

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche scientifique  
**UNIVERSITE D'ADRAR**



**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA  
TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE  
TECHNOLOGIE**

Matière:

# **Maintenance Industrielle**

**PAR :**

**MR Chabani Sououdi Boumediene**

**Public cible :**

3eme année Electrotechnique

Année universitaire 2019/2020

### **Objectifs de l'enseignement:**

Assurer la continuité de service d'une installation industrielle, identifier les fonctions et les composants des équipements électriques et électroniques, déterminer les causes de défaillance des systèmes et les réparer.

### **Connaissances préalables recommandées:**

Statistiques, appareillages, mesures et instrumentation.

### **Contenu de la matière:**

#### **Chapitre 1. Généralités sur la maintenance**

**(4 Semaines)**

Historique (concepts et terminologie normalisés, ...), Rôle de la maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie, Eléments de mathématiques appliquées à la maintenance, Comportement du matériel en service, Taux de défaillance et lois de fiabilité, Modèles de fiabilité, Les différentes formes de la maintenance, Organisation d'entretien et de dépannage des équipements électriques, Classification de la maintenance planifiée des équipements électriques.

#### **Chapitre 2. Organisation et gestion de la maintenance**

**(4 Semaines)**

Structure des ateliers spécialisés dans le dépannage des convertisseurs électromécaniques, Organisation des opérations de maintenance, Etapes principales de technologie de dépannage des machines électriques, Etude des différentes pannes des machines électriques et méthodes de leur détection, Technique de démontage et de remontage, Essais et diagnostics avant le dépannage.

#### **Chapitre 3. Dépannage des différentes parties des machines électriques**

**(4 Semaines)**

Dépannage de la partie mécanique, Dépannage de la partie électrique, Calcul et vérification des paramètres des systèmes électro-énergétiques, Recalcul des systèmes électro-énergétiques sur d'autres données de la plaque signalétique, Travaux de montage et méthode d'essais après dépannage.

#### **Chapitre 4. Généralités sur la maintenance assistée par ordinateur (MAO)**

**(3 Semaines)**

### **Mode d'évaluation:**

Examen: 100%

### **Références bibliographiques:**

1. G. Zwingelstein, "Diagnostic de défaillance", Hermès, Paris, 1997.
2. "La maintenance basée sur la fiabilité", Hermès, Paris, 1997.
3. Jean Henq, "Pratique de la maintenance préventive", Dunod, 2000.
4. Raymond Magnan, "Pratique de la maintenance industrielle", Dunod, 2003.
5. Yves Lavina, "Maintenance industrielle, Fonction de l'entreprise", 2005.

6. M. François, "Maintenance: méthode et organisation", Dunod, Paris, 2000.
7. M. François, "Maintenance: méthode et organisation", Dunod, Paris, 2000.
8. A. Boulenger, C. Pachaud, "Diagnostic vibratoire en maintenance préventive", Dunod, Paris, 2000.
9. Jean Henq, "Pratique de la maintenance préventive", Dunod, Paris, 2002.
10. R. Cuigent, "Management de la maintenance", Dunod, Paris, 2002.
11. Rachid Chaib, "La maintenance et la sécurité industrielle dans l'entreprise", Dar El Houda, Alger, 2007.
12. S. Robert, S. Stéphane, "Maintenance: la méthode MAXER", Dunod, Paris, 2008.
13. J. F. D. Beaufort, "Emploi des relais pour la protection des installations", 1972.
14. Michel Pierre Viloz, "Protection et environnement", Technique et ingénieur, 2006.
15. Nichon Margossian, "Risques professionnelle", Technique et ingénieur, 2006.

## **I. Introduction :**

Pour être et demeurer compétitive, une entreprise doit produire toujours mieux (qualité) et au coût le plus bas. Pour minimiser ce coût, on fabrique plus vite et sans interruption des produits sans défaut afin d'atteindre la production maximale par unité de temps. Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction. Ce chapitre examine les définitions fondamentales concernant la maintenance et le rôle de cette dernière dans l'industrie. Ensuite l'accent est mis sur l'intégration d'éléments mathématiques dans la maintenance pour évaluer le comportement du matériel en service.

### **1.2 Historique (concepts et terminologie normalisés, ...) :**

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines manus et tenere, est apparu dans la langue française au XII siècle. L'étymologiste Wace a trouvé la forme mainteneor (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c'est une forme archaïque de « maintenir ».

**Avant 1900 :** on parle de réparation.

**1900 - 1970 :** on utilise la notion d'entretien, avec le développement des chemins de fer, de l'automobile, de l'aviation et l'armement pendant les 2 guerres mondiales.

**A partir de 1970 :** les développements de secteurs à risques et d'outils modernes aboutissent à la mise en œuvre de la maintenance.

Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l'époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : « maintien dans des unités de combat, de l'effectif et du matériel à un niveau constant ». Définition intéressante, puisque l'industrie l'a reprise à son compte en l'adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique »

Les principales raisons à retenir pour le passage de l'entretien à la maintenance

- Evolution technologique
- Coût
- Automatisation
- Amortissement
- Contraintes réglementaires

### **I.2.1. Définitions AFNOR et CEN de la maintenance :**

**AFNOR** : « Association Française de Normalisation »

**CEN** : « Comité Européen de Normalisation »

Il n'existe pas actuellement de normes internationales **ISO** « International Standardization Organization » relatives à la fonction maintenance.

#### **Définition**

Selon l'AFNOR : La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou dans un état où il est en mesure d'assurer un service déterminé.

La maintenance est une politique qui prends en compte :

- a) le choix des méthodes d'entretien (les différents modes de maintenances)
- b) les améliorations
- c) la place des équipements dans le procédé de fabrication (hiérarchisation)
- d) la formation du personnel d'entretien et de production

#### **Définitions de la maintenance selon l'AFNOR par la norme X 60-000**

La maintenance est l'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 .

#### **Définition de la maintenance selon l'AFNOR par la norme 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. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optima.

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- Maintenir qui suppose un suivi et une surveillance.
- Rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.
- Etat spécifié et service déterminé qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.
- Coût optimal qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

### **I.3.Rôle de la maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie :**

Le rôle de la fonction maintenance et du dépannage dans une entreprise (quel que soit son type et son secteur d'activité) est donc de garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué. Pour atteindre ces objectifs, la politique de maintenance et du dépannage des équipements dans l'industrie oblige de suivre les points suivants :

**a.** Le service maintenance (ou « dépannage ») intervient principalement en cas de problème :

- Il dépanne en urgence.
- Il répare en atelier.
- Il effectue l'entretien quotidien des matériels.

**b.** Le service maintenance (ou « dépannage ») est là pour éviter les pannes et les ralentissements de production :

Les interventions en urgence engendrant de coûteux arrêts de production, on met en place des procédures de prévention (d'évité) systématiques des pannes majeures.

**c.** Le service maintenance (ou « dépannage ») doit générer des profits :

Le service maintenance évite des pannes : il fait donc gagner de l'argent. Mais il coûte aussi :

salaires, matériels de maintenance, stock de pièces de rechange, arrêt de production pour la maintenance préventive.

**d.** Le service maintenance (ou « dépannage ») est en concurrence avec les sous-traitants maintenanciers :

Après avoir fait la preuve de sa rentabilité, le service maintenance doit faire preuve de plus de rentabilité que si on avait recours à des sociétés spécialisées dans la maintenance.

Le service maintenance doit mettre en oeuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations.

La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- **Prévisions à long terme** : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.
- **Prévisions à moyen terme** : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.
- **Prévisions à courts termes** : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures.

Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation.

#### **I.4.Éléments de mathématiques appliquées à la maintenance**

Dans le domaine de la maintenance industrielle, il est courant de devoir déterminer certaines mesures à partir de la connaissance d'un nombre limité de valeurs connues. Cette partie permettra de consolider certains éléments mathématiques vus au secondaire et de les appliquer dans des contextes liés à la maintenance industrielle. Aussi, il favorise le développement de l'habileté à utiliser les fonctions et les graphiques d'un tableur, à déterminer, à partir des données sur un dessin, les dimensions recherchées de l'objet représenté, à reconnaître et à utiliser le modèle mathématique approprié à une situation, et à analyser des situations à l'aide du calcul vectoriel.

- **Fonctions et variations** : Ce point vise principalement à s'initier à l'analyse de l'influence de la variation d'une quantité en fonction d'une autre, afin de résoudre des problèmes. En effet, en contexte de maintenance industrielle, il est important de pouvoir transposer des problèmes en langage mathématique pour les résoudre.
- **Statique et résistance des matériaux** : Ce deuxième point de physique s'intéresse à l'étude des forces dans un contexte d'équilibre statique (diagnostique), ainsi qu'aux notions de contraintes et de déformations dans un contexte de résistance des matériaux (maintenance préventive). Les notions de résistance des matériaux seront appliquées à la détermination de la résistance des joints et des soudures dans le domaine (électromécanique, machine électrique) où ces mesures sont obligatoires pour déclencher une maintenance préventive.
- **Statistique en maintenance industrielle** : Cette partie vise l'intégration de notions statistiques appliquées au contexte de maintenance industrielle. La démarche sera axée sur l'utilisation d'outils statistiques pour permettre

une interprétation juste des résultats, et la production de travaux à l'aide d'un logiciel approprié au traitement statistique des données.

Les méthodes statistiques, les tableaux et les graphiques, les calculs des principales mesures de tendance centrale de dispersion et de position, Les probabilités, les inférences statistiques ainsi que la corrélation et l'analyse de régression seront des contenus abordés.

- **Analyse de mécanismes** : En contexte de maintenance industrielle, ce dernier permet de poser des diagnostics sur les mécanismes défectueux, les démonter, analyser les bris, changer ou réparer les pièces défectueuses de façon à remettre en état les mécanismes défectueux.

### **I.5.Comportement du matériel en service**

Le concepteur d'équipement est fréquemment une société qui n'exploite pas les installations qu'elle conçoit. Elle aura de ce fait forcément des difficultés à tenir compte dans sa conception des conditions d'exploitation particulières d'exploitation des clients.

Généralement le concepteur attache peu d'attention à la maintenabilité des installations. Ainsi, le choix d'une loi de comportement du matériel (calcul de la fiabilité) devient une tâche très compliquée La sûreté de fonctionnement d'une machine en tenant compte de l'aspect sécurité et les critères visant à éviter un entretien fréquent, difficile et coûteux se résument en trois points connus sous la notion F.M.D. que le concepteur devrait tenir compte lors des études d'engineering :

- Sûreté de fonctionnement
- Maintenabilité
- Disponibilité
- Fiabilité

#### **I.5.1. Qu'est-ce qu'un système ?**

Ensemble complexe de matériels, logiciels, personnels et processus d'utilisation, organisés de manière à satisfaire les besoins et à remplir les services attendus, dans un environnement donné.

## I.5.2. Sûreté de fonctionnement

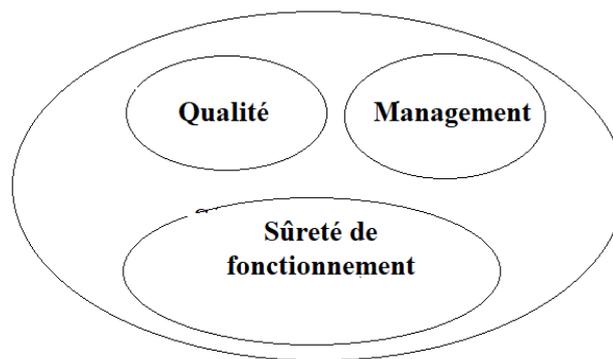
La sûreté de fonctionnement d'un système peut être définie comme étant la propriété qui permet à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service qu'il leur délivre.

L'utilisateur peut être un individu tel que l'Opérateur ou le Superviseur, ou un autre système matériel / logiciel ayant des interactions avec le système considéré. La sûreté de fonctionnement regroupe les activités d'évaluation de la **Fiabilité**, de la **Disponibilité**, de la **Maintenabilité** et de la Sécurité (**FDMS**) d'une organisation, d'un système, d'un produit ou d'un moyen. Ces propriétés sont différentes mais complémentaires.

- **L'environnement de la maintenance :**

La maintenance s'intègre dans le concept global de la Sûreté de Fonctionnement, qui lui-même s'intègre dans l'Assurance Produit.

- **L'Assurance Produit :**



Le concept de Sûreté de fonctionnement regroupe 4 disciplines :

**La Fiabilité** (AFNOR X-06-501) : « Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données à un instant donné. »

**La Disponibilité** (AFNOR X-06-010) : « Aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation données pendant une période donnée. »

**La maintenabilité** (AFNOR X-06-010) : « Aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il puisse accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions d'utilisation données avec des moyens et procédures prescrits. »

**La sécurité** (AFNOR X-06-010) : « Aptitude d'un dispositif à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastrophiques. »

## LES OUTILS DE LA MAINTENANCE :

Tout comme l'intervention technique de maintenance, l'organisation et la gestion des activités de maintenance nécessitent l'emploi d'outils d'usages et de natures différentes :

**Outils mathématiques :** pour choisir les politiques de maintenance les mieux adaptées à chaque type d'équipement, déterminer les périodes d'intervention, connaître la fiabilité, maintenabilité, disponibilité... (probabilités, lois statistiques, algèbre des événements, analyses markoviennes...).

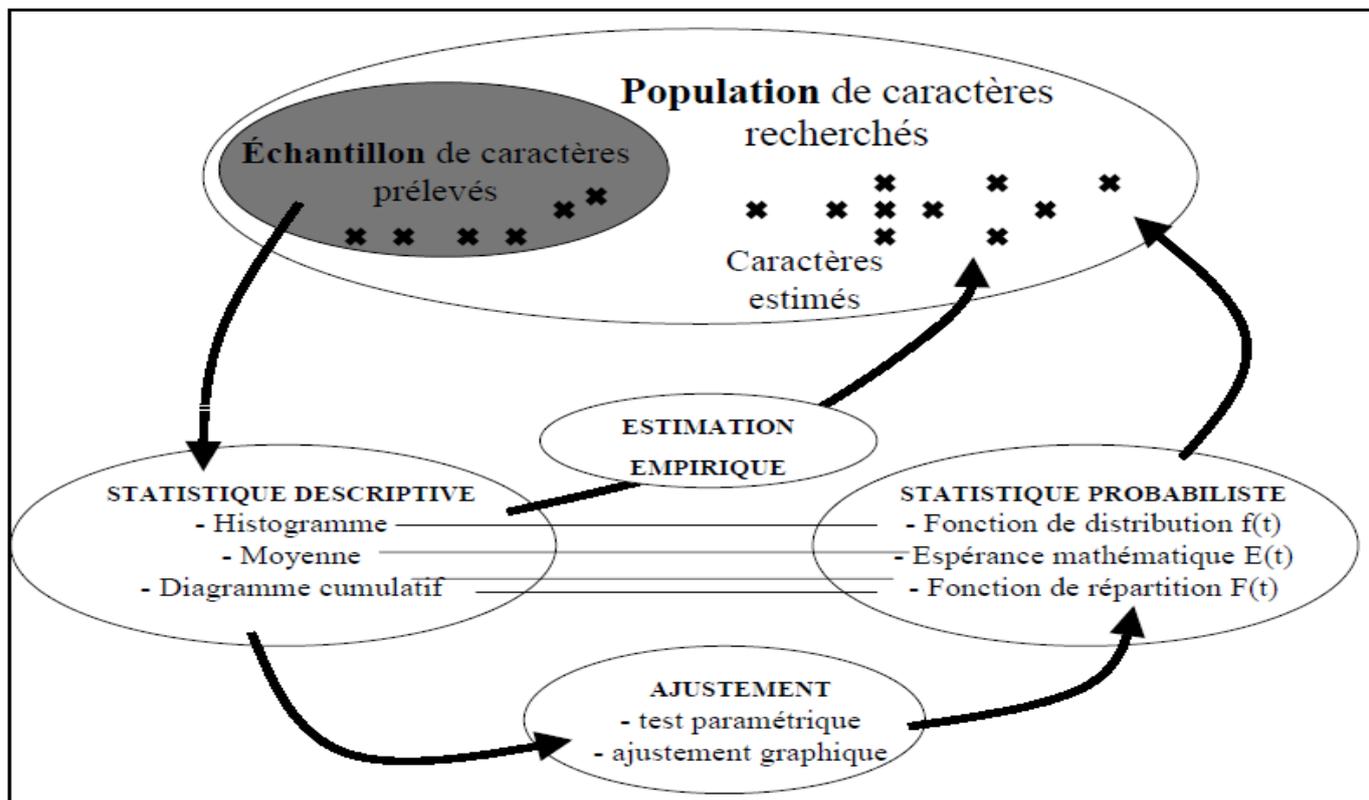
**Outils organisationnels :** pour faciliter la prise de décisions (AMDEC, Synoptiques, Logigrammes...), la mise en oeuvre de la maintenance préventive (techniques de contrôle), ou l'organisation des interventions (procédures et modes opératoires).

**Outils Informatiques :** pour la gestion des éléments maintenus, des ressources utilisées et des budgets (GMAO, GTP, GTB), ou pour l'aide à la décision (Systèmes experts).

## Méthodes et outils mathématiques pour la mise en œuvre des actions de maintenance :

- **Etudes statistiques**

L'objectif des méthodes statistiques de recherche de la fiabilité est de définir, à partir d'un échantillon de certains équipements d'une même catégorie, une estimation du comportement de l'ensemble des équipements de cette catégorie.



### Regroupement des classes :

Si  $N > 50$ , il faut réaliser des regroupements en classes de valeur  $\Delta t$ .

Pour déterminer le nombre  $K$  de classes à créer, plusieurs règles empiriques existent :

$$K \leq \frac{N}{10} \text{ et } K \geq 5 \text{ (Gnedenko)}$$

$$K \approx \sqrt{N} \text{ (Chapouille et De Pazzis)}$$

- Cas des grands échantillons  $N > 50$

Intervalles de classes	Effectifs	Fréquence relative	Fréquence cumulée
$t_{i-1}, t_i$	$n_i$	$f_i = \frac{n_i}{N}$	$F_i = \frac{\sum n_i}{N} = F(t)$

- Cas des petits échantillons  $N < 50$

TBF croissants	Effectifs	Ordre (rang)	Fréquence cumulée
$t_i$	$n_i$	$\sum n_i = i^{\text{ième}}$	$F_i = \frac{i}{N}$

Dans ce dernier cas, une approximation de la fonction de répartition  $F(t)$  sera nécessaire :

- Si  $20 < N < 50$ , on utilisera l'approximation par les rangs moyens suivant la formule:

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

- Si  $N < 20$ , on utilisera l'approximation par les rangs médians, suivant la formule:

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

### Lois de probabilité et ajustement

L'estimation des paramètres caractéristiques du matériel (MTBF, MTTR) et des lois régissant son comportement ( $R(t)$ ,  $M(t)$ ...) passe par l'usage de lois de probabilité bien connues, possédant elles même des paramètres bien connus:

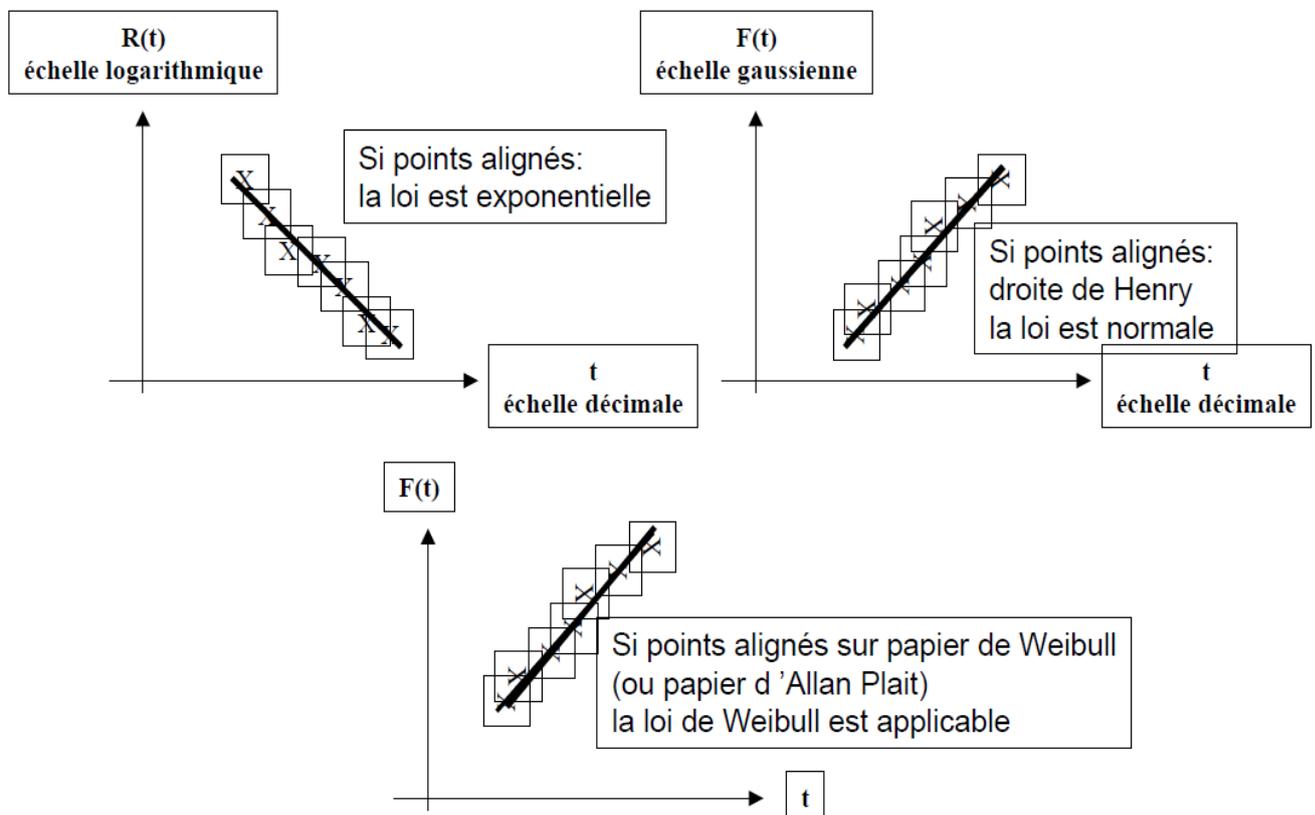
- **loi exponentielle**, dont le paramètre  $\lambda$  représente le taux de défaillance de l'équipement,

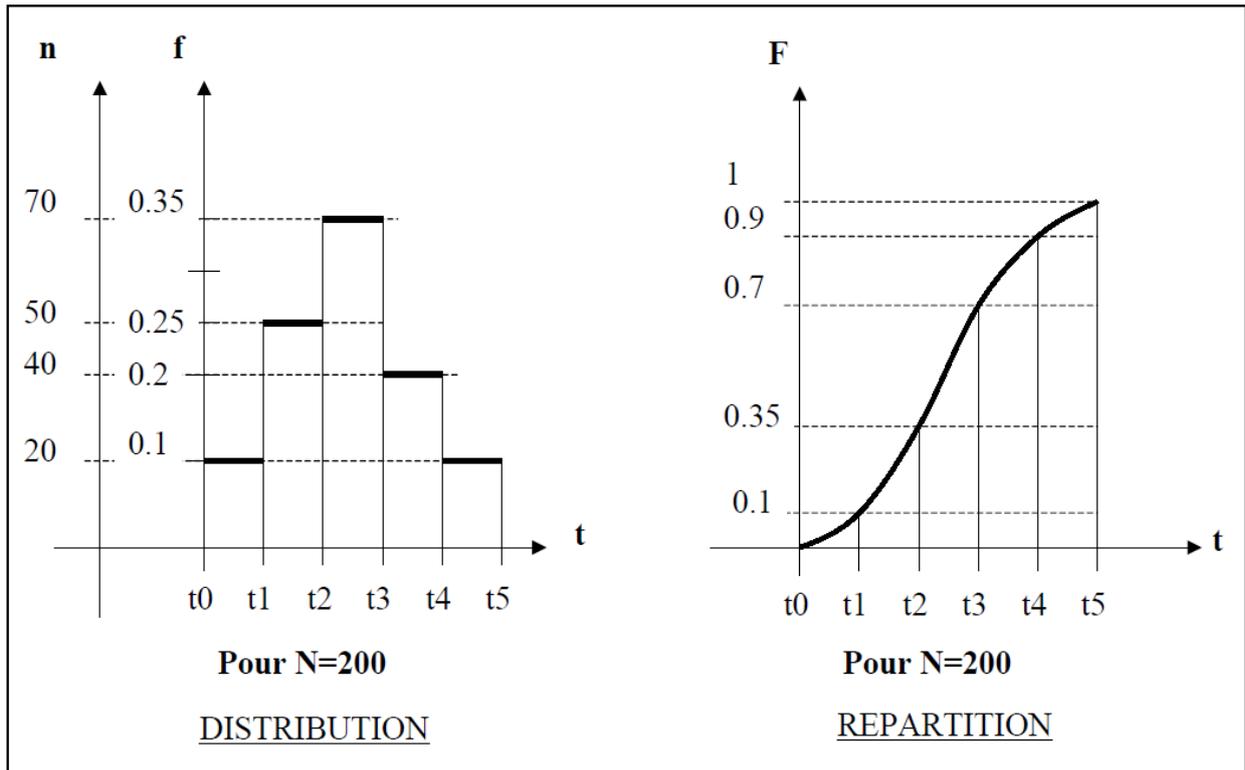
- **loi normale**, dont les paramètres sont  $m$  (moyenne) et  $\sigma$  (écart-type),

- **loi de Weibull**, dont les paramètres sont  $\beta$  (paramètre de forme),  $\eta$  (paramètre d'échelle) et  $\gamma$  (paramètre de position) Le problème est de savoir si les valeurs relevées expérimentalement suivent bien l'une de ces lois. Pour cela, deux types de tests sont possibles:

- **les tests numériques** : test du  $\chi^2$ , de Lilliefors (loi normale), de Barlett (loi exponentielle), de Mann (loi de Weibull)

- **les tests graphiques** : en plaçant les points correspondant aux valeurs expérimentales sur les papiers fonctionnels correspondant à chacune des lois, l'observation de l'alignement des points signifie une corrélation avec la loi concernée.





### I.5.3. Maintenabilité (*Maintainability*)

Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude 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 .

**Maintenabilité = être rapidement dépanné**

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

A partir de ces définitions, on distingue :

- **La maintenabilité intrinsèque** : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc).
- **La maintenabilité prévisionnelle** : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.
- **La maintenabilité opérationnelle** : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions. L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la **MTTR** ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité).

<p><b>MTTR (Mean Time To Repair)</b> Temps moyen nécessaire à la réparation</p>
---

**Commentaires :** La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou de maintenir un bien en bon état de fonctionnement. Cette notion ne peut s'appliquer qu'à du matériel maintenable, donc réparable.

« Les moyens prescrits » englobent des notions très diverses : moyens en personnel, appareillages, outillages, etc.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs.

Facteurs liés à L'ÉQUIPEMENT	Facteurs liés au CONSTRUCTEUR	Facteurs liés à la MAINTENANCE
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Documentation</li> <li>• Aptitude au démontage</li> <li>• Facilité d'utilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conception</li> <li>• Qualité du service après-vente</li> <li>• Facilité d'obtention des pièces de rechange</li> <li>• Coût des pièces de rechange</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Préparation et formation des personnels</li> <li>• Moyens adéquats</li> <li>• Etudes d'améliorations (maintenance améliorative)</li> </ul>

\*\*\*\*Les facteurs de maintenabilité\*\*\*\*

En ce qui concerne la maintenabilité, le temps de réparation est une variable aléatoire qui résulte de différents facteurs tels que l'habileté des agents de maintenance et la disponibilité des pièces de rechange.

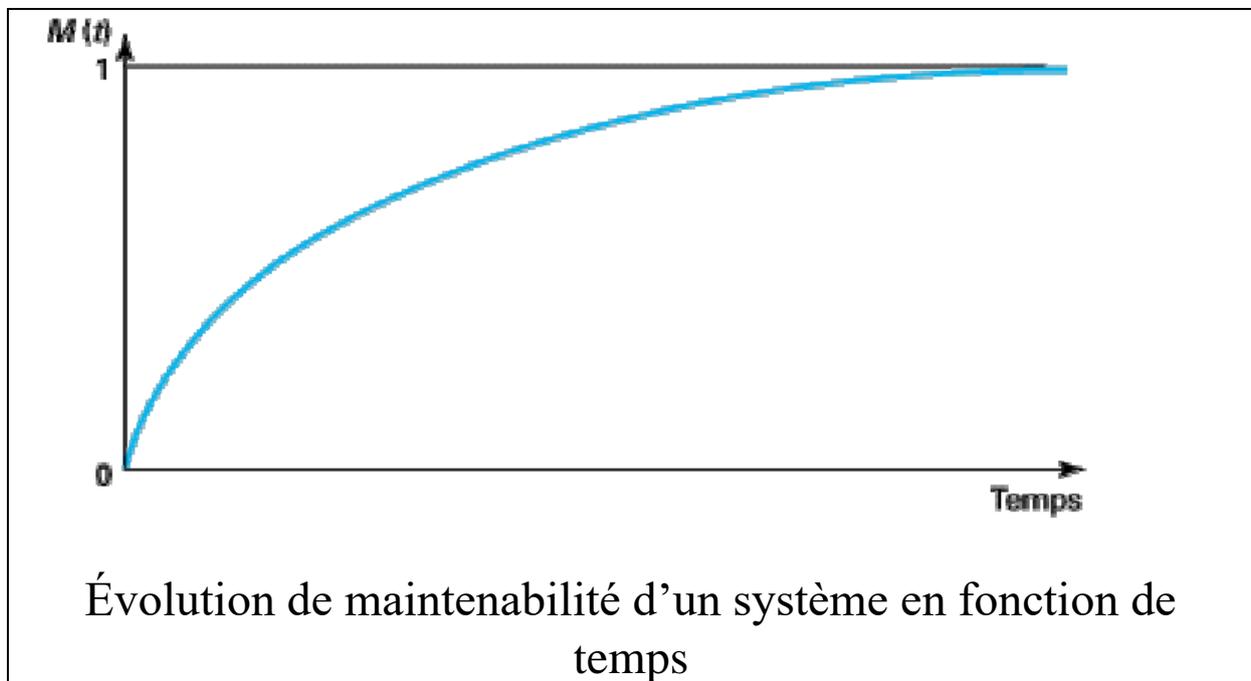
**Maintenabilité  $M(t)$  et taux de réparation  $m(t)$**

La maintenabilité est caractérisée par la probabilité qu'un matériel, lorsqu'il nécessite une intervention de maintenance, soit remis dans un état de fonctionnement donné, dans des limites de temps spécifiées, lorsque le travail est effectué selon des procédures prescrites et des conditions définies.

Si l'on suppose que les défaillances ont lieu comme des événements isolés, de nature aléatoire, à MRT (ou MTTR : Mean Time To Repair) constant, et sont prédites par la loi exponentielle des défaillances. Dans ce cas, la probabilité d'achever la réparation suite à une défaillance aléatoire en un temps donné  $t$  est :

$$MTTR = \frac{\text{Nombre de réparations}}{\text{Somme des temps de réparation}}$$

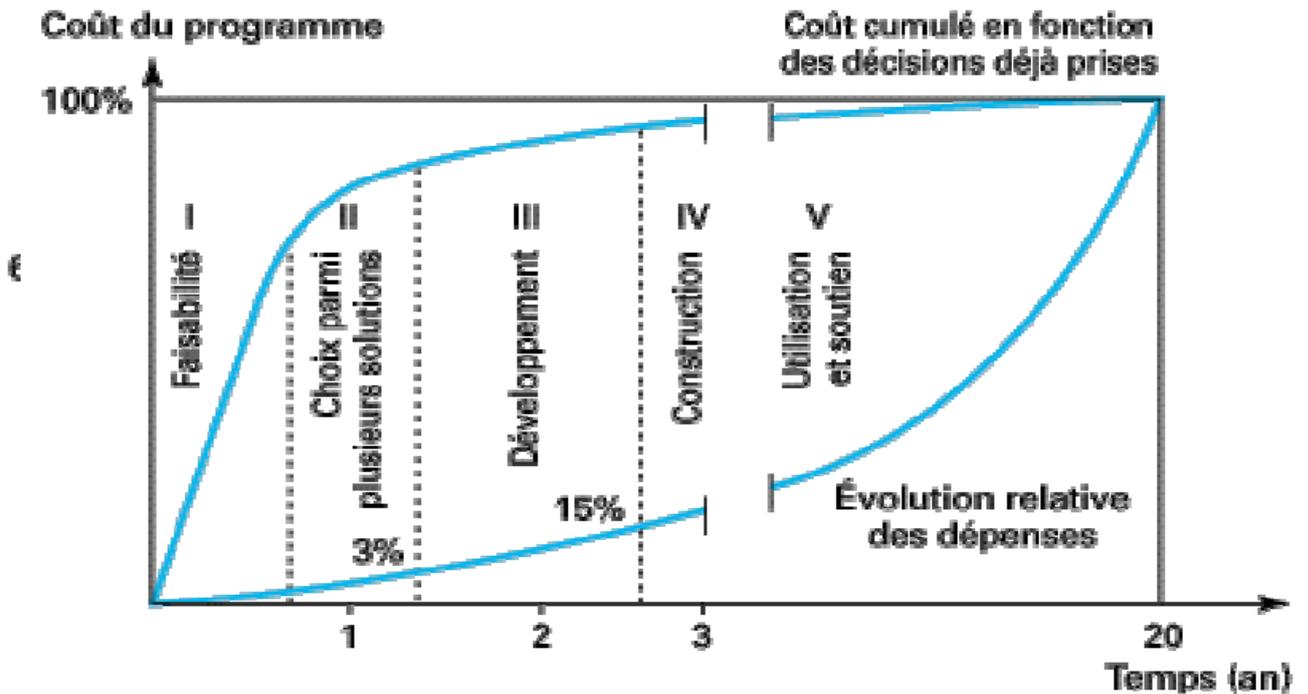
$$M(t) = 1 - e^{-\mu t} \text{ avec } \mu = \frac{1}{MTTR} = \text{taux de réparation}$$



Si  $u$  est variable en fonction de  $t$ , alors  $M(t)$  suit une loi log-normale de paramètres  $m$  et  $\sigma$ , modélisable par la loi de Weibull

Prise en compte en conception:

**Vulnérabilité/ accessibilité/ testabilité/ surveillabilité**



**Remarque** : On peut améliorer la maintenabilité en :

- Développant les documents d'aide à l'intervention.
- Améliorant l'aptitude de la machine au démontage (modifications risquant de coûter cher).
- Améliorant l'interchangeabilité des pièces et sous ensemble.

#### I.5.4. Disponibilité (*Availability*)

- Aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.

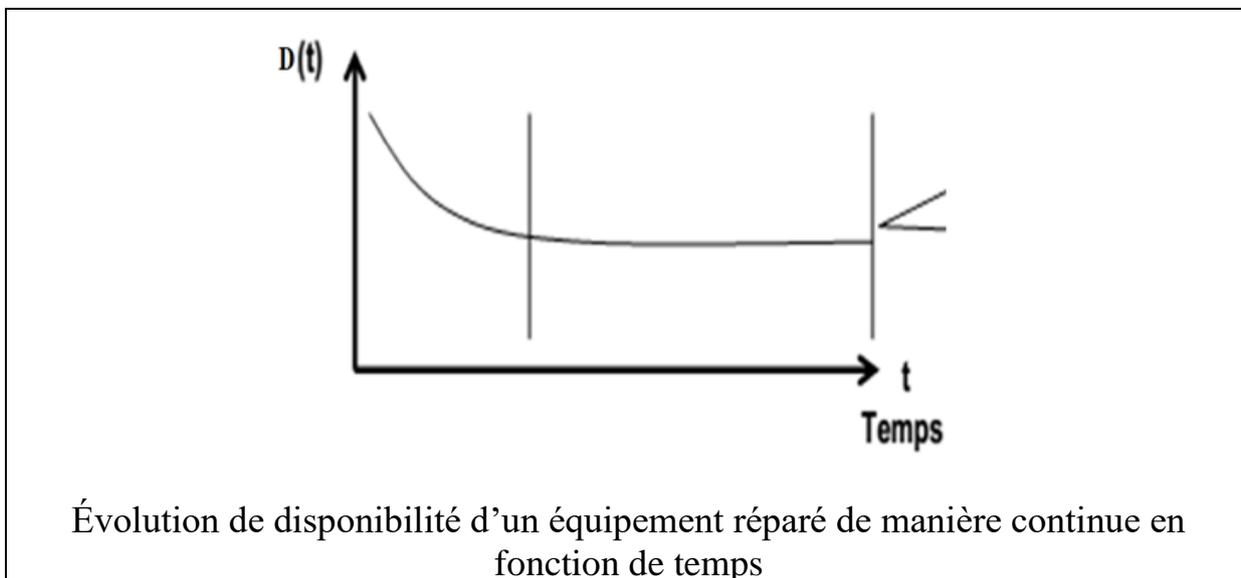
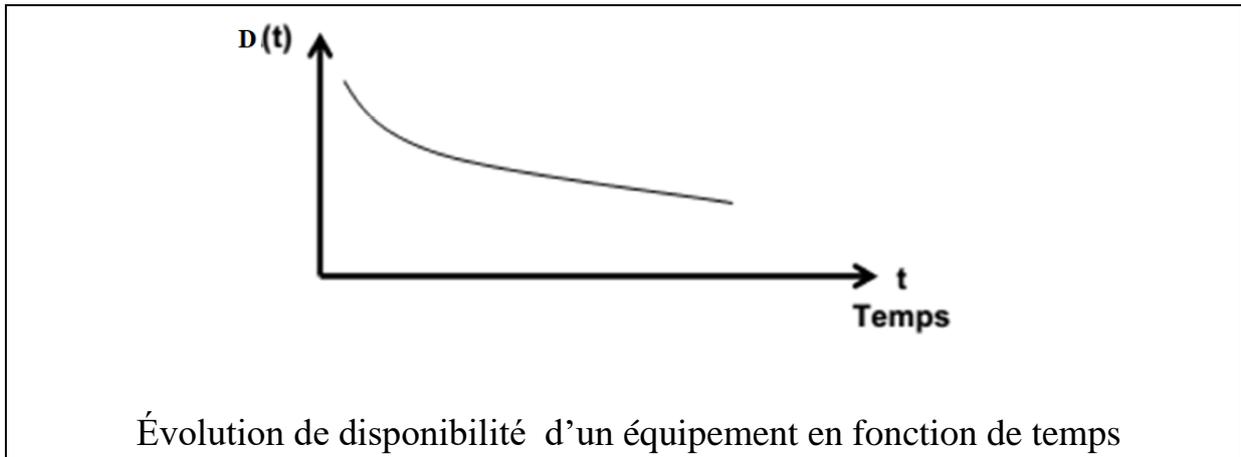
Lorsqu'on étudie la fiabilité, on s'intéresse non seulement à la probabilité de panne, mais aussi au nombre de pannes et, en particulier, au temps requis pour faire les réparations. Dans cette perspective, deux nouveaux paramètres de la fiabilité deviennent notre centre d'intérêt .

- La **disponibilité** est la probabilité qu'un système soit disponible pour être utilisé à un moment donné du temps.
- La **disponibilité** est l'aptitude d'une entité 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 extérieurs est assurée.

- Autrement la **disponibilité** est la probabilité qu'un système soit disponible pour être utilisé à un moment donné du temps. Cette définition est proche de celle de la fiabilité, sauf que le système demandé doit fonctionner à l'instant (**t**) et non sur une période de temps (**0 à t**).

**D(t)** : Probabilité qu'une entité soit en état de disponibilité dans des conditions données, à un instant donné en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée.



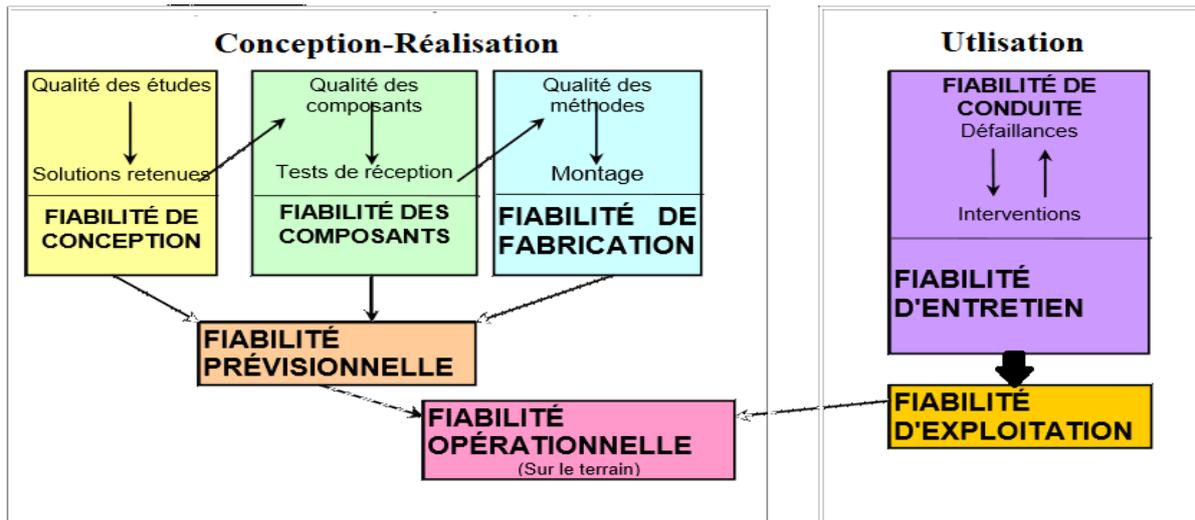
Pour des systèmes réparables, une quantité fondamentale est la disponibilité. Elle est définie comme suit :

**D(t)** = probabilité qu'un système fonctionne de façon satisfaisante au moment **t**.

**Remarque** : Cette aptitude dépend de la combinaison de la fiabilité, de la maintenabilité et de la logistique de maintenance.

### I.5.5. Fiabilité (*Reliability*)

- Aptitude d'un équipement à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné.
- On suppose en général que l'entité est en état d'accomplir la fonction requise au début de l'intervalle de temps donné,
- Le concept de fiabilité est traduit souvent dans la pratique comme l'aptitude d'une entité à avoir une faible fréquence de défaillance.



- **R(t)** : Probabilité que l'entité accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné (0, t).

Comme nous l'avons vu précédemment, la fiabilité " R " est la probabilité qu'a un bien (produit ou système) à accomplir, de manière satisfaisante, une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné.

La fiabilité a sans doute pris son développement depuis la dernière guerre mondiale. Elle est vite devenue une science à part entière dans les applications appartenant à de nombreux domaines. Elle a pour fondements mathématiques la statistique et le calcul des probabilités qui sont nécessaires à la compréhension et à l'analyse des données de fiabilité.

**Remarque :** Le terme « fiabilité » est également utilisé pour désigner la valeur de la fiabilité et peut être défini comme une probabilité.

#### Exemple :

La fiabilité d'un roulement de broche pendant 20 000 heures de fonctionnement est égale à 0.9 signifie :

Qu'il y a 90 chance sur 100  $\longrightarrow$  **PROBABILITE**

Pour que le roulement fonctionne sans signe d'usure  $\longrightarrow$  **FONCTION REQUISE**

Pendant 20 000 heures → **TEMPS DONNE**

À une fréquence de rotation moyenne de 1500 tr/min → **CONDITIONS DONNEES**

**Remarque :** **R** est toujours compris entre 0 et 1.

Par exemple, une fiabilité **R = 0.92** après 1000 heures signifie que le produit a 92 chances sur 100 (92 % de chances) de fonctionner correctement pendant les 1000 premières heures.

**Rappel :**

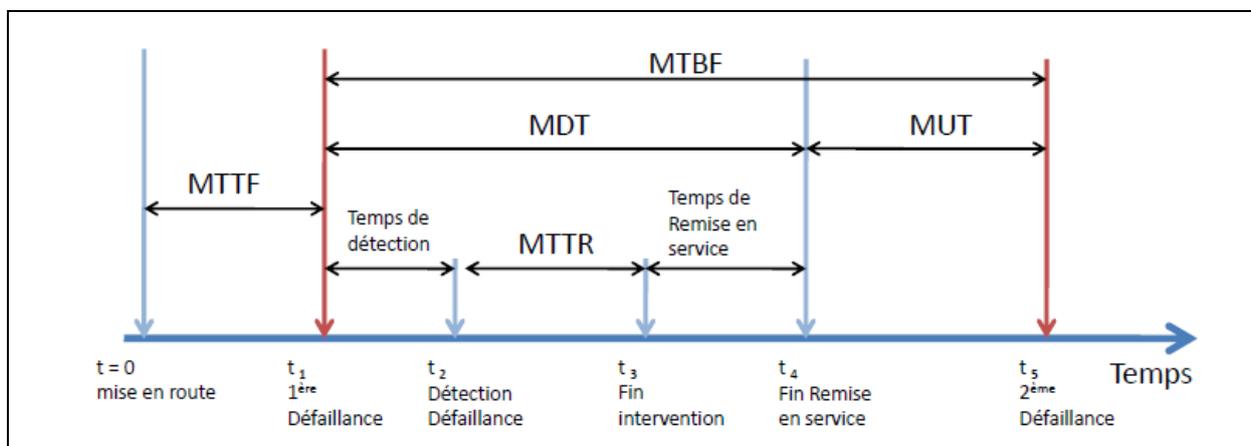
**Probabilité :** C'est une quantité indiquant, sous forme de fraction ou de pourcentage, le nombre de fois ou de chances qu'un événement à se produire sur un nombre total d'essais ou de tentative.

**En un temps donné :** Dans les études de fiabilité, le temps est la mesure ou la variable de référence permettant d'évaluer les performances et d'estimer les probabilités : probabilités ou chance de survie sans défaillance pendant une période de temps donnée.

**Sous des conditions données :** Regroupe l'ensemble des paramètres décrivant l'environnement du produit et ses conditions d'utilisation : mode opératoire, procédures de stockage et de transport, lieux géographiques, cycles des températures, humidité, vibrations, chocs, etc...

**Remarque :** La non-fiabilité d'un produit ou d'un bien augmente les coûts de l'après-vente (application des garanties, frais judiciaires, etc...). Construire plus fiable augmente les coûts de conception et de production. Le coût total du produit prendra en compte ces deux tendances.

### I.5.6. Analyses FMD : indicateurs opérationnels Temps de « fiabilité, maintenabilité et disponibilité »



Les durées caractéristiques de FMD

En fait, les grandeurs portées par le graphe sont des durées (TBF) auxquelles on fait correspondre des moyennes (MTBF) obtenues par exploitation statistique  $m(t)$  ou probabiliste  $E(t)$  des  $n$  durées constatées et enregistrées. Les sigles utilisés sont d'origine anglo-saxonne et correspondent aux notions suivantes :

- **MTTF** (Mean Time To [first] Failure) : temps moyen avant-première défaillance
- **MTBF** (Mean Time Between Failure) : temps moyen entre deux défaillances successives ;
- **MDT** ou **MTI** (Mean Down Time) : temps moyen d'indisponibilité ou temps moyen d'arrêt propre ;
- **MUT** (Mean Up Time) : temps moyen de disponibilité ;
- **MTTR** (Mean Time To Repair) : temps moyen de réparation.

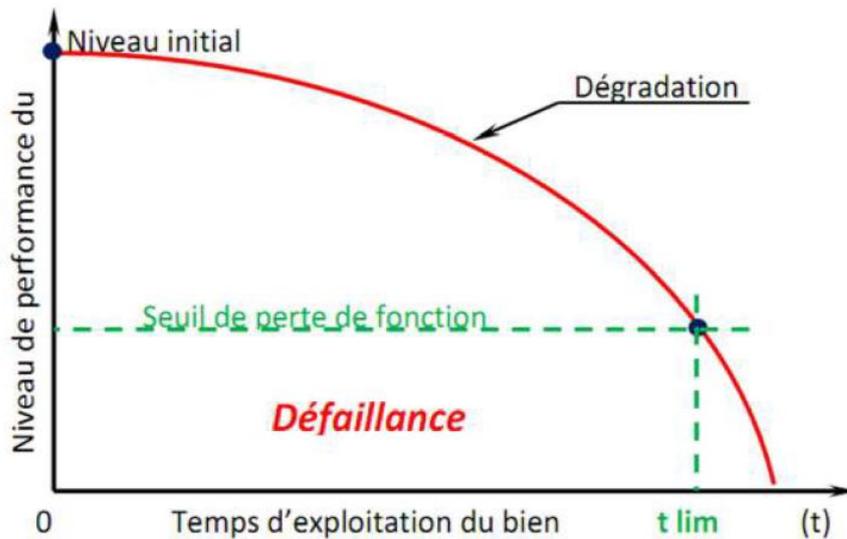
## **I.6.Taux de défaillance et lois de fiabilité**

- **Défaillance (Norme AFNOR X 60-010)** Altération ou cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.

À l'origine de l'action de maintenance se trouve la défaillance d'un bien. La défaillance et la panne sont définies ainsi : « cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise » alors que « la panne est l'état du bien après défaillance ».

**Synonymes usuels non normalisés** : dysfonctionnement, dommages, dégâts, anomalies, avaries, incidents, défauts, pannes, détériorations.

- **Panne** Inaptitude d'une entité à accomplir une fonction requise.
-



Dégradation du bien et durée de vie

**t lim** : indique le moment d'apparition de la défaillance

**Fonction de fiabilité R(t) – Fonction de défaillance F(t)**

Considérons un matériel dont on étudie la fiabilité. Soit Z la variable aléatoire qui à chaque matériel associe son temps de bon fonctionnement. On choisit un de ces matériels au hasard.

Soit les événements

**A** : « Le matériel est en état de bon fonctionnement à l'instant t »

et **B** : « Le matériel est défaillant à l'instant t + Δt » On a alors :

$$p(A) = p(T > t) \text{ et } p(T \leq t + \Delta t) \dots\dots\dots (1)$$

donc

$$\begin{aligned} p(A \cap B) &= p(t < T \leq t + \Delta t) \\ &= F(t + \Delta t) - F(t) \\ &= (1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t)) \\ &= R(t) - R(t + \Delta t) \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

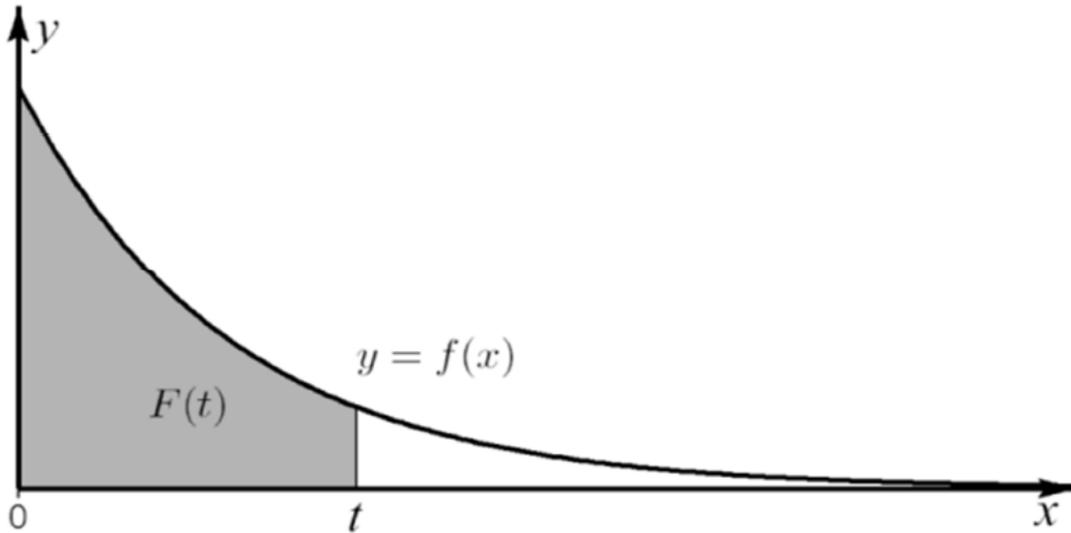
On en déduit que :

$$p\left(\frac{B}{A}\right) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \dots\dots\dots(3)$$

On appelle fonction de défaillance la fonction **F** définie pour tout **t** ≥ 0

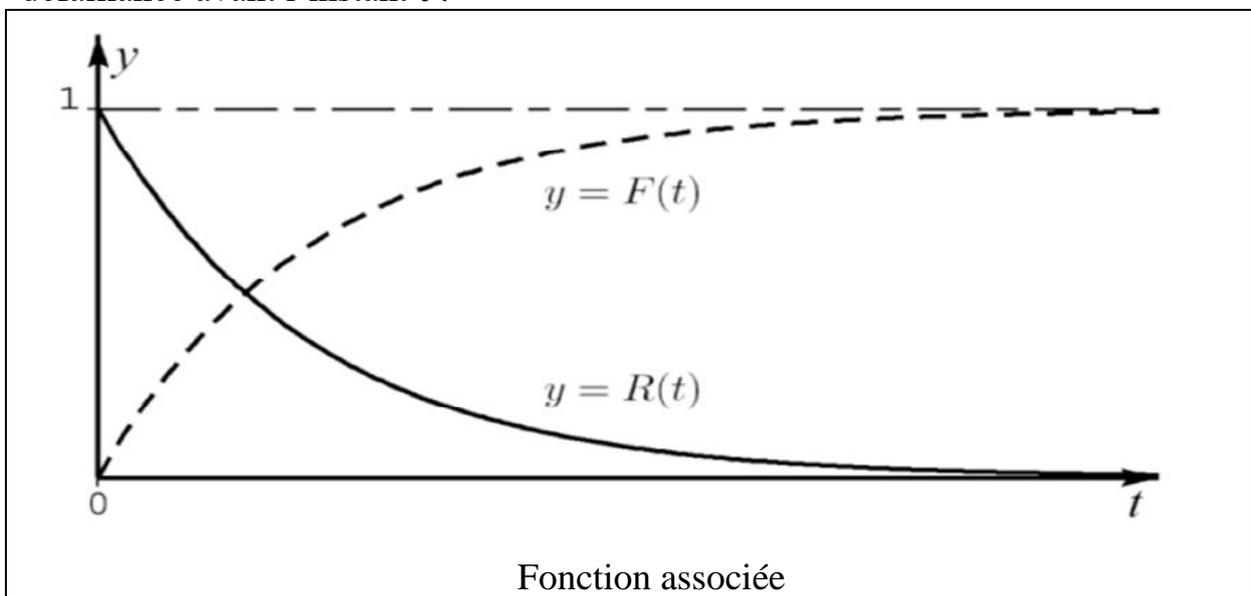
$$F(t) = p(T \leq t) \quad (4)$$

Le nombre  $F(t)$  représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant  $t$ .



Fonction de défaillance

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité  $R$  définie pour tout  $t \geq 0$  par :  $R(t) = 1 - F(t)$ . Le nombre  $R(t)$  représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant  $t$ .



Fonction associée

Le taux d'avarie moyen dans l'intervalle de temps  $[t, t + \Delta t]$  est alors :

(5).....

### Taux de défaillance instantané :

C'est la probabilité ( $0 \leq R \leq 1$ ) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné. L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant  $t$ , noté  $\lambda(t)$ , défini sur  $\mathbf{IR}$  est la suivante :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} * \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \dots\dots\dots(6)$$

Physiquement le terme  $\lambda(t) \cdot \Delta t$ , mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps  $[t, t + \Delta t]$  sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant  $t$

$$\lambda(t) = \frac{dR(t)}{d(t)} * \frac{1}{R(t)} = \frac{dF(t)}{d(t)} * \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - R(t)}$$

Où  $\mathbf{R}$  est la fonction de fiabilité de ce matériel.

On est alors amené à résoudre une équation différentielle du 1<sup>er</sup> ordre. En effet si  $\lambda$  est connue, la résolution de l'équation différentielle linéaire du 1<sup>er</sup> ordre.

$$R(t)' + \lambda(t)R(t) = 0 \dots\dots\dots(8)$$

Donne la fonction de fiabilité  $\mathbf{R}$  du matériel. On déduit alors la fonction de défaillance  $\mathbf{F}$  qui est la fonction de répartition de la variable  $\mathbf{Z}$  puis la densité de probabilité  $\mathbf{f}$  de  $\mathbf{Z}$  qui est la dérivée de  $\mathbf{F}$ . On a alors :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \text{ et } F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (9)$$

### Indicateurs de fiabilité ( $\lambda$ ) et (MTBF)

Précédemment le taux de défaillance  $\lambda$  a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimer par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances .

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de daillances penant le servise}}{\text{durée total de bon fonctionnement}}$$

### Temps moyen de bon fonctionnement

Le MTBF est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie  $t$ .

$$\text{MTBF} = \int_0^{\infty} R(t)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$\text{MTBF} = \frac{\text{somme des temps de focationnt entre les 'n' de faillances}}{\text{nombre d'interventionde maintenance avec immobilisation}}$$

Si  $\lambda$  est constant :  $\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

**Remarque :** La durée de bon fonctionnement = la durée totale en service – la durée des défaillances. Les unités utilisées sont : le nombre de défaillances par heures, le pourcentage de défaillances pour 1000 heures, etc.

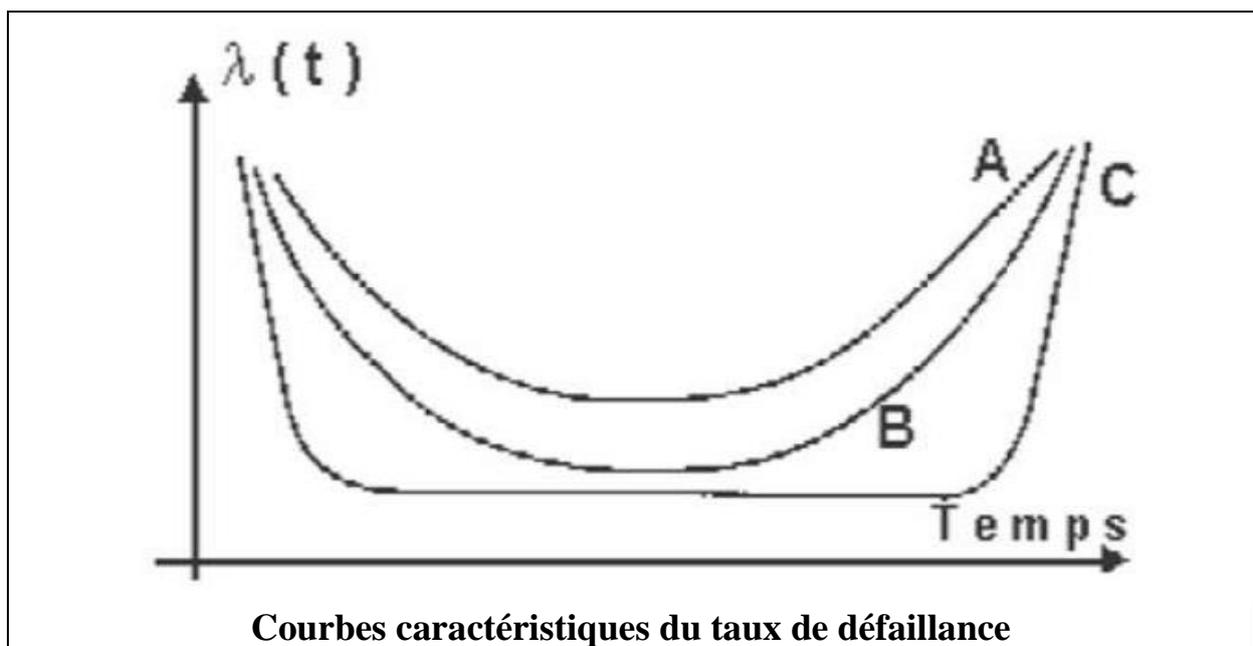
Par exemple, un produit ayant  $10^{-7} < \lambda < 10^{-5}$  pour 1000 heures (ou  $10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$  par heure) présente un bon niveau commercial de fiabilité. La durée de bon fonctionnement, c'est la période de temps pendant laquelle le dispositif, en activité ou en service, est exposé à des défaillances.

**Exemple :** un compresseur industriel a fonctionné pendant 8000 heures en service continu avec 5 pannes dont les durées respectives sont : 7 ; 22 ; 8,5 ; 3,5 et 9 heures. Déterminer son MTBF.

$$MTBF = \frac{8000 - (7 + 22 + 8,5 + 3,5 + 9)}{5} = 1590 \text{ heures}$$

Et si  $\lambda$  est supposé constant  $\lambda = \frac{1}{MTBF} = 6,289 \cdot 10^{-4}$  défaillances / heures .

La courbe ci-dessous montre l'évolution du taux des défaillances pour les différentes entités.



Les courbes du taux de défaillance ont une même forme générale dite en baignoire, mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

- A. en mécanique.
- B. en électromécanique.
- C. en électronique.

### Les différentes phases du cycle de vie d'un produit

L'évolution du taux de défaillance d'un produit pendant toute sa durée de vie est caractérisée par ce qu'on appelle en analyse de fiabilité la courbe en baignoire .

Le taux de défaillance est élevé au début de la vie du dispositif. Ensuite, il diminue assez rapidement avec le temps (taux de défaillance décroissant), cette phase de vie est appelée période de jeunesse. Après, il se stabilise à une valeur qu'on souhaite aussi basse que possible pendant une période appelée période de vie utile (taux de défaillance constant). A la fin, il remonte lorsque l'usure et le vieillissement font sentir leurs effets, c'est la période de Vieillessement (taux de défaillance croissant):



De nombreux éléments, tels que les composants électroniques, ont un taux de défaillance qui évolue de cette manière-là. Pour souligner la particularité des composants mécaniques dans l'analyse de la fiabilité par rapport aux composants mécaniques, nous allons comparer l'évolution du taux de défaillance dans les deux cas.

### Taux de défaillance pour des composants électroniques

L'expérience a montré que pour des composants électroniques la courbe, représentant le taux de défaillance en fonction du temps  $t$ , a la même allure que la courbe en baignoire.

Elle est donc composée de trois phases :

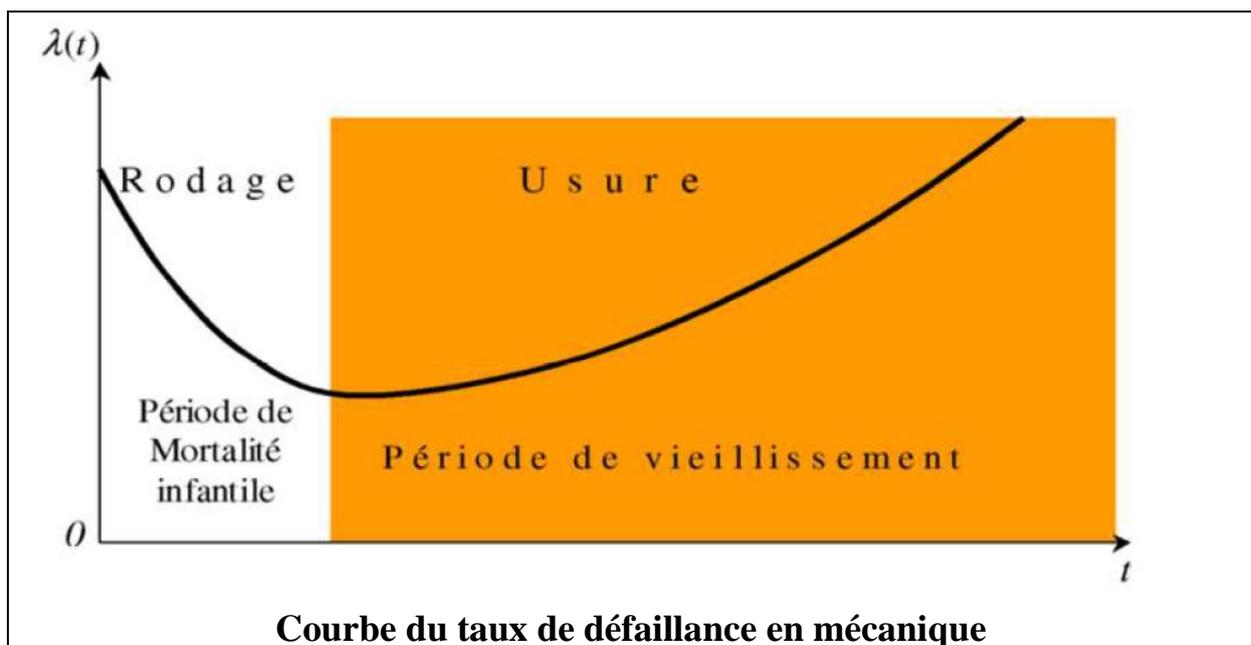
- **Phase 1** : La première phase définit la période de jeunesse, caractérisée par une décroissance rapide du taux de défaillance. Pour un composant électronique cette décroissance s'explique par l'élimination progressive de défauts dus aux processus de conception ou de fabrication mal maîtrisés ou à un lot de composants mauvais. Cette période peut être minimisée pour les composants vendus aujourd'hui. En effet, les fabricants de composants électroniques se sont engagés à vérifier la qualité de leurs produits en sortie de fabrication.

- **Phase 2** : La deuxième phase définit la période de vie utile généralement très longue. Le taux de défaillance est approximativement constant. Le choix de la loi exponentielle, dont la propriété principale est d'être sans mémoire, est tout à fait satisfaisant. Les pannes sont dites aléatoires, leur apparition n'est pas liée à l'âge du composant mais à d'autres mécanismes d'endommagement. Les calculs prévisionnels de fiabilité se font presque souvent dans cette période de vie utile.

- **Phase 3** : La dernière phase est la période de vieillissement, elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance avec l'âge du dispositif. Ceci est expliqué par des phénomènes de vieillissement tels que l'usure, l'érosion, etc. Cette période est très nettement au-delà de la durée de vie réelle d'un composant électronique. Parfois, on réalise des tests de vieillissement accélérés pour révéler les différents modes de défaillance des composants.

### Taux de défaillance pour des composants mécaniques

Les composants mécaniques sont soumis, dès le début de leur vie, au phénomène d'usure ou de vieillissement. Si on trace la courbe du taux de défaillance, en fonction du temps, on obtient une courbe qui ne présente pas le plateau de la période de vie utile (taux de défaillance constant) n'existe pas ou elle est réduite. Le taux de défaillance du dispositif est une fonction non linéaire du temps et ceci dans chaque phase de sa vie.



- **Phase 1** : La première phase définit la période de mortalité infantile. C'est une durée de vie en principe très courte Elle décrite par une décroissance progressive du taux de défaillance avec le temps dû à une amélioration des caractéristiques internes (caractéristiques de défauts) et des interfaces, par un rodage préalable des pièces. Par conséquent il n'est pas souhaitable de tester les composants mécaniques dans cette période de leur vie.

- **Phase 2** : La dernière phase définit la période de vieillissement qui comporte la majorité de la vie du dispositif. Elle est caractérisée par une augmentation progressive du taux de défaillance. Les pièces mécaniques sont soumises à des phénomènes de vieillissement multiples qui peuvent agir en combinaison: corrosion, usure, déformation, fatigue, et finalement perte de résilience ou fragilisation. Contrairement aux composants électroniques les calculs de la fiabilité pour des composants mécaniques se font essentiellement dans la période de vieillissement, en utilisant des lois de probabilité dont le taux de défaillance est fonction du temps telles que la loi Log-normale, Weibull, ... etc.

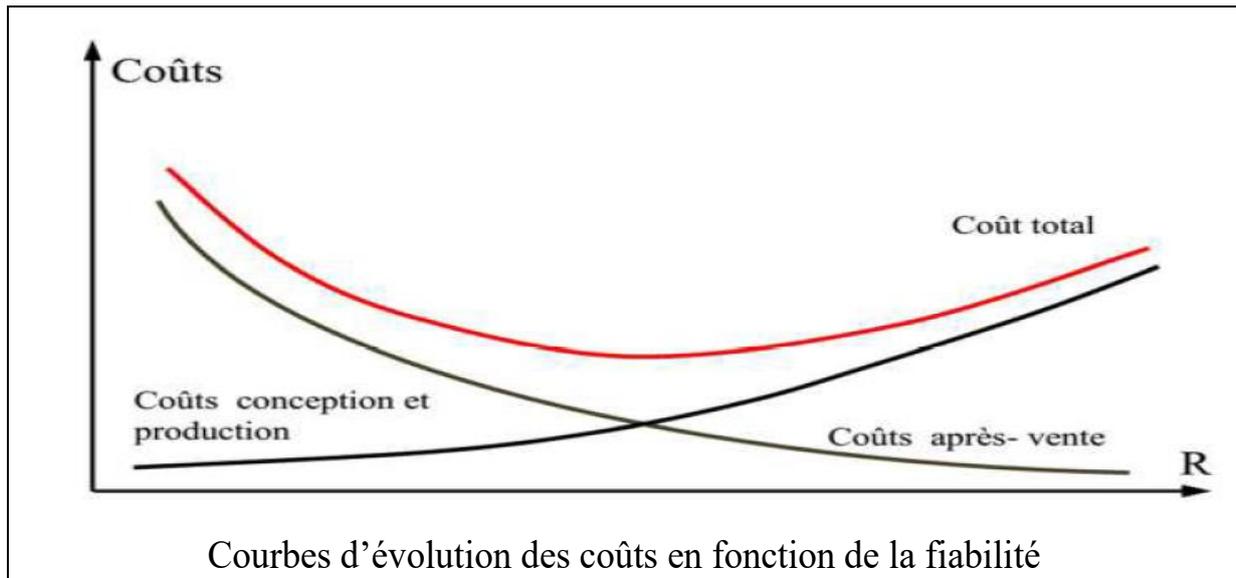
### **Objectifs et intérêts de la fiabilité en mécanique**

L'analyse de la fiabilité constitue une phase indispensable dans toute étude de sûreté de fonctionnement. A l'origine, la fiabilité concernait les systèmes à haute technologie (centrales nucléaires, aérospatial). Aujourd'hui, la fiabilité est devenue un paramètre clé de la qualité et d'aide à la décision, dans l'étude de la plupart des composants, produits et processus "grand public": Transport, énergie, bâtiments, composants électroniques, composants mécaniques....

De nombreux industriels travaillent à l'évaluation et l'amélioration de la fiabilité de leurs produits au cours de leur cycle de développement, de la conception à la mise en service (conception, fabrication et exploitation) afin de développer leurs connaissances sur le rapport Coût/Fiabilité et maîtriser les sources de défaillance. L'analyse de la fiabilité dans le domaine de la mécanique est un outil très important pour caractériser le comportement du produit dans les différentes phases de vie, mesurer l'impact des modifications de conception sur l'intégrité du produit, qualifier un nouveau produit et améliorer ses performances tout au long de sa mission.

### **Evolution des coûts en fonction de la fiabilité**

Le non fiabilité augmente les coûts d'après-vente (garanties, frais judiciaires). Construire plus fiable, augmente les coûts de conception et de production. Le coût total prend en compte ces deux contraintes.



La fiabilité d'une machine a tendance à diminuer avec le nombre de ses composants ou de leurs complexités. La maîtrise de la fiabilité devient donc plus délicate. Une très haute qualité pour chaque composant, n'entraîne pas nécessairement une grande fiabilité. Après assemblage, les interactions entre les composants diminuent la capacité de l'ensemble.

Une grande fiabilité sous certaines conditions, n'implique pas une grande fiabilité sous d'autres conditions (exemple: une huile moteur de synthèse prévue pour des moteurs moderne.

(multisoupapes et turbo) ne convient pas forcément pour un moteur de conception plus rudimentaire (tondeuse, moteur usé, voiture ancienne).

### Fiabilité d'un système

La détermination de la fiabilité d'un système électronique, mécanique ou autre nécessite tout d'abord de connaître la loi de la fiabilité (ou la loi de défaillance) de chacun des composants intervenant dans le système.

Ceci est simple pour certains types de systèmes tels que les systèmes électroniques, or ce n'est pas le cas pour des systèmes mécaniques à cause de la complexité de la structure du système étudié. Les systèmes mécaniques sont des ensembles d'éléments technologiques liés par des relations statiques et dynamiques assez complexes.

Pour un système électronique chaque composant a un poids important dans la fiabilité du système, la fiabilité du système est donc calculé en fonction de la fiabilité de tous ses composants. Les calculs sont effectués sous l'hypothèse que les taux de défaillance sont constants dans le temps, une hypothèse acceptable pour la plupart des composants, ce qui rend les calculs beaucoup plus simple. La détermination des taux de défaillance des composants est effectuée soit à partir des modèles développés dans des bases de données disponibles, soit à partir d'essais effectués sur les composants ou bien à partir des résultats d'exploitation des produits.

La fiabilité d'un système mécanique, contrairement à l'électronique, repose sur la fiabilité de quelques composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, dits composants "responsables" ou "critiques" (parfois un seul).

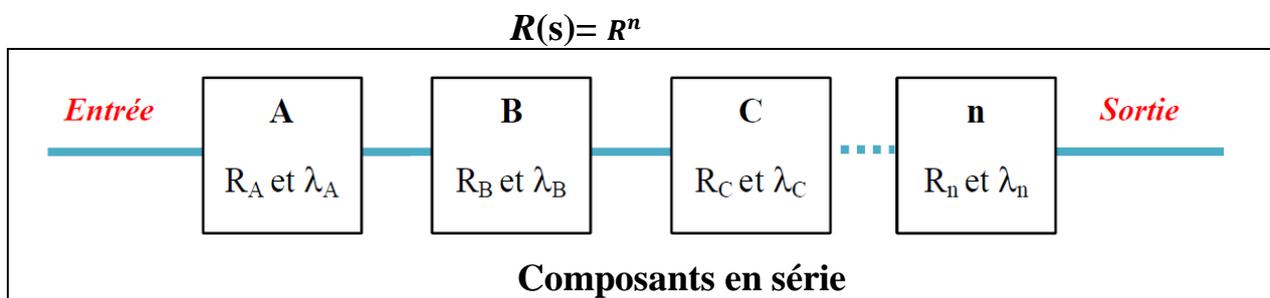
### Fiabilité de système constitué de plusieurs composants

#### a. En série

La fiabilité  $R_s$  d'un ensemble de  $n$  constituants connectés en série est égale au produit des fiabilités respectives  $R_A, R_B, R_C, R_R$  de chaque composant :

$$R_s = R_A * R_B * R_C * R_R \dots \dots \dots * R_n$$

Si les «  $n$  » composants sont identiques avec une même fiabilité  $R$  la formule sera la suivante :



Si les taux de défaillances sont constants au cours du temps la fiabilité sera calculée suivant la formule :

$$R(s) = (e^{-\lambda_A t}) * (e^{-\lambda_B t}) * (e^{-\lambda_C t}) * \dots \dots \dots * (e^{-\lambda_n t})$$

Avec :

$$MTBF(s) = \frac{1}{\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \dots + \lambda_n}$$

Si en plus, les composants sont identiques:  $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_C = \dots = \lambda_n$

Alors :

$$R(s) = (e^{-\lambda_n t})^n \quad \text{t MTBF(s) = } \frac{1}{n * \lambda}$$

**Exemple 1 :** Soit un poste de radio constitué de quatre composants connectés en série, une alimentation  $R_A = 0.95$ , une partie récepteur  $R_B = 0.92$  ;  
un amplificateur  $R_C = 0.97$  et hautparleur  $R_D = 0.89$  ; déterminer la fiabilité  $R_s$  de l'appareil.

$$R_s = R_A * R_B * R_C * R_D = 0.95 * 0.92 * 0.97 * 0.89 = \mathbf{0.7545}$$

(soit une fiabilité de 75% environ)

**Exemple 2 :** Soit une imprimante constituée de 2000 composants montés en série supposés tous de même fiabilité, très élevée  $R = 0.9999$ , Déterminer la fiabilité de l'appareil.

$$R(s) = (R^n) = 0.9999^{2000} = \mathbf{0.8187}$$

(soit une fiabilité de 82 % environ)

Si on divise par deux le nombre des composants

$$R(s) = (R^n) = 0.9999^{1000} = \mathbf{0.9048}$$

(soit une fiabilité de 90.5 % environ)

Si on souhaite avoir une fiabilité de 90 % pour l'ensemble des 2000 composants montés en série, déterminons la fiabilité que doit avoir chaque composant.

$$R(s) = 0.9 = (R^{2000})$$

Expression que l'on peut écrire, à partir des logarithmes népériens sous la forme:

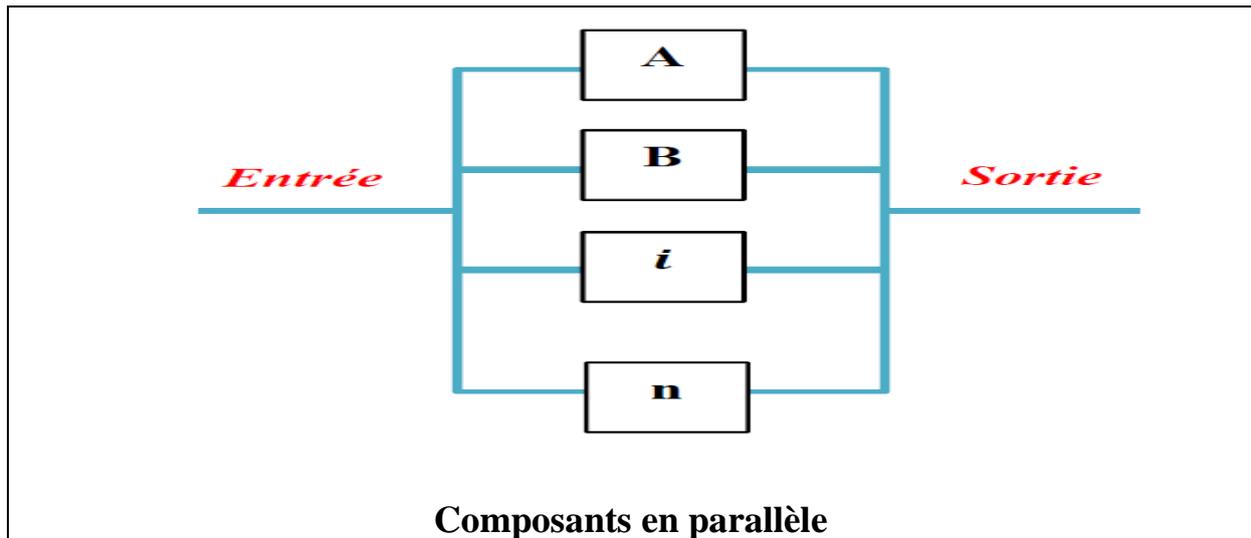
$$\ln R_s = \ln 0.9 = 2000 \ln R \quad \text{D'où } \mathbf{R = 0.999945}$$

### b. En parallèle

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle. Un dispositif constitué de  $n$  composants en parallèle ne peut tomber en panne que si les  $n$  composants tombent en panne au même moment. si  $F_i$  est la probabilité de panne d'un composant, la fiabilité associée  $R$  est son complémentaire

$$F_i = 1 - R_i$$

$F_i$  : représentant la fiabilité associée.



Soit les “n” composants de la figure ci-dessous montés en parallèle. Si la probabilité de panne pour chaque composant repéré (*i*) est notée  $F_i$  alors:

$$R(s) = 1 - (1 - R)^n$$

Le cas particulier de deux dispositifs en parallèle si  $\lambda$  est constant  $R_s$  est obtenu par :

$$R_s = 1 - (1 - R_A) * (1 - R_B) = R_A + R_B - R_A * R_B = e^{-\lambda_A t} + e^{-\lambda_B t} - e^{-(\lambda_A + \lambda_B)t}$$

**Exemple :**

Trois dispositifs A, B et C de même fiabilité  $R_A = R_B = R_C = 0.75$  sont connectés en parallèle.

Déterminons la fiabilité  $R_s$

de l'ensemble :

$$R(s) = 1 - (1 - 0.75)^3 = 0.984$$

Si on réduit le nombre des composants à deux :

$$R(s) = 1 - (1 - 0.75)^2 = 0.9375$$

Si on met quatre dispositifs en parallèle :

$$R(s) = 1 - (1 - 0.75)^4 = 0.9961$$

- **Cas des systèmes connectés en parallèle et dis en attente**
  - **Cas de deux composants en attente**

Pour le système proposé, le composant **A** est en service actif et le composant **B** en attente. Si **B** tombe à tour en panne, il est automatiquement remplacé par . etc. Si tous les composant sont identique avec  $\lambda$  constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} ( e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} ) + e^{-\lambda_A t}$$

- **Cas de . composants en attente**

Même démarche que précédemment, si **A** le composant actif tombe en panne, il est remplacé Par **B** . Si **B** tombe à son tour en panne, il est automatiquement remplacé par **C** ....etc. Si tous les composants sont identiques avec  $\lambda$  constant, la fiabilité du dispositif est donnée par :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \left[ 1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^n}{n!} \right]$$

- **Cas où m composants sur les n sont nécessaires au succès du système**

Si on suppose que le système se compose de **n** composants **K** , tous de même fiabilité **R** et qu'il doit y avoir au moins deux composants en état de fonctionnement, la fiabilité de l'ensemble est donnée par la relation :

$$R_s = \sum_{i=m}^n \left( \frac{n!}{i!(n-i)!} \right) R^i (1 - R)^{n-i}$$

### **b. Combinaison de composants en série et en parallèle**

C'est la combinaison des deux sous-paragraphes précédents.

**Exemple :** La fiabilité des trois composants identiques **A**, **B** et **C** est de 0.65, celle de **D** de 0,96 ; celle de **E** 0, 92 ; celle de **G** 0, 87 ; celle de **F** de 0,89 et celle de **H** de 1 (100%). La fiabilité globale  $R_s$  est exprimée ici par :

$$R_s = [1 - (1 - 0.65)^3] * [0.96] * [1 - (1 - 0.92 * 0.87)(1 - 0.89 * 1)] = 0.957 * 0.96 * 0.978 = \mathbf{0.8986 \text{ environ } 90\%}$$

### **Lois de fiabilité**

On distingue deux types de lois de probabilité utilisées en fiabilité : les lois discrètes et les lois continues .

- **Lois discrètes**

Une loi est dite discrète si elle prend ses valeurs dans  $\mathbb{N}$  c'est à dire des valeurs entières comme par exemple celle qui compte le nombre de pannes.

Parmi les lois discrètes on peut citer : 1) Loi Uniforme, 2) Loi de Bernoulli, 3) Loi Binomiale, 4) Loi Binomiale négative, 5) Loi Géométrique, 6) Loi Hypergéométrique, 7) Loi de Poisson.

- **Les lois continues**

Parmi les lois continues on peut citer : 1) La loi du Khi deux, 2) La loi de Birnbaum- Saunders, 3) La loi Gamma, 4) Loi Inverse Gamma, 5) La loi logistique, 6) La loi loglogistique, 7) La Loi de Cauchy, 8) La loi de Student, 9) La loi Bêta, 10) La loi exponentielle, 11) La loi de Fisher, 12) La Loi normal, 13) La loi Log normale, 14) La loi de Weibull

### Exemples étudiés

➤ **La loi de Weibull**

L'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ( $\beta = 1$ ) et de la loi normale ( $\beta = 3$ ). Sa fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Avec les paramètres de signification :  $\gamma, \beta, \eta$  définissent la distribution

de Weibull. On utilise trois paramètres :

- $\beta$  : paramètre de forme ( $\beta > 0$ )
- $\eta$  : paramètre d'échelle ( $\eta > 0$ )
- $\gamma$  : paramètre de position ( $-\infty < \gamma < \infty$ )

➤ **La loi exponentielle**

En raison des applications multiples de cette loi qui n'est autre qu'un cas particulier de la loi de Weibull, on présentera dans ce qui suit un large développement de cette loi avec plusieurs applications.

Nous allons étudier des phénomènes physiques où la durée de vie est l'intervalle de temps écoulé entre l'instant de la mise en fonctionnement ou de la naissance, et l'instant de la première panne ou de la mort.

La plupart des phénomènes naturels sont soumis au processus de vieillissement. Il existe des phénomènes où il n'y a pas de vieillissement ou d'usure. Il s'agit en général de phénomènes accidentels. Pour ces phénomènes, la probabilité, pour un objet d'être encore en vie ou de ne pas tomber en panne avant un délai donné

sachant que l'objet est en bon état à un instant  $t$  ne dépend pas de  $t$ . Par exemple, pour un verre en cristal, la probabilité d'être cassé dans les cinq ans ne dépend pas de sa date de fabrication ou de son âge. Par définition, on dit qu'une durée de vie est sans usure si la probabilité de survie à l'instant  $t$  ne dépend pas de  $t$ .

Les modèles de fiabilité basés sur le taux de panne aléatoire sont les plus utilisés Hypothèses :

- ✓ Le taux de défaillance  $\lambda(t)$  est indépendant de l'âge du système
- ✓ Pour le système qui opère sur demande, la panne à la  $n$ ème demande est indépendante de celles à la  $n-1$  demande.
- ✓ Pour le système opérant en continu, ceci représente un  $\lambda(t)$  constant

Pour caractériser la durée de vie et mettre en évidence la notion de vieillissement. On montre en particulier l'utilité pratique de la loi exponentielle pour approcher la distribution des temps de panne.

La distribution exponentielle s'exprime ainsi :

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

Avec les paramètres de significations :

$e$  : est la base de l'exponentielle (2,718...)

$\lambda$  : c'est l'intensité.

$$\text{Densité de probabilité : } f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$\text{La fonction de répartition : } F(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t}$$

La distribution exponentielle s'applique aux systèmes opérants en continu (systèmes électroniques) c'est ce qu'on appelle distribution sans mémoire. Les systèmes complexes ont aussi un  $\lambda(t)$  constant

### I.7. Modèles de fiabilité

On ne peut parler de mesure de fiabilité (modèles) 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 :** c'est la fiabilité mesurée au cours d'essais spécifiques effectués dans le cadre d'un programme d'essai entièrement défini.

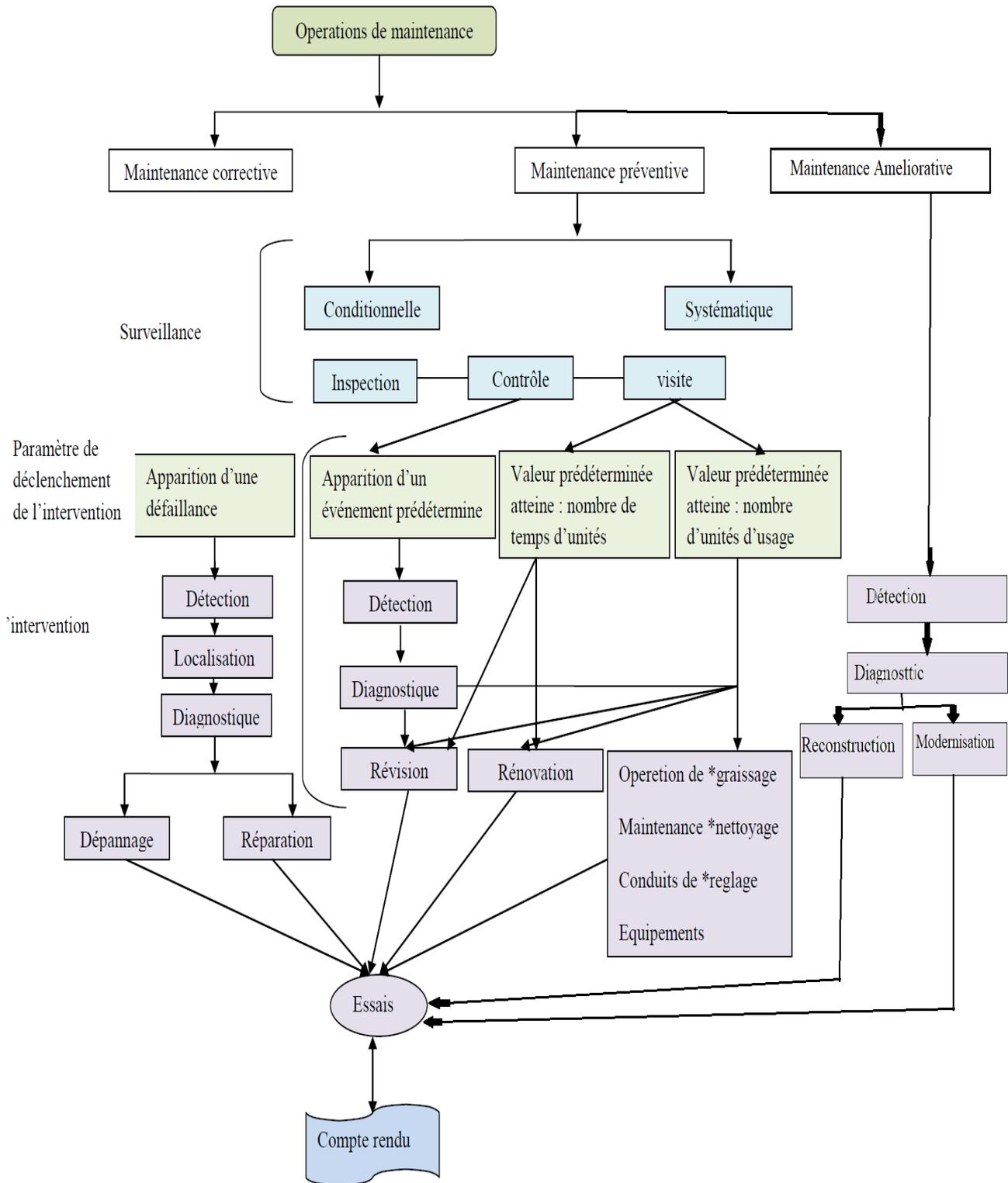
**b. La fiabilité prévisionnelle :** elle est obtenue à partir d'un modèle mathématique connaissant la fiabilité estimée de ces composants (modèles déductifs).

Les propriétés du système complet sont déduites d'une connaissance détaillée des propriétés de ses composants.

**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.

### **I.8. Les différentes formes de la maintenance**

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise. Pour choisir, il faut donc être informé des objectifs de la direction, des directions politiques de maintenance, mais il faut connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels, le comportement du matériel en exploitation, les conditions d'application de chaque méthode, les coûts de maintenance et les coûts de perte de production .



Les méthodes de maintenance

## Maintenance corrective

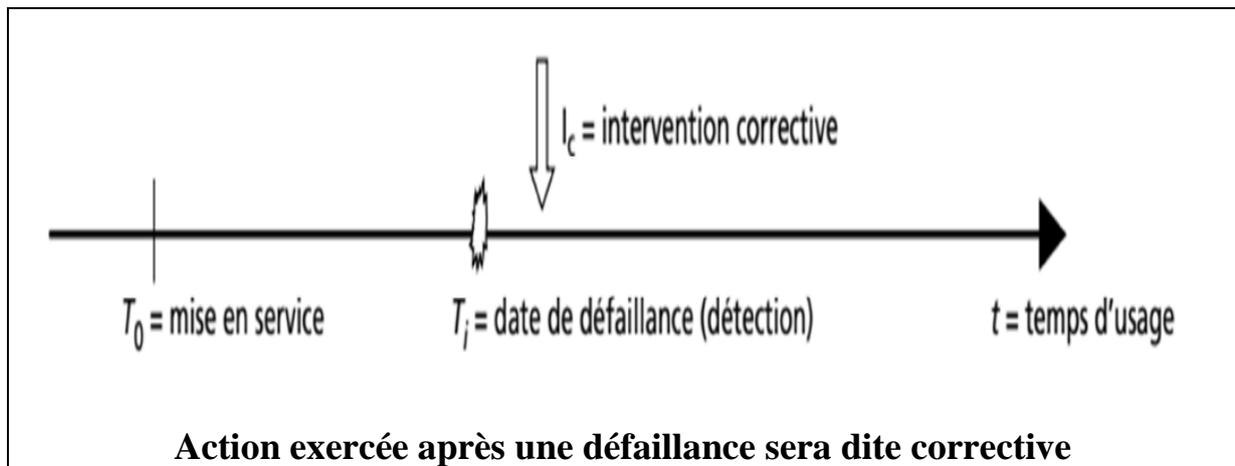
- **Définitions**

La maintenance corrective ou accidentelle est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

- ✓ Elle peut être « différée » : si elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données.
- ✓ Elle peut être « d'urgence » : si elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables.

- **Définitions (extraits normes NF X 60-010)**

La maintenance corrective appelée parfois curative (terme non normalisé) a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues nécessaires à son utilisation. Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés et/ou une dépréciation en quantité et/ou qualité des services rendus.



La Figure montre que l'action exercée après une défaillance sera dite corrective et notée  $I_c$ . (intervention corrective).

## Maintenance curative

Ce type de maintenance permet de remettre définitivement en état le système après l'apparition d'une défaillance. Cette remise en état du système est une réparation durable. Les équipements réparés doivent assurer les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Une réparation est une opération définitive de la maintenance curative qui peut être décidée soit immédiatement à la suite d'une défaillance, soit après un dépannage.

C'est l'ensemble des activités réalisées après défaillance d'un bien ou dégradation de sa fonction, afin de lui permettre d'accomplir, au moins provisoirement, une fonction requise. Ces activités comprennent la détection/localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, et le contrôle du bon fonctionnement.

La remise en état peut prendre deux formes : le dépannage ou la réparation.

➤ **Détection**

Action de déceler au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.

➤ **Localisation**

Action conduisant à rechercher précisément le ou les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.

➤ **Diagnostic**

Identification de la cause probable de la (ou des) défaillance(s) à l'aide d'une analyse ou d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Le diagnostic confirme, complète ou modifie les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et précise les opérations de maintenance correctives nécessaires.

➤ **Dépannage**

En dehors des défaillances imprévisibles qui guettent tout équipement, le dépannage est la méthode la plus appropriée pour :

- les équipements secondaires au fonctionnement sporadique
- les équipements à faible coût de défaillance,
- les équipements pour lesquels une méthode de maintenance plus élaborée est inadéquate : difficultés de démontage pour visites ou contrôles, matériel en fin de carrière, matériel bon marché...

Du fait du caractère imprévu de la panne, l'ordonnement des travaux de dépannage est impossible. Cependant, on doit envisager une amélioration des conditions d'exécution, afin de faire du dépannage une méthode rationnelle et efficace.

**Se préparer au dépannage consiste donc à :**

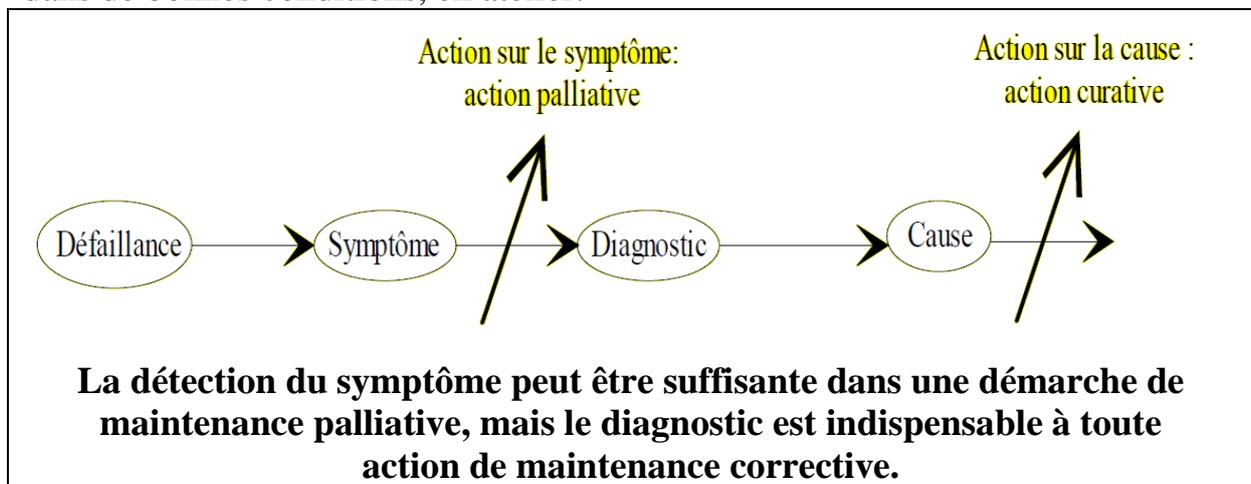
**Être prêt à intervenir :** pour cela, le personnel doit être compétent, entraîné et équipé pour certains travaux, éventuellement spécialisé dans certains types de pannes et d'équipements, disponible, formé pour toute nouvelle technologie introduite sur le site, il doit disposer de moyens d'alerte, d'outillages et d'éléments de rechange adaptés à la demande supposée.

**Savoir où intervenir :** l'efficacité du dépannage passe par une très bonne connaissance des équipements, de leur fonctionnement, et des circonstances qui peuvent amener à la défaillance. Cette connaissance peut être améliorée par exemple en procédant à des analyses fonctionnelles des équipements.

### Savoir comment intervenir :

Une fois la cause de la panne découverte, le problème doit être résolu le plus rapidement possible, selon la procédure la plus logique possible. Toute perte de temps due à des hésitations concernant l'ordre de démontage, toute fausse manœuvre conduisant à endommager un composant sain, peuvent être évitées si l'on dispose de documents d'aide à l'intervention guidant le personnel au cours des opérations.

L'efficacité du dépannage peut aussi être accrue par le traitement de sous-ensembles en échanges standards : afin de gagner du temps, plutôt que de réparer sur place le sous-ensemble défectueux, on le remplacera par un autre en bon état. La réparation de l'élément défaillant sera alors entreprise ultérieurement dans de bonnes conditions, en atelier.



### Objectifs du dépannage et problèmes potentiels :

**Protéger les utilisateurs et le matériel :** le risque sera-t-il suffisamment réduit ? pendant combien de temps ? quelles précautions doit-on prendre ?

• **Permettre de continuer l'exploitation :** le service fournit ne sera-t-il pas dégradé ?

• **Permettre d'attendre le moment opportun** pour faire la réparation définitive : peut-on décider à quel moment cette réparation définitive pourra être faite ?

• **Donner le temps** de préparer et de planifier la réparation.

### Réparation

Elle peut prendre différentes formes :

- Réparation limitée, intervenant après panne,
- Échange standard d'un sous-ensemble,
- Remise en état de l'échange standard précédemment déposé.

La réparation permet la remise en état, **de façon durable**, d'un équipement usagé ou immobilisé à la suite d'un incident, ou dégradé, n'assurant plus dans des conditions acceptables la fonction qui est la sienne. Elle doit donc satisfaire à deux exigences :

- **Sécurité d'exploitation**
- **Fiabilité.**

La réparation doit en outre restituer ses qualités initiales à l'équipement. Cependant, le retour aux performances initiales peut s'avérer très onéreux, et l'on se limitera lorsque c'est possible, à un niveau acceptable bien qu'inférieur à celui de l'équipement neuf. La réparation n'est pas exclusivement une activité de maintenance corrective, elle peut intervenir :

- A la suite d'un dépannage provisoire,
- Après une visite en maintenance conditionnelle, ayant permis de déceler un risque de défaillance à venir,
- Après un arrêt programmé en maintenance systématique,
- Sur un équipement en panne ou présentant des signes de défaillance.

### **Maintenance palliative**

La maintenance palliative revêt un caractère temporaire, provisoire. Elle est principalement constituée d'opérations qui devront toutefois être suivies d'opérations curatives (réparations). Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement de manière à ce qu'il puisse assurer une partie des fonctions requises.

### **Maintenance préventive**

Opération de maintenance effectuée avant la détection d'une défaillance d'une entité, à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits (suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs) et destinée à réduire la probabilité de défaillance d'une entité ou la dégradation du fonctionnement d'un service rendu.

C'est l'ensemble des activités réalisées selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu. Lorsque le critère est un nombre prédéterminé d'unités d'usage (heures de fonctionnement, kilomètres parcourus, pièces produites...), on se place dans une démarche de **maintenance systématique**. S'il est une valeur prédéterminée (un seuil) significative de l'état de dégradation du bien ou du service, on est alors dans le cas de la **maintenance conditionnelle** (appelée également maintenance selon état).

Elle est subdivisée en :

- Maintenance systématique
- Maintenance conditionnelle
- Maintenance prévisionnelle

Note : L'intervention préventive sert à améliorer l'état de l'élément. Par conséquent, seules les défaillances progressives sont prises en compte ici.

- **Maintenance prévisionnelle** : Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

**Maintenance systématique :** Maintenance préventive 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 La maintenance systématique se traduit par l'exécution sur un équipement, à dates planifiées (ou à volume prédéfini d'unités d'usage atteint), d'interventions dont l'importance peut s'échelonner depuis le simple remplacement de quelques pièces jusqu'à la révision générale.

Les travaux ont un caractère systématique, ce qui suppose une parfaite connaissance du comportement de l'équipement, de ses modes et de sa vitesse de dégradation.

La maintenance systématique se pratique quand on souhaite procurer à un équipement une sécurité de fonctionnement quasi absolue en remplaçant suffisamment tôt les pièces ou organes victimes d'usure ou de dégradations. Cette recherche de garantie de fonctionnement conduit à remplacer des pièces dont l'usure est incomplète. C'est donc un procédé qui coûte cher et que seule la nécessité d'une sécurité de haut niveau peut justifier.

Étant donné son caractère particulier, la maintenance systématique doit être appliquée avec discernement, elle conviendra plus particulièrement :

- aux équipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves,
- aux équipements présentant un coût de défaillance élevé,
- aux équipements soumis à la législation, c'est à dire faisant l'objet de mesures de sécurité règlementées.

L'organisation de la maintenance systématique recouvre deux aspects :

- La détermination du contenu des interventions,
- Le choix de la périodicité.

- **Maintenance conditionnelle :** Maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement et intégrant les actions qui en découlent La maintenance conditionnelle se traduit par une surveillance des points sensibles de l'équipement, exercée au cours de visites préventives. Ces visites soigneusement préparées, permettent d'enregistrer un degré d'usure, un jeu mécanique, une température, une pollution, ou tout autre paramètre qui puisse mettre en évidence l'imminence d'une défaillance.

### **Objectifs de la maintenance conditionnelle**

- Éliminer ou limiter le risque de panne, l'intervention ayant lieu avant que la dégradation n'atteigne un caractère critique (et donc, ralentir le vieillissement),
- Limiter les perturbations subies par l'utilisateur, en réalisant une meilleure préparation des interventions,
- Réduire les dépenses de maintenance en intervenant à un stade précoce des dégradations, évitant ainsi les remises en état très coûteuses.

## **Maintenance Améliorative**

Remise en cause du système en vue d'éliminer définitivement le dysfonctionnement.