité :

Dans des conditions données d'utilisation, aptitudes d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

$$M(t) = P \{ S \text{ est réparé sur l'intervalle } [0,t] \}$$

C'est la probabilité que la maintenance d'un système S accomplie dans des conditions données, soit effectuée sur l'intervalle $[0,t]$ sachant qu'il est défaillant à l'instant t.

Remarque : « Le temps moyen de réparation MTTR reflète la maintenabilité », revient à dire améliorer la maintenabilité c'est minimiser les temps de réparations et par suite le taux de réparation $\mu(t)$ ».

Pour améliorer la maintenabilité (minimiser le $\mu(t)$) c'est :

- Avoir un équipement réparable, donc démontable.
- Avoir la disponibilité de la pièce de rechange ;
- Avoir l'outillage et la logistique nécessaires pour l'intervention ;
- Avoir les procédures de travail (gammas opératoires) ;
- Avoir une conception avec une accessibilité à l'intervention (démontage et remontage) ;
- Avoir un technicien qualifié ;
- Autres.

2.3. Disponibilité :

Aptitudes d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions données, à un **instant donné** ou durant **un intervalle** de temps donné, en supposant que la fourniture **des moyens externes** est assurée.

$$A(t) = P \{ S \text{ non défaillant sur l'instant } t \}$$

C'est la probabilité qu'un système S soit non défaillant à tout instant, lors du démarrage et durant l'intervalle $[0,t]$, c'est pourquoi qu'on peut conclure que la disponibilité regroupe la fiabilité et la maintenabilité.

Pour améliorer la fiabilité et la maintenabilité, c'est-à-dire augmenter le MTBF (réduire $\lambda(t)$) et aussi réduire le MTTR (réduire $\mu(t)$).

Résumé :

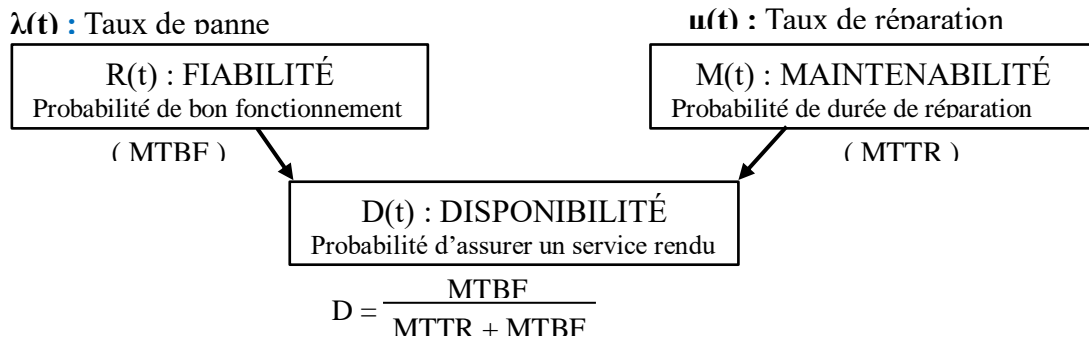


Figure 2.3 : Concepts FMD.

- **Disponibilité intrinsèque :**

Elle exprime le point de vue du concepteur. Ce dernier a conçu et fabriqué le produit en lui donnant un certain nombre de caractéristiques intrinsèques, c'est à dire des caractéristiques qui prennent en compte les conditions d'installation, d'utilisation, de maintenance et d'environnement, supposées idéales.

- **Disponibilité opérationnelle :**

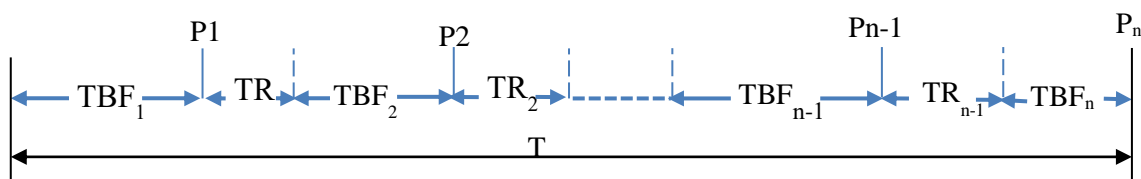
Il s'agit de prendre en compte les conditions réelles d'exploitation et de maintenance. C'est la disponibilité du point de vue de l'utilisateur. Le calcul de D_o fait appel aux mêmes paramètres TBF, TTR et sauf que ces 3 paramètres ne sont plus basés sur les conditions idéales de fonctionnement mais sur les conditions réelles (historiques d'exploitation : mesures de temps saisies à partir des états d'un équipement en exploitation).

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

2.4. Facteurs de fiabilité, maintenabilité et disponibilité.

Comme les installations représentent un ensemble technique complexe, il est difficile de donner une réponse globale, et c'est pourquoi on étudie la disponibilité par équipement et non pas par installation (ensemble d'équipement), puis après on peut déduire la disponibilité résultante en adoptant le principe des configurations série et parallèle.

Considérant un équipement donné par :



TBFi : Temps de Bon Fonctionnement i,

Pi : Panne i,

TRi : Temps de réparation i.

T : Période de fonctionnement suffisamment longue.

Dans ce cas la disponibilité est traduite par la somme des périodes de fonctionnement durant la période T. Soit :

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n TBFi}{T} = \frac{\sum_{i=1}^n TBFi}{\sum_{i=1}^n TBFi + \sum_{i=1}^n TRi}$$

Avec : $MTBF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TBFi$ MTBF : Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement.

$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TRi$ MTTR : Moyenne des Temps de Travaux de Réparation

Par substitution on obtient : $D = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR}$

a. Facteur de Fiabilité :

On utilise souvent le terme fiabilité pour caractériser l'aptitude d'un équipement à être exploité en fonction du temps sans subir de panne, cette notion reflète le MTBF appelé aussi facteur de fiabilité 'f'.

b. Facteur de Maintenabilité :

On utilise également le terme maintenabilité, c'est l'aptitude qu'offre un équipement à subir plus ou moins facilement les interventions et travaux de maintenance.

Comme le MTTR est le quotient de la durée totale des arrêts par le nombre d'arrêt.

$$MTTR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TRi$$

Son inverse représente le nombre moyen d'arrêt par heure de production perdue, et mesure en quelque sorte la vitesse d'intervention de la maintenance. Plus le MTTR diminue plus cette vitesse est grande, plus grande aussi la maintenabilité de l'équipement.

On pose $m = \frac{1}{MTTR}$ (Facteur de maintenabilité).

c. Facteur de disponibilité opérationnelle :

Comme la disponibilité est fonction de la fiabilité et la maintenabilité, ce qui donne :

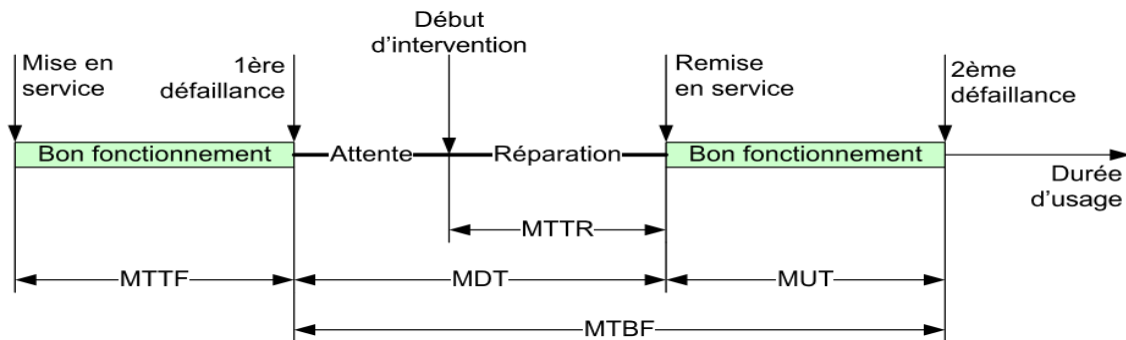
$$d = \frac{MTBF}{MTTR} \text{ (Facteur de disponibilité)}$$

d : désigne le nombre d'heures d'utilisation de l'équipement par heure d'arrêt attribuée à la maintenance.

$$D_{op} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \cdot \frac{MTTR}{MTTR} \quad \text{on obtient :} \quad D_{op} = \frac{d}{1+d}$$

1

2.5. Temps caractéristiques de la sûreté de fonctionnement.



Indicateurs opérationnels :

MTTF : (Mean Time To Failure) Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance

MTTR : (Mean Time To Repair) Durée moyenne de réparation

MUT: (Mean Up Time) Durée moyenne de fonctionnement après réparation

MDT : (Mean Down Time) Durée moyenne d'indisponibilité. Cette durée correspond aux phases suivantes : Détection de la panne, la réparation de la panne et la remise en service.

MTBF : (Mean Time Between Faillance) Durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

Remarque :

La MTTF est utilisée dans les systèmes non réparables. Dans ce cas : $MTTF = MTBF$.

Dans les systèmes réparables, MTTF est un indicateur de qualité. Le premier TTF est à intégrer à la collecte des TBF (temps de bon fonctionnement).

Chapitre III : COMPORTEMENT DU MATERIEL EN SERVICE / ETUDE DES DEFAILLANCES.

Les défaillances sont à la maintenance ce que les pathologies humaines sont à la médecine : leur raison d'exister.

C'est pourquoi, une étude des défaillances s'avère plus que nécessaire.

1. Définitions et vocabulaire des défaillances.

- Défaillance : « Altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise ». Après une défaillance, le bien est en panne.

Termes proches ou synonymes, mais non normalisés : failure en anglais, dysfonctionnement, défaut, faute, panne, avarie, dégradation, anormalité, dommage, erreur, incident, anomalie, arrêt fortuit, détérioration, etc.

- Cause de défaillance : « circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance ».
- Mode de défaillance : effet par lequel une défaillance se manifeste.
- Panne : « état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures ».
- Dégradation : « évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation ». Une dégradation peut conduire à la défaillance.
- État dégradé : « état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises ».

2. Classification et types de défaillances.

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances, parmi lesquelles nous retiendrons :

➤ Défaillances par familles de « causes » :

- Défaillances de causes intrinsèques : Elles sont générées par le système lui-même, en condition normale de fonctionnement. Elles sont dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liées à la durée d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.
- Défaillances de causes extrinsèques : On distingue, défaillance de mauvais emploi ou de mauvaise utilisation du bien (exp : contraintes de capacité), défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien, défaillance due à la maintenance, par une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte.

➤ Défaillances selon leurs « amplitude, » :

- Défaillance partielle : Altération du fonctionnement du bien (fonctionnement en mode dégradé).
- Défaillance complète (ou totale) : c'est la panne, perte de fonction (cessation complète de fonctionnement).
- Défaillance permanente : Elle se manifeste selon un caractère « permanent » (le bien ne peut reprendre sa fonction qu'après une action corrective).
- Défaillance fugitive : Elle se manifeste selon un caractère « intermittent » (la panne apparaît puis disparaît sans aucune intervention de la maintenance, puis apparaît de nouveau. Ce type de défaillance est difficile à diagnostiquer).

➤ Défaillances selon leurs « rapidité et manifestation » :

- Défaillance par dégradation : Elle se manifeste à une vitesse progressive (usure), puis complète (totale). C'est le cas des organes mécaniques.
- Défaillance catalectique : Elle se manifeste d'une façon soudaine (pas d'usure) puis complète (totale). C'est le cas des composants électroniques.

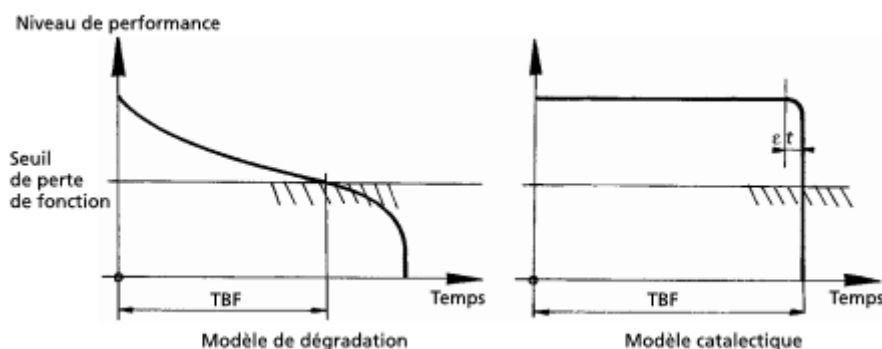


Figure 3.1 : Deux modèles de défaillance

3. Le taux de défaillance.

3.1. **Définition** Le taux de défaillance, noté $\lambda(t)$, est un indicateur de fiabilité qui représente :

- soit un taux supposé constant de défaillances par unité d'usage exprimé sous la forme générale :

$$\lambda = \frac{\text{nombre de défaillances sur un intervalle de temps}}{\text{nombre de survivants au début de la période } \times \text{intervalle de temps d'utilisation}}$$

S'exprime le plus souvent en « pannes par heure ».

- Soit la fonction $\lambda(t)$ qui représente une proportion de survivants à l'instant t , tirée d'un échantillon.

3.2. Durée de vie d'un équipement « courbe en baignoire »

La variation de la fonction $\lambda(t)$ d'un équipement le long de sa durée de vie est connue a priori et est une courbe en forme de « baignoire ».

La variation de $\lambda(t)$ (figure 3.2) se caractérise par trois périodes distinctes : Jeunesse, Maturité et Vieillesse de l'équipement. Chaque période ayant ses types de défaillances propres.

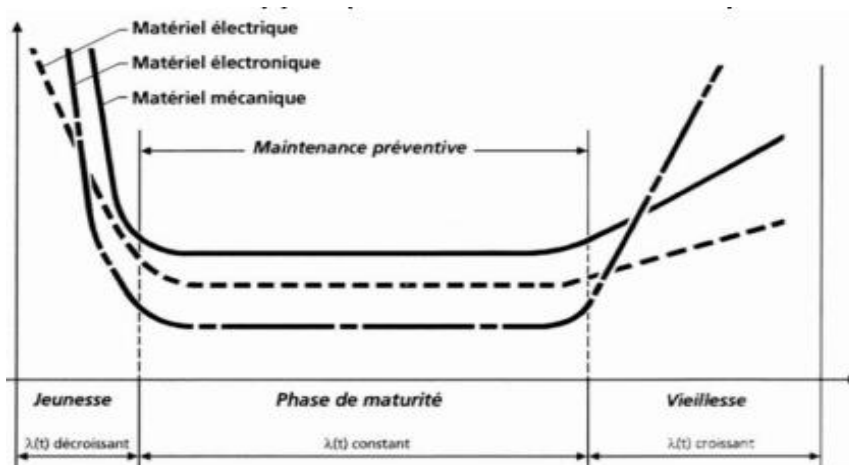


Figure 3.2 : Courbe en baignoire d'un système

- **Période de jeunesse** : C'est une période de rodage et d'adaptation et aussi de mise en service et réglage. Caractérisée par : des défaillances « précoces », un taux de défaillance décroissant et une période très courte ;
- **Période de maturité ou vie utile** : C'est une période de rendement optimal du matériel. Les défaillances apparaissent sans dégradations préalables donc des défaillances aléatoires et un taux de défaillance sensiblement constant. Nous nommerons « hypothèse exponentielle » le fait de considérer λ constant sur la période de vie utile ;
- **période de vieillesse ou d'usure** : C'est aussi une période d'obsolescence qui se caractérise par : un mode de défaillance prédominant, visible, entraîne une dégradation accélérée, un taux de défaillance croissant. A un certain seuil de $\lambda(t)$, le matériel est mort il est alors déclassé (réformé), c'est pourquoi durant cette période le service maintenance augmente les études technico-économique afin de décider sur la réforme du matériel au moment opportun.

Remarque : Cette courbe à un caractère « universel » : elle représente aussi bien des taux de défaillances « humaines », (taux de mortalité bien connue en démographie) que des défaillances du monde du végétal.

Cas particuliers : Pour les systèmes 'électronique, la phase de jeunesse est caractéristique de défauts initiaux de fabrication qu'il est possible de « couvrir » par des techniques de déverminage.

3.3. Calcul du taux de défaillance.

3.3.1. Analogie : taux de défaillance et vitesse en mécanique.

Par analogie, nous commençons par les notions mécaniques de vitesse :

Une vitesse moyenne = $\Delta x / \Delta t$, puis, faisant tendre Δt vers 0, on obtient une vitesse instantanée = dx / dt (dérivée de l'espace par rapport au temps).

En fait le taux de défaillance représente la « vitesse d'arrivée des pannes ».

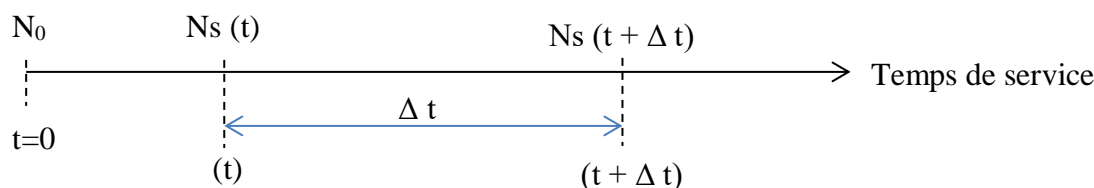
Nous définirons donc un taux moyen de défaillance pendant un intervalle $(t, t + \Delta t)$, puis un taux instantané lorsque $\Delta t \rightarrow 0$.

$\lambda(t)$ caractérise la probabilité de défaillance dans l'intervalle Δt de dispositifs ayant survécu à l'instant t .

3.3.2. Calcul du taux de défaillance moyen.

Cas 1 : les éléments défaillants sont remplacés dans l'intervalle Δt .

Nommons : N_0 : nombre initial de dispositifs,
 $N_s(t)$: nombre de survivants à l'instant t ,
 $N_s(t + \Delta t)$: nombre de survivants à l'instant $t + \Delta t$,
 $C(\Delta t) = N_s(t) - N_s(t + \Delta t)$: nombre de défaillants pendant Δt .



Dans ce cas le lot de dispositif est constant ($N_0 = N_s(t)$), le taux de défaillance moyen sur l'intervalle Δt est :

$$\lambda(t) = C(\Delta t) N_0 \cdot \Delta t \quad \lambda(t) = \frac{C(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}$$

Cas 2 : les éléments défaillants ne sont pas remplacés (ou ne sont pas réparés) dans l'intervalle Δt .

Dans ce cas, ($N_0 \neq N_s(t)$), la fonction $N(t)$ est décroissante. Le taux de défaillance moyen sur l'intervalle Δt est :

$$\lambda(t) = \frac{N_s(t) - N_s(t + \Delta t)}{N_s \cdot \Delta t}$$

Ce taux de défaillance est une valeur moyenne sur une période Δt connue. Or, au même titre que $F(t)$ et $R(t)$, il est intéressant de connaître l'évolution de $\lambda(t)$ au cours du temps. C'est le taux de défaillance instantané :

3.3.3. Taux de défaillance instantané.

On fait : tendre $\Delta t \rightarrow dt$ et $(N_s(t) - N_s(t + \Delta t)) \rightarrow dN$.

$\lambda(t).dt$ est appelé probabilité conditionnelle de défaillance sur $[t, (t+dt)]$.

$$\lambda(t) = \frac{-dN}{N(t).dt} \longrightarrow \lambda(t)dt = \frac{-dN}{N(t)}$$

Remarque : le signe moins dN s'explique par la décroissance de $N(t)$, c'est-à-dire il y a moins de survivants à $(t + \Delta t)$ qu' à (t) .

4. Exploitation des relevées de défaillance / Analyse des défaillances

Il est dans l'esprit de la maintenance corrective de ne pas seulement dépanner ou réparer un système défaillant, mais de chercher à éviter la réapparition des défauts, d'où l'intérêt des analyses des défaillances.

- Analyse qualitative : effectuée à partir de l'observation attentive des symptômes en aboutissant à une expertise.
- Analyse quantitative : Effectuée à partir des données historiques (date, heure, nombre de panne, TBF, TTR, ...etc).

NB : Il est à noter que chaque équipement possède :

- Un dossier technique qui caractérise : l'identité de l'équipement (nom du constructeur, téléphone, code machine, localisation, puissances des énergies utiles, principaux sous-ensembles / composants, références pièces de rechange, plan d'entretien préventif, plans électrique, pneumatique, hydraulique ...etc).
- Un dossier historique : qui caractérise par analogie le dossier malade (être humain). Toute intervention de maintenance doit être consignée dans ce dossier par : date de l'intervention, heure, nature de l'intervention (mécanique, électrique, hydraulique..etc), désignation, nom du technicien, temps de l'intervention, pièce de rechange, ...etc.

4.1. Relevés des défaillances.

Ce sont généralement les Bon de Travaux (BT) qui servent de base aux historiques machines, peuvent être entrés en ordinateur (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur GMAO) ou en support papier par nature, par machine, par secteur ...etc, ceci pour traiter en vue d'une amélioration : la fiabilité, la maintenabilité, disponibilité et coûts..

Les données chiffrées à saisir doivent être les suivantes :

- **Données caractérisant la fiabilité des équipements** : dates des interventions correctives (jours, heures) et nombre N de défaillances ; ces éléments permettront de calculer les périodes de bon fonctionnement ($UT = Up\ Time$), les intervalles de temps entre deux défaillances consécutives ($TBF = Time\ Between\ Failures$) et leur moyenne ($MTBF$).

- **Données caractérisant la maintenabilité des équipements** : Durées d'intervention maintenance (TTR = Time To Repair) et leur moyenne (MTTR).
- **Données caractérisant la disponibilité des équipements** : temps d'arrêt de production (DT = Down Time) consécutifs à des défaillances, y compris ceux des « micro-défaillances » ; l'expérience montre que son oubli (micro-défaillances) fausse complètement une étude de fiabilité ultérieure. Il est prouvé aussi que les micro-défaillances, qui appartiennent à la routine, donc qu'on oublie facilement, sont génératrices de perte de disponibilité, donc de productivité moindre et bien sûr de non qualité.

4.2. Analyse qualitative / Expertise :

Il est dans l'esprit de la maintenance corrective de ne pas seulement dépanner ou réparer un système défaillant, mais de chercher à éviter la réapparition des défauts, d'où l'intérêt des analyses des défaillances, effectuées à partir de l'observation attentive des symptômes.

A l'issue d'une défaillance d'un équipement, une expertise doit permettre de rassembler les 06 éléments de connaissance ci-après.

Les six éléments de connaissance permettent de comprendre aussi bien l'environnement du système lors de sa perte de fonction que les mécanismes ayant engendré la défaillance.

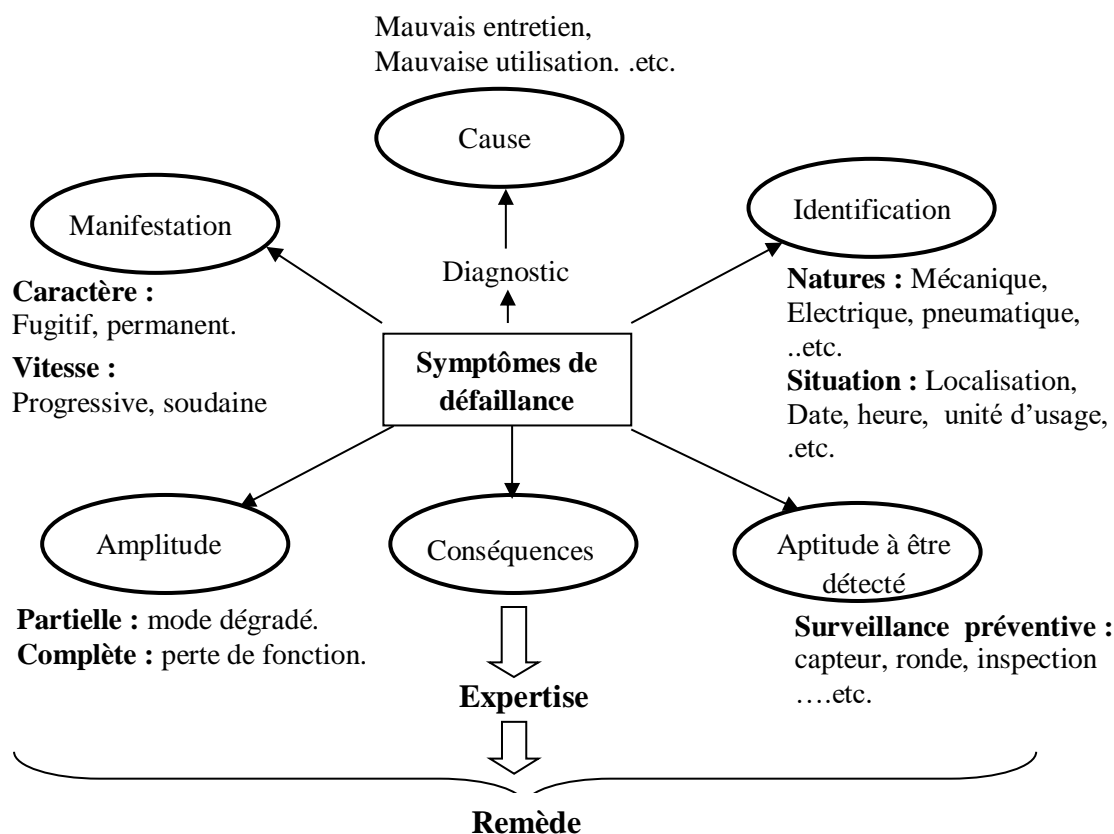


Figure 3.3 : Les 06 éléments de connaissance d'une défaillance.

4.3. Analyse quantitative des défaillances et amélioration des concepts FMD.

Tout le problème pour le technicien de maintenance est de savoir quelles défaillances traiter en priorité, certaines n'ayant que peu d'importance en termes d'effets et de coûts. L'exploitation de l'historique va permettre d'effectuer ce choix.

L'analyse quantitative d'un historique va permettre de dégager des actions d'amélioration en termes de fiabilité, maintenabilité et disponibilité, donc d'identifier les défaillances nécessitant une priorité d'action et sur ses défaillances qu'il faut approfondir l'analyse afin de les corriger et de les prévenir.

Analyser quantitativement les résultats des diagnostics constitue ainsi un axe de progrès.

4.3.1. Loi de Pareto :

Parmi la multitude de préoccupations qui se posent à un responsable maintenance, il lui faut décider quelles défaillances doivent être étudiées et/ou améliorées en premier. Pour cela, il faut identifier celles qui sont les plus importantes et dont la résolution ou l'amélioration serait le plus rentable, en particulier en terme de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui « est important » et que ce qu'il « l'est moins » ne se distinguent pas toujours de façon claire.

La loi de Pareto (appelé aussi loi des 20/80 ou la courbe ABC) apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités.

On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre de panne, temps de réparation etc..), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique soit sous forme d'histogramme (figure 3.4 (a) ou sous forme de courbe ABC (figure 3.4 (b), dans ce deuxième cas, faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés.

Sur la figure 3.4 (b), on observe trois zones.

- 1. Zone A :** 20% des pannes occasionnent 80% des coûts (nombre de panne, temps de réparation etc) ;
- 2. Zone B :** les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ;
- 3. Zone C :** les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global (du total nombre de panne, total temps d'intervention etc).

Exemple : - 20 % des systèmes représentent 80 % des pannes.
- 20 % des interventions représentent 80 % des coûts de maintenance.
- 20 % des composants représentent 80 % de la valeur des stocks.

Conclusion : il est évident que les défaillances nécessitant une priorité d'action en termes de travaux de maintenance doit porter sur les pannes de la zone A.

Remarque : En réalité, Selon la loi de Pareto, nous savons a priori que **15 à 20 %** des sous-ensembles vont être responsables de **50 à 80 %** des temps d'immobilisation d'un équipement. (En pratique, Il ne faut donc pas chercher exactement les 20% et 80%).

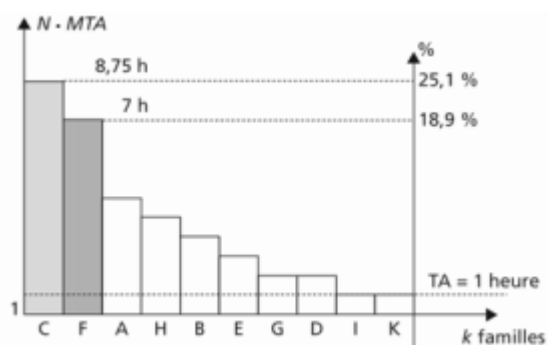


Figure 3.4 (a) : Histogramme

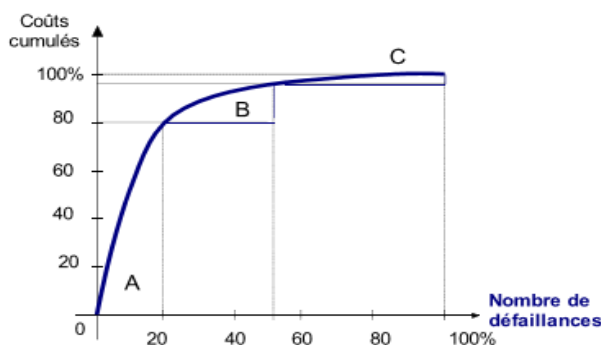


Figure 3.4 (b) : Courbe ABC

En maintenance cette méthode est très utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple :

- S'attacher particulièrement à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses. Et rechercher les causes et les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances ;
- Organiser un magasin en fonction des fréquences de sortie des pièces (nombre de pièces et emplacement) ;
- Décider de la politique de maintenance à appliquer sur certains équipements en fonction des heures et des coûts de maintenance.

Remarque : toutefois, cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

4.3.2. Méthodologie.

L'exploitation des historiques machine pour faire une analyse quantitative des défaillances, ceci en vue d'améliorer la maintenabilité, la fiabilité, la disponibilité et aussi les coûts en utilisant le diagramme de Pareto (histogramme ou courbe ABC) nécessite le suivi des étapes suivantes :

Etape 1 : Disponibilité des historiques (cette méthode est à caractère statistique et nécessite ainsi des données).

Etape 2 : Une première analyse permet de dégager les défaillances normales (intrinsèques) et d'éliminer les défaillances extrinsèques à corriger mais à ne pas prendre en compte lors de l'analyse.

Défaillances extrinsèques : Ce sont des pannes dues à une faute de conduite, un accident, consigne non respectée ou dues à une influence accidentelle du milieu extérieure (incendie, inondation etc).

Etape 3 : Mise en famille des défaillances (choix du critère de classement): les défaillances sont recensées et classées par familles ou types de défaillances. Exemple : on fait l'analyse par famille d'organe (pièces) pour identifier les organes fragiles nécessitant une priorité d'action, on fait l'analyse aussi par familles de natures de défaillances (défaillance électrique, mécanique, hydraulique, pneumatique, informatique etc) pour identifier la nature des défaillances la plus pénalisante et qui nécessite la priorité d'action.

Étape 4 : Analyse : Diagramme de Pareto en 'n', 't' et 'n.t'.

Avec 'n' : nombre de défaillances enregistrées par famille ;
't' : moyennes des durées d'interventions consécutives à ses défaillances ;
'n.t' : (Indisponibilité) c'est un produit artificiel des données précédentes.

On trace les diagrammes :

- **Diagramme en 'n' :** Pour l'amélioration de la **fiabilité** (augmenter le TBF, diminuer λ) des sous-ensembles fragiles nécessitant une priorité d'action. Pour les actions envisageables, voir étape 5.
- **Diagramme en 't' :** Pour l'amélioration de la **maintenabilité** (minimiser le MTTR) concernant les pannes ayant un temps d'arrêt (de réparation) durable. Ceci pour identifier Les pannes durables nécessitant une priorité d'action. Pour les actions envisageables, voir étape 5.
- **Diagramme en 'nt' :** Pour l'amélioration de la disponibilité par actions sur les sous-ensembles qui affectent la performance de l'ensemble.

Ce graphe résout simplement un problème moins évident qu'il n'y paraît et sans mesures (quelles sont les pannes prioritaires à réduire et quel est leur impact sur la disponibilité ? quelles défaillances faut-il analyser ?...etc)

Remarque : Ce diagramme ($N \cdot MTA = \Sigma TA$) est proportionnel aux coûts d'arrêt et de pertes de production. Ce qui rend cet outil exploitable pour dégager des priorités d'action sur des bases de criticité économique.

Étape 5 : Interprétation et analyse des graphiques : sur la base des graphiques, faire ressortir les organes fragiles ou pannes durables nécessitant une priorité d'action

Étape 6 : Actions d'améliorations possible pour chacun des organes (pannes) nécessitant une priorité d'action.

- **Amélioration de la fiabilité** (Diagramme en 'n') : Les actions d'amélioration envisageables sont :
 - maintenance préventive (appliquée surtout aux petites pannes répétitives) ;
 - des modifications techniques (changer de marque de composant, affiner les réglages, appliquer le diagnostic et ses remèdes etc) ;
 - des modifications d'organisation (surveillance accrue, fiches d'auto-maintenance, consignes de conduite etc) ;
 - Autres.
- **Amélioration de la maintenabilité** (Diagramme en 't') : Les actions d'améliorations envisageables sont : On sait que la maintenabilité est essentiellement prédéfinie à la conception, c'est pourquoi les pistes d'amélioration porteront sur :
 - la préparation du travail (gammes opératoire (d'intervention),
 - la disponibilité de l'outillage, testeurs, moyens à disposition) ;
 - la disponibilité des pièces de rechanges avec une bonne préconisation) ;

- la réalisation des interventions par le mode « interchangeabilité des modules » puis à réparer en temps différé.
- sur la formation et l'efficacité des techniciens ;
- Autres.

Remarque : Il est toujours plus efficace d'éviter l'apparition (suppression de la panne par action sur les causes) d'une panne que de vouloir réduire la durée de l'arrêt de cette panne.

- **Amélioration de la disponibilité** (diagramme en 'nt') : par actions sur les sous-ensembles qui affectent la performance de l'ensemble.

Remarque : Ce diagramme ($N \cdot MTA = \Sigma TA$) est proportionnel aux coûts d'arrêt et de pertes de production. Ce qui rend cet outil exploitable pour dégager des priorités d'action sur des bases de criticité économique.

Pour les aspects techniques il faut faire l'analyse au niveau des aspects 'n' fiabilité et 't' maintenabilité.

Les actions d'amélioration de la disponibilité, résident en l'amélioration des aspects Fiabilité et maintenabilité.

4.4. Application :

Une machine comporte 10 sous-ensembles dont on a relevé l'historique des temps d'arrêt. L'entreprise, qui utilise cette machine, désire augmenter sa productivité en diminuant les temps d'arrêts sérieux. Pour cela elle demande au service de maintenance de définir des priorités sur les améliorations à apporter à cette machine. L'historique de la machine fournit le tableau suivant (On considère que les défaillances extrinsèques sont déjà éliminées).

Sous-systèmes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre d'arrêt d'heures (TTR)	5	4	35	25	15	7	10	3	50	2

Solution :

Après classement des événements (temps de réparation TTR) par ordre décroissant, puis calcul des valeurs cumulées (valeurs absolue et en %), on obtient le tableau suivant :

S/systèmes	TTR (h)	Valeurs cumulées (TTR)	
		Valeur absolue	%
9	50	50	$(50/156) \times 100 = 32 \%$
3	35	$50 + 35 = 85$	$585/156 \times 100 = 54,5$
4	25	$85 + 25 = 110$	70,5
5	15	125	80,1
7	10	135	86,5
6	7	142	91
1	5	147	94,2
2	4	151	96,8
8	3	154	98,7
10	2	156	100 %

A partir du tableau ci-dessus, on construit le diagramme de Pareto (figure 3.5). Les cases (en couleurs) nous donnent les limites des zones A, B et C.

Il est donc évident qu'une amélioration de la fiabilité sur les sous-systèmes 9, 3 et 4 peut procurer jusqu'à 70,5 % de gain sur les temps de réparation.

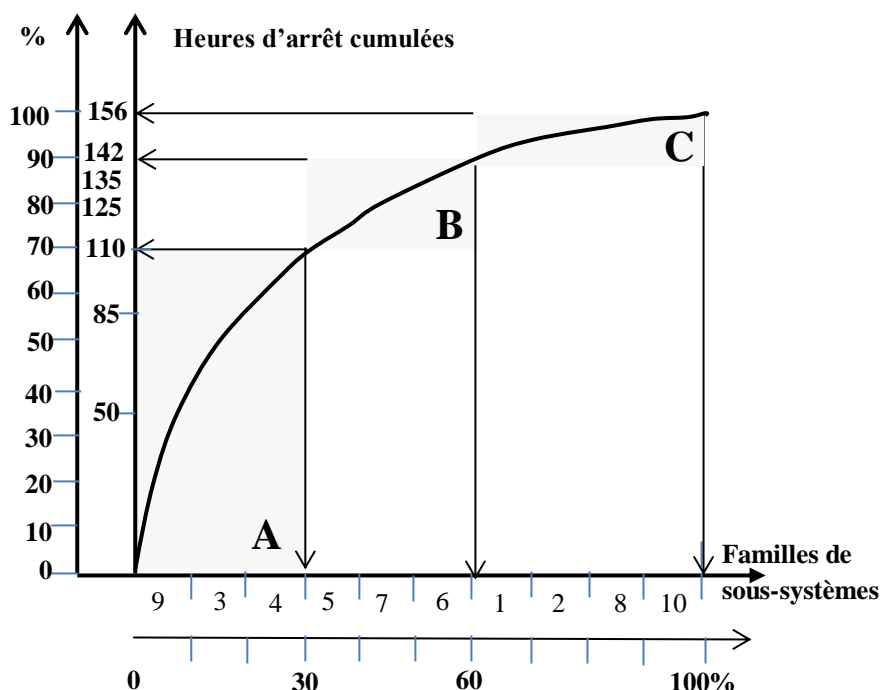


Figure 3.5 : Courbe ABC.

Interprétation : Analyse.

Le tracé de la courbe ABC fait ressortir les résultats suivants :

- Zone A : 30% des sous-systèmes cumulent 70% des heures d'arrêt.
- Zone B : 30% (60% - 30%) des sous-systèmes cumulent 21% (91 - 70%) des heures d'arrêt.
- Zone C : 40% (100% - 60%) des sous-systèmes cumulent 9% (100% - 91%) des heures d'arrêt.

Le service maintenance devra donc en priorité améliorer les sous-systèmes de la zone A, soit les sous-systèmes: 9, 3 et 4.

Actions d'améliorations envisageables : Pour chacun des sous-systèmes nécessitant une priorité d'action pour réduire le temps total de réparation et par suite améliorer la maintenabilité, le service maintenance doit faire une analyse très poussée et revoir les points cités dans l'étape 5.

Chapitre IV : ANALYSE DE LA FIABILITE PAR LES LOIS DE PROBABILITES.

1. Introduction

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs équipements au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service afin de maîtriser les sources de défaillance et par conséquent maîtriser les coûts.

2. Notions / variables aléatoires, densité de probabilité et fonction de répartition.

2.1. Variable aléatoire : On appelle variable X , une variable telle qu'à chacune valeur x de X on puisse associer une probabilité $F(x)$.

$$X : \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\} \implies F(x_i).$$

Une variable aléatoire peut être :

- **Continue :** Peut prendre n'importe quelle valeur réelle (ensemble des nombres réels) appartenant à un intervalle donnée.
Exemple : intervalle de temps entre deux défaillances consécutives (t_1, t_2).
- **Discrète (discontinue) :** Peut prendre n'importe quelle valeur entière (ensemble des nombres naturels).
Exemple : nombre de défaillances d'un composant.

2.2. Densité de probabilité et fonction de répartition.

Soit une loi de probabilité relative à une variable aléatoire continue t , elle est caractérisée par sa fonction sa fonction de distribution (densité de probabilité) $f(t)$ et sa fonction de répartition $F(t)$, telles que :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}(t < T < t + dt)}{dt}$$

La fonction de répartition $F(t)$ représente la probabilité qu'un événement (une défaillance) survienne à l'instant T dans l'intervalle $(0, t)$. $F(t) = P(T < t)$.

- **Représentations graphiques de $f(t)$ et $F(t)$:**

$F(t)$: Probabilité qu'une défaillance soit survenue à l'instant T dans l'intervalle $(0, t)$

$f(t)$: Probabilité de défaillances entre t et $t+dt$ à l'instant T dans l'intervalle $(0, t)$

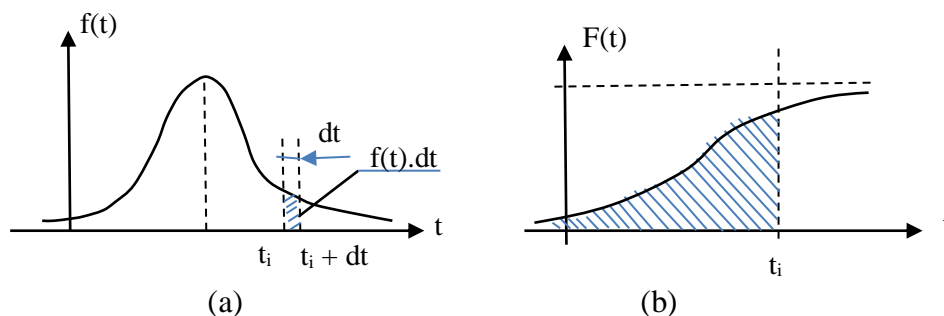


Figure 4.1 : Fonction de densité de probabilité (a) et de fonction de répartition (b)

2.3. Les fonctions fiabilité et défiabilité :

Un dispositif mis en marche pour la première fois à 't₀' tombera inévitablement en panne à un instant T non connu a priori.

T, date de la panne, est une variable aléatoire de fonction de répartition F(t).

F(t) est la probabilité d'une défaillance avant t_i.

R(t) est la probabilité de bon fonctionnement à t_i. C'est une fonction monotone décroissante.

R(t) et F(t) sont des probabilités complémentaires, telles que : $R(t) + F(t) = 1$

R(t) : Fonction de fiabilité (survie) ; F(t) : fonction de défiabilité (fonction de panne).

$$\int_0^t f(t)dt + \int_t^{+\infty} f(t)dt = 1$$

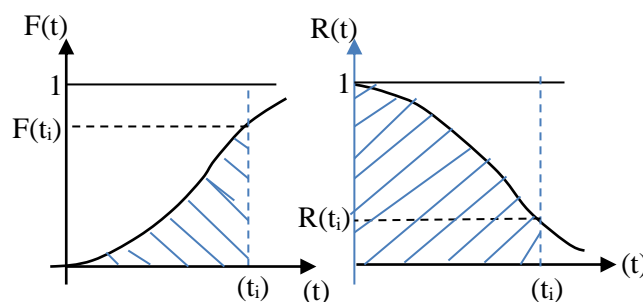


Figure 4.2 : Probabilités complémentaires F(t) et R(t)

2.4. Détermination expérimentale de la fiabilité.

La fiabilité est définie comme l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données pour une période de temps donnée.

Elle est caractérisée par la probabilité R(t) que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps [0, t], sachant que l'entité n'est pas en panne à l'instant 0.

$$R(t) = P [E \text{ non défaillant sur } (0, t)]$$

Pour évaluer la fiabilité d'un système, il est nécessaire de savoir comment il devient défaillant dans le temps : la loi de survie le précise. Le taux de défaillance indique le comportement d'un dispositif d'un âge donné dans le futur immédiat.

On soumet à l'essai un échantillon de taille dans les mêmes conditions soit :

- $N_s(t)$ le nombre de survivants à l'instant t
- $N_f(t)$ le nombre de défaillants à l'instant t .
- N nombre d'échantillon initial.

$$N_s(t) + N_f(t) = 1 \quad \text{donc} \quad \frac{N_s(t)}{N} = \frac{N - N_f(t)}{N} = \frac{N(t)}{N}$$

Si $N \rightarrow \infty$ $\frac{N(t)}{N}$ tend vers la fiabilité du système $R(t) = \frac{N(t)}{N}$

2.5. Le taux de défaillance instantané.

Comme nous avons vu au chapitre III que la défaillance est la cessation d'une aptitude à accomplir une fonction requise, c'est le passage de l'état de fonctionnement à l'état de panne.

On distinguera sa cause (circonstances ayant entraîné la défaillance), son mode ou mécanisme (processus ayant entraîné la défaillance) et son taux $\lambda(t)$ qui représente la proportion de dispositifs qui, ayant vécu un temps t , ne sont plus en vie à $t + dt$.

Le taux de défaillance s'exprime de la façon suivante :

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillances sur un intervalle de temps}}{\text{nombre de survivants au début de la période } X \text{ intervalle de temps d'utilisation}}$$

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillances au de } \Delta t}{\text{nombre de survivants au début de la période } X \Delta t}$$

Si $\Delta t \rightarrow dt$ alors :

$$\lambda(t) = \frac{\text{nombre de défaillances au cours de } \Delta t}{\text{nombre de survivants au début de la période}} \times \frac{1}{dt}$$

$$\lambda(t).dt = \frac{F(t + dt) - F(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)}{1 - F(t)}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{R(t)} \longrightarrow dF(t) = f(t).R(t) \longrightarrow \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

2.6. Analyse de la fiabilité à partir des lois de probabilité.

Nous présentons dans ce paragraphe les lois de fiabilité les plus couramment utilisées en maintenance.

2.6.1. Loi normale

La loi normale appelée aussi loi de Gauss-normale est très répandue et la plus utile parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes.

C'est la loi à deux paramètres : La moyenne (m ou parfois μ) et l'écart type σ

➤ Domaine d'application :

En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie de dispositifs en fin de vie (usure), c'est-à-dire en phase de vieillesse (voir courbe en baignoire) car le taux de défaillance est toujours croissant.

Remarques : La loi normale est une loi qui s'adapte au domaine mécanique car les défaillances sont essentiellement dues à l'usure.

Utilisée uniquement lorsque ($m > 3x \sigma$). En effet, t est toujours positif, alors que la variable normale est définie de $-\infty$ à $+\infty$.

➤ Caractéristiques de la loi normale.

- La densité de probabilité :
$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}$$
- La fonction de répartition :
$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

La fiabilité est donnée par : $R(t) = 1 - \theta((t - \mu) / \sigma)$

Où θ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite : ($\mu=0, \sigma=1$):

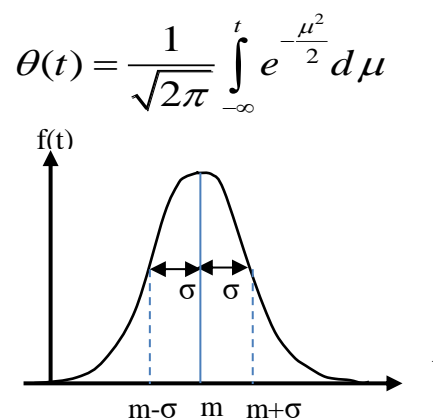


Figure. 4.3 : La densité de probabilité / loi normale.

2.6.2. Analyse de la fiabilité à partir de la loi exponentielle

➤ **Domaine d'utilisation :**

La loi exponentielle en fiabilité est utilisée lorsque le taux de défaillance d'un système ou d'un composant est sensiblement constant ($\lambda = \text{constant}$), ceci dit que la loi exponentielle s'applique lorsque le système se trouve en phase de maturité (voir courbe en baignoire)

Dans ce cas les défaillances naissent sous l'action de causes diverses et indépendantes. Contrairement à la période de vieillesse pendant laquelle une ou plusieurs modes de défaillances prédominent (qui se répètent).

C'est le seul cas où $\lambda = \frac{1}{MTBF}$ (taux de panne) ; $\mu = \frac{1}{MTBF}$ (taux de réparation)

➤ **Origine de la loi exponentielle :**

La loi de Poisson (loi discrète) : La réalisation d'événements aléatoires dans le temps se nomme « processus de Poisson ». Il caractérise une suite de défaillances équiprobables, indépendantes du temps et indépendantes entre elles.

Dans ce cas, la probabilité de constater k pannes à l'instant t s'exprime par la loi de Poisson :

$$P(k) = \frac{\lambda t}{k!} e^{-\lambda t}$$

À l'instant t, la fiabilité est la probabilité pour qu'il n'y ait pas de panne à t.

Elle s'écrit : $R(t) = P(k = 0) = e^{-\lambda t}$ ($a^0 = 1$)

➤ **Caractéristiques de la loi exponentielle :**

Elle se retrouve à partir de la loi fondamentale de la fiabilité avec λ constant.

La probabilité de survie entre 0 et t devient :

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

Densité de probabilité : $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1-R(t))}{dt} = \frac{d(1-e^{-\lambda t})}{dt} = \lambda e^{-\lambda t}$

Fonction de répartition : $F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ = probabilité de panne entre 0 et t.

Espérance mathématique : $E(t) = 1/\lambda = MTBF$.

Ecart type : $\sigma = 1/\lambda$.

Le taux de défaillance : $\lambda = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{constant}$

Durée de vie associée à un seuil de fiabilité : tirons t de la loi exponentielle :

$-\lambda t = \ln R(t)$ soit $t = \ln \lambda R(t)$ soit $t = (1/\lambda) \ln 1/R(t)$.

La moyenne des temps de fonctionnement (MTTF) ou de bon fonctionnement (MTBF) un important estimateur de la fiabilité et de la disponibilité des systèmes et se calcul par l'expression :

$$MTBF = MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Par exemple, pour un composant de $MTBF = 2\,000$ h et un seuil $R(t) = 0,9$, on aura $t = 0,105 / \lambda = 0,105 \cdot MTBF$, d'où la valeur $t = 210$ h telle que 90 % des composants survivent.

➤ **Caractéristiques de la loi exponentielle**

La représentation linéaire de la loi exponentielle s'obtient :

Avec $R(t) = e^{-\lambda t}$ donne $\ln R(t) = -\lambda t$; (ln : logarithmes népériens).

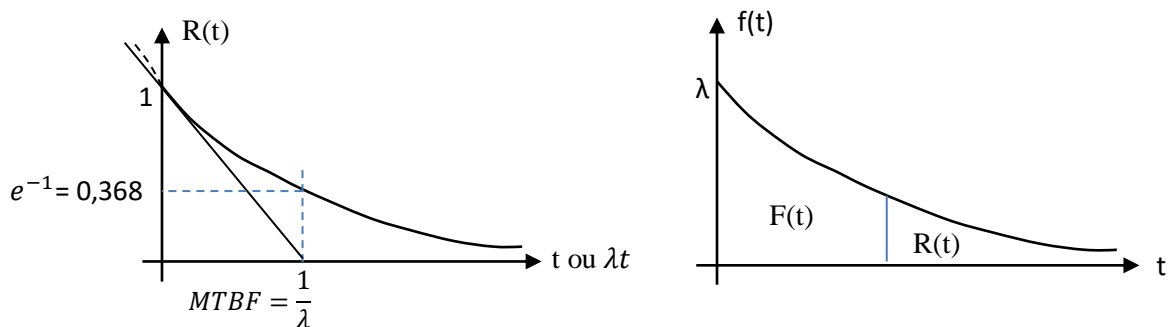


Figure 4.4 : Représentation graphique de la loi exponentielle de paramètre λ .

2.6.3. Analyse de la fiabilité par la loi de Weibull

En fiabilité, c'est la plus répandue des lois, utilisées dans plusieurs domaines (électronique, mécanique,...). Cette loi permet d'ajuster toutes sortes de résultats expérimentaux et opérationnels.

Elle caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement.

➤ **Domaine d'application**

La loi de Weibull caractérise le comportement du système dans les trois phases de vie, c'est-à-dire elle est utilisée dans les phases : de jeunesse (λ décroissant), de maturité (λ constant) et la phase de vieillissement (λ croissant).

Son utilisation fournit :

- une estimation de la MTBF;
- les fonctions $R(t)$ et de $\lambda(t)$, et leurs variations sous forme graphique ;
- fournit aussi le paramètre de forme β qui peut orienter un diagnostic, sa valeur caractérise certains modes de défaillance.

➤ **Caractéristiques de la loi de Weibull.**

Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η et γ .

Où : β est appelé paramètre de forme ($\beta > 0$) : suivant la valeur de que β est supérieur, égal ou inférieur à 1, la loi de Weibull correspond à un taux de défaillance instantané croissant, constant ou décroissant.

Paramètre de forme β : C'est un paramètre sans dimension. Il détermine la forme de la distribution $f(t)$ des défaillances d'un système et que sa valeur caractérise chacune des trois phases de la vie d'un système :

- $\beta < 1$: phase de jeunesse avec défaillances (généralement des défauts de fabrication ou de montage) ;
- $\beta = 1$: phase de maturité avec défaillances aléatoires. Ce cas particulier correspond au taux de défaillance constant, c'est-à-dire on retrouve la distribution exponentielle, cas particulier de la loi de Weibull. Dans ce cas : $\lambda = \frac{1}{\eta}$
- $\beta > 1$ phase de vieillesse avec apparition d'un mode de défaillance prédominant caractérisé par β . Le paramètre de forme peut aussi servir d'indicateur de diagnostic, certaines valeurs de β étant caractéristiques d'un mode de défaillance particulier.

Le paramètre d'échelle η : appelé paramètre d'échelle ($\eta > 0$), caractérisant le choix d'une échelle, il s'exprime dans la même unité de temps (heures ou cycles) que les TBFi.

Remarque : plus η est faible plus la fonction de distribution $f(t)$ est aplatie.

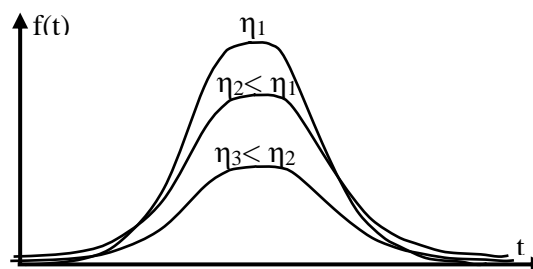


Figure 4.5 : fonction de distribution pour différentes valeurs de η

Le paramètre de localisation γ : ($-\infty < \gamma < +\infty$) Également nommé paramètre de décalage ou de position, il s'exprime en unité de temps. Il indique la date de l'apparition du mode de défaillance caractérisé par β .

- Si $\gamma > 0$, il y a survie totale entre $t = 0$ et $t = \gamma$. C'est-à-dire le $MTTF = t = \gamma$.
- Si $\gamma = 0$, les défaillances débutent à l'origine des temps.
- Si $\gamma < 0$, les défaillances ont débuté avant l'origine des temps relevés, ce qui montre que la mise en service de l'équipement étudié a précédé la mise en historique des TBF. C'est-à-dire que dans ce cas l'équipement a fonctionné puis tombé en panne sans relevés des défaillances de la part du service maintenance (dossier historique non établie dans le temps).

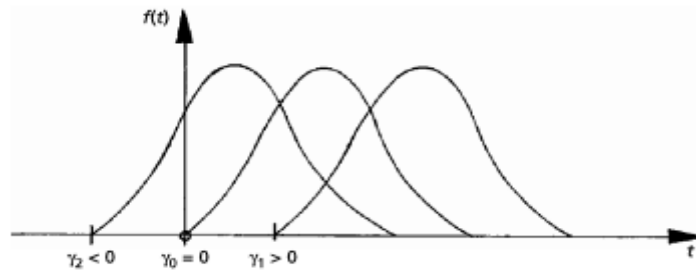


Figure 4.6 : Fonction de distribution pour différentes valeurs de γ .

La densité de probabilité :
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

La fonction fiabilité s'écrit:
$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

Le taux de défaillance est donnée par :
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

Caractéristiques des fonctions : densité de probabilité $f(t)$, Fiabilité $R(t)$ et taux de défaillance $\lambda(t)$ pour différentes valeurs du paramètre de forme β .

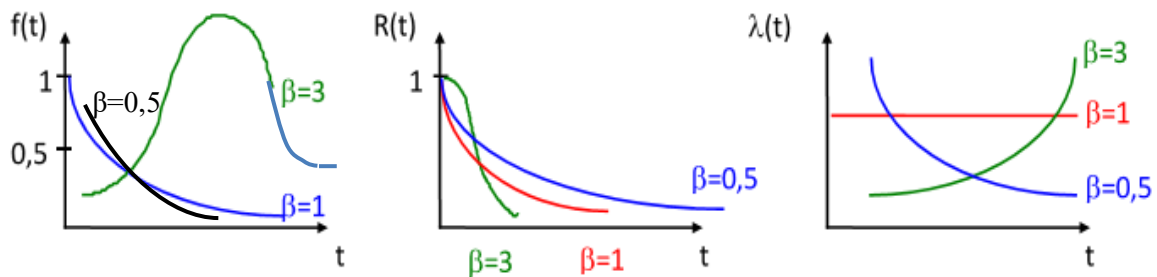


Figure 4.7 : Caractéristiques $f(t)$, $R(t)$ et $\lambda(t)$ pour différentes valeurs de β / loi Weibull.

➤ **Approximation de la fonction de répartition $F(t)$:**

1) Préparation des données :

- Recensement des données historiques (l'ensemble des TBF_i de la période mise à l'analyse) ;
- Elimination des défaillances extrinsèques ;
- Classement des TBF_i par ordre croissant ;
- Attribuer un ordre (i) pour chacun des TBF_i avec $1 \leq i \leq N$; avec N : taille de l'échantillon.
-

2) Corrections : approximation de F(i) et R(i)

- On utilise les modèles de corrections suivants en fonction de N :

Si $N \leq 20$, on utilise l'approximation par les rangs médians : $F(i) = \frac{i-0,3}{N+1}$

Si $20 < N < 50$, on utilise l'approximation des rangs moyens : $F(i) = \frac{i}{N+1}$

Si $N \geq 50$, on utilise l'approximation des rangs bruts : $F(i) = \frac{i}{N}$

Et par suite : $R(i) = 1 - F(i)$

➤ **Détermination de la MTBF et l'intervalle de la bande de confiance.**

- **Détermination de la MTBF :** A partir d'une étude de Weibull, la connaissance de la MTBF d'un système, ou d'un composant sensible est indispensable pour optimiser un plan de maintenance préventive systématique (période d'intervention $T = k \times \text{MTBF}$). Le problème étant l'estimation de la période de changement systématique à accorder à la valeur de MTBF.

A partir des tables numériques pour une loi de Weibull (voir annexe 1) donnant les coefficients A et B :

À chaque valeur de β obtenue sont associés deux coefficients A et B tels que :

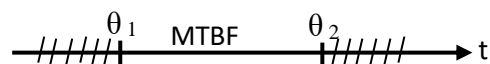
La durée de vie moyenne est donnée par : $\text{MTBF} = A\eta + \gamma$

L'écart-type est donné par : $\sigma = B\eta$.

- **Estimation de l'intervalle de la bande de confiance :** Lorsque l'échantillonnage est réduit ($N \leq 20$), on cherche quel niveau de confiance accorder à l'MTBF obtenue. Dans ce cas il est indispensable de « relativiser » la valeur de MTBF par un encadrement de cette valeur dans un intervalle de confiance.

En effet, la signification de ce résultat probabiliste est fonction de la taille N de l'échantillon et du niveau de confiance choisi (le plus souvent la valeur 0,9).

Les tables donnant le niveau inférieur (θ_1) de la bande de confiance à 90% (Annexe 2a), et les tables donnant le niveau supérieur (θ_2) de la bande de confiance à 90% (Annexe 2(b)).



On rappelle que ces tables sont relatives à l'approximation de F(t) par les rangs médians ($N \leq 20$) et F(t) est exprimé en %.

Exemple (Tableau de préparation des données) : on suppose taille de l'échantillon $N=13 < 20$, on utilise donc l'approximation de F(t) par les rangs médians.

Ordre (i)	TBF (h) Cycle avant panne	F(i) (%)	Niveau inférieur (θ_1)	Niveau inférieur (θ_2)
1	$[(1-0,3) / (13+0,4)] \times 100 = 5,22$	0,394	20,582
2	$[(2-0,3) / (13+0,4)] \times 100 = 12,6$	2,805	31,634
3	20,1	6,605	41,010
.....
.....
N	94,77	79,418	99,606

➤ Description du papier de Weibull.

- l'axe des TBF_i : est l'axe des temps (ou bien unité d'usage) sur lequel nous porterons les valeurs t_i de durées de bon fonctionnement (TBF_i) ;
- l'axe des F(t) : sur lequel nous porterons les valeurs e F(i) calculées par approximation (rangs moyens ou rangs médians). Nous estimerons la fiabilité en prenant le complément : $R(t) = 1 - F(t)$;
- l'axe des β : correspond à $\ln \ln (1/1 - F(t))$. Cet axe permettra d'évaluer la valeur de β .

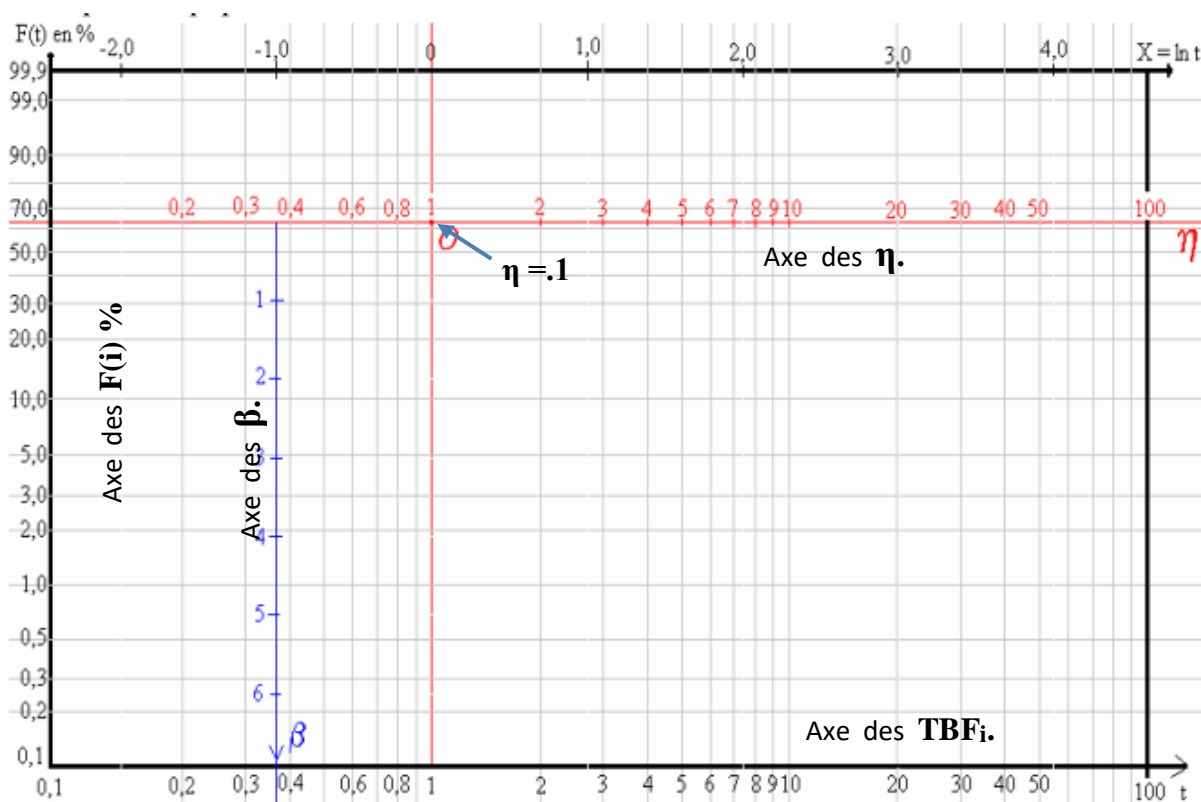


Figure 4.8 : Papier graphique de Weibull.

➤ **Méthodologie de l'analyse de fiabilité par le modèle de Weibull.**

1. Préparation des données ;
2. Détermination des paramètres de Weibull (β , η , γ)
 - 2.1. Tracé du nuage de points (TBF_i , $F(i)$) : Portons sur le papier de Weibull sur l'axe des TBF_i les valeurs des TBF_i et sur l'axe des $F(i)$ les valeurs $F(i)$, on obtient un nuage de points. (Rappel : on porte $F(i)$ en %).
 - 2.2. Tracé de la droite D1 : nous ajustons le nuage de points par une droite D1 au jugé (à l'œil nu) ou bien par l'utilisation de la méthode des moindres carrés. L'intersection de la droite D1 coupe l'axe des η en un point $t = \eta$ qui donne la valeur de η recherchée.
 - 2.3. Tracé de la droite D2 parallèle à D1 et qui passe par l'origine ($\eta = 1$). L'intersection de D2 avec l'axe des β donne la valeur de β recherchée.
 - 2.4. Détermination de γ :

Lorsque le nuage de point donne une droite donc sans redressement, cela veut dire que $\gamma = 0$ (paramètre de position en heures), c'est-à-dire que $\lambda = \text{constant}$ et l'équipement se trouve en phase de maturité. $R(t) = e^{-\frac{1}{\eta}t}$, donc Δ

Lorsque le nuage de point fait apparaître une des courbes (concave ou convexe), alors le paramètre γ est non nul $\gamma \neq 0$ à déterminer après avoir effectué un redressement. Ce redressement peut se faire par application de la formule de redressement.

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

Portons 03 points a_1, a_2 et a_3 sur la courbe tels que $(a_1, a_2) = (a_2, a_3) = \Delta$. Il est conseillé de prendre des points espacés mais non extrêmes, puis nous lisons les valeurs t_1, t_2 et t_3 sur l'axe des temps, il reste à appliquer la formule pour trouver γ puis après on trace la droite D1. Par la suite pour la détermination des paramètres β et η nous devons suivre le même raisonnement que pour le cas où le nuage de point donne directement une droite D1 (voir paragraphe ci-dessus).

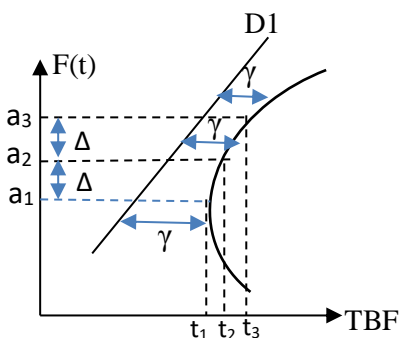


Figure 4.9 : Courbe convexe : $\gamma > 0$

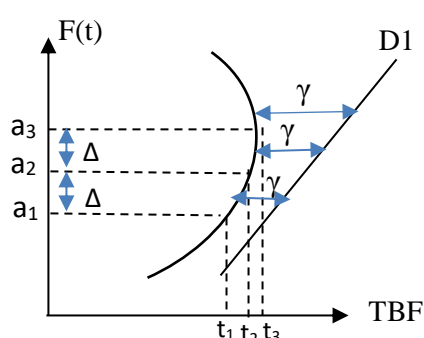


Figure 4.9 : Courbe concave : $\gamma < 0$

3. Ecriture de l'équation de la loi de Weibull $R(t)$: En substituant les paramètres de weibull (β , η , γ) dans l'équation et représenter sur un graphique les fonctions ($f(t)$, $R(t)$, $\lambda(t)$, $F(t)$).
6. Détermination de la MTBF (et de l'intervalle de confiance éventuellement).
7. Exploitation des résultats.

➤ **Exemple d'application :**

Les durées de vie de 06 appareils sont les suivantes (en heures) :
515 ; 165 ; 1320; 330 ; 740 ; 915.

1. Préparation des données :

On fait un tableau qui présente les valeurs de $F(i)$: Classement des TBF_i par ordre croissant et on donne un ordre i à chaque TBF_i .

Comme la taille de l'échantillon $N=6 < 20$, on utilise l'approximation de $F(t)$ par les rangs médians. On obtient le tableau ci-après.

Ordre i	1	2	6	4	5	6
TBF_i	165	330	515	740	915	1320
$F(i)$ %	11	26	42	58	73	89

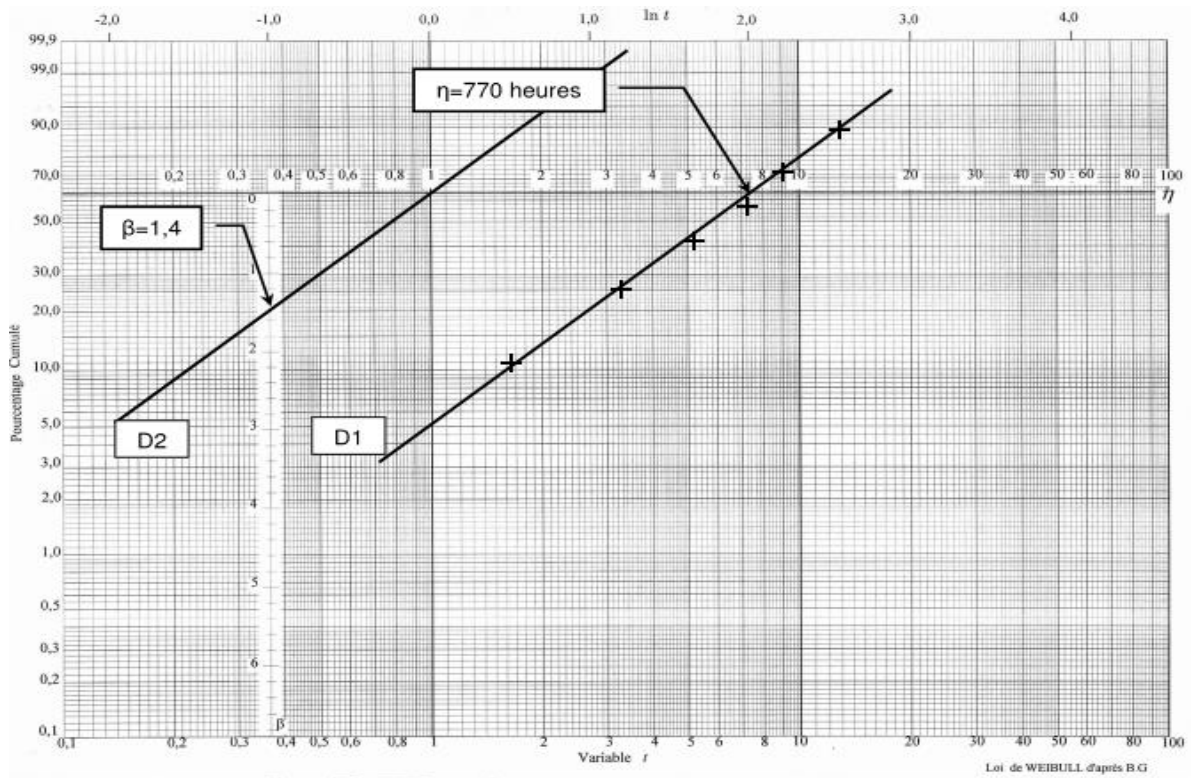
2. Tracé des nuages de points.
3. Tracé de la droite D1 au jugé, l'intersection de D1 avec l'axe des η , donne la valeur de $t = \eta = 770$ heures
Le fait d'obtenir directement une droite D1 sans faire de redressements indique que $\gamma = 0$ (paramètre de position)
4. La droite D2, // à D1, passant par l'origine ($\eta = 1$) coupe l'axe des η en un point qui donne la valeur du paramètre de forme $\beta = 1,4$.
5. Ecriture de l'équation de la loi :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \qquad R(t) = e^{-\left(\frac{t-0}{770}\right)^{1,4}}$$

6. Détermination de la MTBF : Les tables en annexes donnent les valeurs de A et B pour $\beta=1,4$: $A=0,911$ et $B=0,660$.

On en déduit : $MTBF = A\eta + \gamma = 0,911 \times 770 = 700$ heures.

$$\sigma = B\eta = 0,660 \times 770 = 508 \text{ heures.}$$



ANNEXE 1 :

Table de la loi de Weibull.

Cette table permet de déterminer les coefficients A et B, selon la valeur du paramètre β .

Moyenne : $MTBF = A \eta + \gamma$

Ecart type : $\sigma = B \eta$.

β	A	B	β	A	B	β	A	B	β	A	B
0,05	2,43290E+18	9,03280E+23	1,75	0,89062	0,52523	3,45	0,89907	0,28822	5,15	0,91974	0,20505
0,1	3,62880E+06	1,55977E+09	1,8	0,88929	0,51123	3,5	0,89975	0,28473	5,2	0,92025	0,20336
0,15	2,59357E+03	1,21993E+05	1,85	0,88821	0,49811	3,55	0,90043	0,28133	5,25	0,92075	0,20170
0,2	1,20000E+02	1,90116E+03	1,9	0,88736	0,48579	3,6	0,90111	0,27802	5,3	0,92125	0,20006
0,25	2,40000E+01	1,99359E+02	1,95	0,88671	0,47419	3,65	0,90178	0,27479	5,35	0,92175	0,19846
0,3	9,26053E+00	5,00780E+01	2	0,88623	0,46325	3,7	0,90245	0,27164	5,4	0,92224	0,19688
0,35	5,02914E+00	1,99761E+01	2,05	0,88589	0,45291	3,75	0,90312	0,26857	5,45	0,92272	0,19532
0,4	3,32335E+00	1,04382E+01	2,1	0,88569	0,44310	3,8	0,90379	0,26558	5,5	0,92320	0,19379
0,45	2,47859E+00	6,46009E+00	2,15	0,88561	0,43380	3,85	0,90445	0,26266	5,55	0,92368	0,19229
0,5	2,00000E+00	4,47214E+00	2,2	0,88562	0,42495	3,9	0,90510	0,25980	5,6	0,92414	0,19081
0,55	1,70243E+00	3,34530E+00	2,25	0,88573	0,41652	3,95	0,90576	0,25701	5,65	0,92461	0,18935
0,6	1,50458E+00	2,64514E+00	2,3	0,88591	0,40848	4	0,90640	0,25429	5,7	0,92507	0,18792
0,65	1,36627E+00	2,17887E+00	2,35	0,88617	0,40080	4,05	0,90704	0,25162	5,75	0,92552	0,18651
0,7	1,26582E+00	1,85117E+00	2,4	0,88648	0,39345	4,1	0,90768	0,24902	5,8	0,92597	0,18512
0,75	1,19064	1,61077	2,45	0,88685	0,38642	4,15	0,90831	0,24647	5,85	0,92641	0,18375
0,8	1,13300	1,42816	2,5	0,88726	0,37967	4,2	0,90894	0,24398	5,9	0,92685	0,18240
0,85	1,08796	1,28542	2,55	0,88772	0,37319	4,25	0,90956	0,24154	5,95	0,92729	0,18107
0,9	1,05218	1,17111	2,6	0,88821	0,36696	4,3	0,91017	0,23915	6	0,92772	0,17977
0,95	1,02341	1,07769	2,65	0,88873	0,36097	4,35	0,91078	0,23682	6,05	0,92815	0,17848
1	1,00000	1,00000	2,7	0,88928	0,35520	4,4	0,91138	0,23453	6,1	0,92857	0,17721
1,05	0,98079	0,93440	2,75	0,88986	0,34963	4,45	0,91198	0,23229	6,15	0,92898	0,17596
1,1	0,96491	0,87828	2,8	0,89045	0,34427	4,5	0,91257	0,23009	6,2	0,92940	0,17473
1,15	0,95170	0,82971	2,85	0,89106	0,33909	4,55	0,91316	0,22793	6,25	0,92980	0,17351
1,2	0,94066	0,78724	2,9	0,89169	0,33408	4,6	0,91374	0,22582	6,3	0,93021	0,17232
1,25	0,93138	0,74977	2,95	0,89233	0,32924	4,65	0,91431	0,22375	6,35	0,93061	0,17113
1,3	0,92358	0,71644	3	0,89298	0,32455	4,7	0,91488	0,22172	6,4	0,93100	0,16997
1,35	0,91699	0,68657	3,05	0,89364	0,32001	4,75	0,91544	0,21973	6,45	0,93139	0,16882
1,4	0,91142	0,65964	3,1	0,89431	0,31561	4,8	0,91600	0,21778	6,5	0,93178	0,16769
1,45	0,90672	0,63522	3,15	0,89498	0,31135	4,85	0,91655	0,21586	6,55	0,93216	0,16657
1,5	0,90275	0,61294	3,2	0,89565	0,30721	4,9	0,91710	0,21397	6,6	0,93254	0,16547
1,55	0,89939	0,59252	3,25	0,89633	0,30319	4,95	0,91764	0,21212	6,65	0,93292	0,16439
1,6	0,89657	0,57372	3,3	0,89702	0,29929	5	0,91817	0,21031	6,7	0,93329	0,16332
1,65	0,89421	0,55635	3,35	0,89770	0,29550	5,05	0,91870	0,20853	6,75	0,93366	0,16226
1,7	0,89224	0,54024	3,4	0,89838	0,29181	5,1	0,91922	0,20677	6,8	0,93402	0,16121

ANNEXE 2 (a)

Cette table permet le tracé du niveau à 95 %, niveau supérieur de la bande de confiance à 90 %

Tables numériques donnant les rangs médians à 5 %

Ordre de rang	Taille de l'échantillon = N									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	95,000	77,639	63,160	52,713	45,072	39,304	34,816	31,234	28,313	25,887
2		97,468	86,465	75,139	65,741	58,180	52,070	47,068	42,914	39,416
3			98,305	90,239	81,075	72,866	65,874	59,969	54,964	50,690
4				98,726	92,356	84,684	77,468	71,076	65,506	60,662
5					98,979	93,715	87,124	80,710	74,863	77,756
6						99,149	94,662	88,889	83,125	77,756
7							99,270	95,361	90,225	84,997
8								99,361	95,898	91,274
9									99,432	96,323
10										99,482

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	23,840	22,092	20,582	19,264	18,104	17,075	16,157	15,332	14,589	13,911
2	36,436	33,868	31,634	29,673	27,940	26,396	25,012	23,766	22,637	21,611
3	47,009	43,811	41,010	38,539	36,344	34,383	32,619	31,026	29,580	28,262
4	56,437	52,733	49,465	46,566	43,978	41,657	39,564	37,668	35,943	34,366
5	65,019	60,914	57,262	54,000	51,075	48,440	46,055	43,888	41,912	40,103
6	72,875	68,476	64,520	60,958	57,744	54,835	52,192	49,783	47,580	45,558
7	80,042	75,470	71,295	67,49	64,043	60,899	58,029	55,404	52,997	50,782
8	86,492	81,898	77,604	73,641	70,001	66,663	63,599	60,780	58,194	55,803
9	92,118	87,715	83,434	79,393	75,627	72,140	68,917	65,940	63,188	60,641
10	96,668	92,813	88,733	84,728	80,913	77,331	73,989	70,880	67,991	65,307
11	99,535	96,954	93,395	89,595	85,834	82,223	78,809	75,604	72,605	69,805
12		99,573	97,195	93,890	90,334	86,789	83,364	80,105	77,028	74,135
13			99,606	97,400	94,315	90,975	87,623	84,366	81,250	78,293
14				99,634	97,577	94,685	91,535	88,357	85,253	82,269
15					99,680	97,732	95,010	92,030	89,009	86,045
16						99,680	97,868	95,297	92,471	89,592
17							99,699	97,989	95,553	92,865
18								99,730	98,097	95,783
19									99,730	98,193
20										99,744

ANNEXE 2 (b)

Cette table permet le tracé du niveau à 95 % (niveau supérieur de la bande de confiance à 90 %).

Tables numériques donnant les rangs médians à 95 %

Ordre de rang	Taille de l'échantillon									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5,000	2,532	1,699	1,274	1,021	0,851	0,730	0,639	0,568	0,512
2		22,361	13,535	9,761	7,644	6,285	5,337	4,639	4,102	3,677
3			36,840	24,860	18,925	15,316	12,876	11,111	9,775	8,726
4				47,287	34,259	27,134	22,532	19,290	16,875	15,003
5					54,928	41,820	34,126	28,924	25,137	22,244
6						60,696	47,930	40,031	34,494	30,354
7							65,184	52,932	45,036	39,338
8								65,766	57,086	49,310
9									71,687	60,584
10										74,113

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,465	0,426	0,394	0,366	0,341	0,320	0,301	0,285	0,270	0,256
2	3,332	3,046	2,805	2,600	2,423	2,268	2,132	2,011	1,903	1,806
3	7,882	7,187	6,605	6,110	5,685	5,315	4,990	4,702	4,446	4,217
4	13,507	12,285	11,267	10,405	9,666	9,025	8,464	7,969	7,529	7,135
5	19,958	18,102	16,566	15,272	14,166	13,211	12,377	11,643	10,991	10,408
6	27,125	24,530	22,395	20,607	19,066	17,777	16,636	15,634	14,747	13,955
7	34,981	31,524	28,705	26,358	24,373	22,669	21,191	19,895	18,570	17,731
8	43,563	39,086	35,480	32,503	29,999	27,860	26,011	24,396	22,972	21,707
9	52,991	47,267	42,738	39,041	35,956	33,337	31,083	29,120	27,395	25,865
10	63,564	56,189	50,535	45,999	42,256	39,101	36,401	34,060	32,009	30,195
11	76,160	66,132	58,990	53,434	48,925	45,165	41,970	39,215	36,811	34,693
12		77,908	68,366	61,461	56,022	51,560	47,808	44,595	41,806	39,358
13			79,418	70,327	63,656	58,343	53,945	40,217	47,003	44,197
14				80,736	72,060	65,617	60,436	56,112	52,420	49,218
15					81,896	73,064	67,381	62,332	58,088	54,442
16						82,925	74,988	68,974	64,057	59,897
17							83,843	76,234	70,420	65,634
18								84,668	77,363	71,738
19									85,413	78,389
20										86,089

Bibliographie

- [1] P. Lyonnet, M. Thomas et R. Toscano, Fiabilité, diagnostic et maintenance prédictive des systèmes. Editions TEC et DOC, Lavoisier, 2012.
- [2] F. Monchy et J.P. Vernier, maintenance méthodes et organisations, 3^{ème} édition. Dunod, Paris, 2010.
- [3] P. Lyonnet, Ingénierie de la fiabilité. Editions TEC et DOC, Lavoisier, 2006.
- [4] P. Lyonnet, La maintenance, mathématiques et méthodes. Editions TEC et DOC, Lavoisier. 1992.
- [5] J. Faucher, Disponibilité des moyens de production. Editions, Techniques de l'ingénieur (MT 9 201), 2009.
- [6] J. Faucher, Sûreté de fonctionnement concepts et enjeux. Editions, Techniques de l'ingénieur (MT 9 200), 2008.