

CHAPITRE III

CONCEPTS DE LA FMD

FIABILITÉ

MAINTENABILITÉ

DISPONIBILITÉ

III.1 Généralités

La vie d'un équipement est une succession d'arrêts **TA** (pannes ou actions de maintenance préventive) et de bon fonctionnement **TBF** pendant sa durée d'utilisation:



Figure III.1. Vie d'un équipement.

La vie d'un équipement ne commence pas à partir de sa première mise en fonctionnement mais pendant sa conception et sa fabrication :

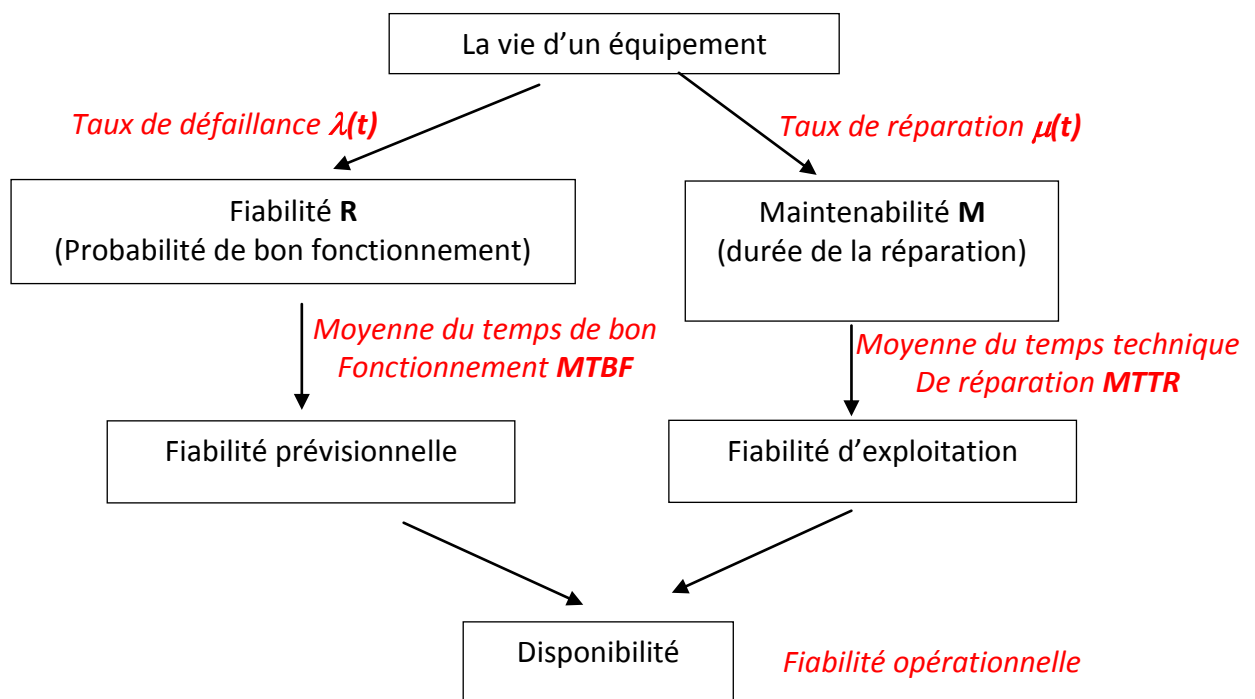


Figure III.2. Répartition de la vie d'un équipement.

Ces concepts peuvent être envisagés, d'une façon prévisionnelle lors de la fabrication et la conception, et d'une façon opérationnelle pendant et après usage.

La fiabilité prévisionnelle est déterminée à partir de :

- La qualité des études appelée fiabilité de conception.
- La qualité des composants appelée fiabilité des composants.
- La qualité des méthodes et montage appelée fiabilité de fabrication.

La fiabilité d'exploitation est quant à elle déterminée à partir des conditions d'utilisation désignée par la fiabilité de conduite et d'entretien.

III.2 Notion de durée d'usage

La notion de temps est fondamentale en maintenance, elle apparaît souvent dans les définitions AFNOR sous forme de durée d'usage :

- Usage : Utilisation d'un équipement ou d'un produit en vue d'obtenir un service.
- Durée d'usage : Grandeur finie choisie pour quantifier un usage.

L'unité d'usage la plus utilisée est l'heure, elle peut être parfois exprimée en semaine, en jour, en mois ou en année. D'autres unités peuvent aussi être utilisées telles que les cycles de fonctionnement pour les turbines (machines fonctionnant 24h/24h et 7j/7j). Pour les véhicules l'unité utilisée est le kilomètre (km). Le nombre de pièces produites est aussi utilisé comme unité d'usage pour les machines de production (fraiseuses, tour, ...).

1. Exemple

Une turbine à gaz d'une centrale électrique tourne à 3000 tr/mn. Après 2000 h de travail, une action de maintenance préventive est prévue du type contrôle des appareils de mesure de la pression. Calculer le nombre de cycles correspondants à ces 2000 h de travail.

La turbine d'une centrale électrique est une machine tournante fonctionnant 24/24 h, il est intéressant dans certains cas d'exprimer la durée d'usage en nombre de cycles :

Nous exprimons d'abord cette durée en minutes :

$$1/ \quad 2000 \times 60 = 12 \cdot 10^4 \text{ mn}$$

2/ en multipliant par la vitesse de rotation, nous obtenons cette durée en cycles :

$$12 \cdot 10^4 \times 3000 = \mathbf{36 \cdot 10^7 \text{ cycles}}$$

III.3 Fiabilité

En terme statistique, la fiabilité est une fonction **$R(t)$** représentant la probabilité de bon fonctionnement d'une machine ou d'un équipement d'une façon générale. Nous parlons de probabilité car tant que la machine n'a pas fonctionné nous ne pouvons connaître son comportement.

En termes de qualité, la fiabilité d'un équipement est définie comme l'aptitude ou la capacité de ce dernier à maintenir la conformité à sa spécification d'origine.

- **Equipements en série**

Les constituants d'un équipement sont en série si quand l'un de ces constituants est défaillant alors l'ensemble sera défaillant. Par conséquent, la fiabilité R de l'ensemble en fonction de la fiabilité R_i de chaque constituant est donnée par :

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (\text{III.1})$$

- **Equipements en parallèle**

Un ensemble de constituants en parallèle sera défaillant quand tous ses constituants sont défaillants. Par conséquent, la fiabilité R de l'ensemble en fonction de la fiabilité R_i de chaque constituant est donnée par :

$$1 - R(t) = \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (\text{III.2})$$

Exemple

Une centrale électrique est constituée de trois groupes indépendants. Chaque groupe est constitué d'une turbine de fiabilité R_{turb} , d'un compresseur de fiabilité R_{comp} et d'un alternateur de fiabilité R_{alt} . Calculer la fiabilité de la centrale.

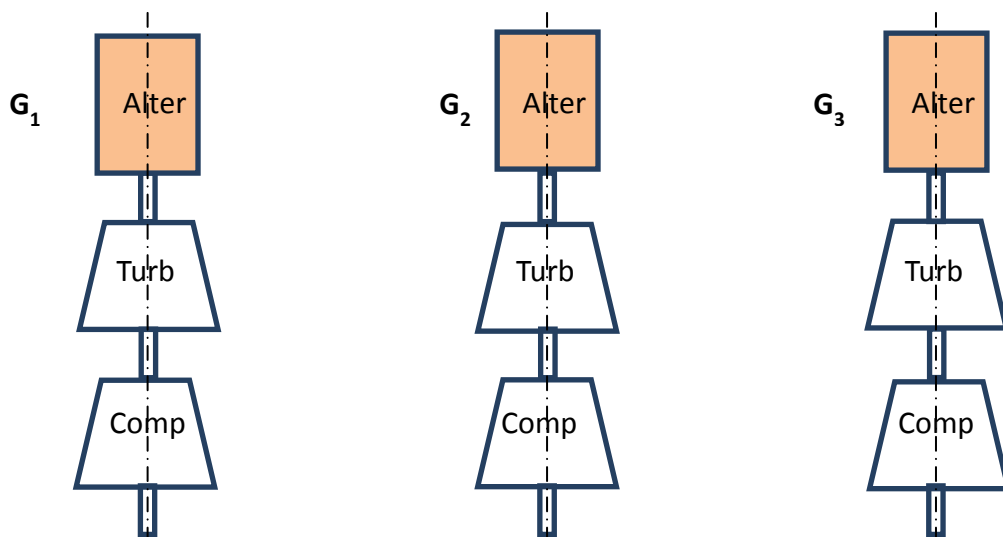


Figure III.3. Trois groupes indépendants montés en parallèle.

Le compresseur, la turbine et le compresseur sont en série.

La fiabilité de chaque groupe si les turbines sont identiques, idem pour les compresseurs et les alternateurs, est donné par :

$$R_{G1} = R_{G2} = R_{G3} = R_{Comp} \cdot R_{Turb} \cdot R_{Alter}$$

Les groupes sont identiques et montés en parallèle (indépendants), la fiabilité de la centrale est donc donnée par:

$$1 - R_{centrale} = (1 - R_{G1}) \cdot (1 - R_{G2}) \cdot (1 - R_{G3}) = (1 - R_G)^3 \\ = (1 - R_{Comp} \cdot R_{Turb} \cdot R_{Alter})^3$$

$$R_{centrale} = 1 - (1 - R_{Comp} \cdot R_{Turb} \cdot R_{Alter})^3$$

III.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance λ est un estimateur ou un indicateur de fiabilité. Il est exprimé très souvent en défaillances/h, défaillants/h ou pannes/h. Il peut être exprimé aussi en pannes/km ou pannes/ nombre de pièces fabriquées, il est donné par :

$$\lambda = \frac{\text{Nombre de pannes (défaillants ou défaillances)}}{\text{Durée d'usage}} \quad (\text{III.3})$$

La vie des équipements se présente en trois (03) phases :

- **Phase de jeunesse** : $\lambda(t)$ décroît rapidement, elle correspond à la période de mise en service et de rodage de l'équipement ou de l'installation (équipements mécaniques). Les défaillances sont dues à des anomalies de montage ou de fabrication mais aussi de contrôle qualité.
- **Phase de maturité** : $\lambda(t)$ est globalement constant, elle correspond à la durée de vie utile de l'équipement. La défaillance est plutôt aléatoire, elle est généralement due à une mauvaise manipulation de l'opérateur ou un agent extérieur (foudre, conditions climatiques, ...). Cette période correspond au rendement optimal de l'équipement.
- **Phase de vieillesse** : $\lambda(t)$ décroît rapidement, c'est la période correspondant à la dégradation accélérée de l'équipement. Cette phase est liée à l'usure mécanique, à

la fatigue, à l'érosion ou la corrosion, ... Il s'ensuit alors le déclassement de l'équipement :

- Achat d'un nouvel équipement ou
- rénovation de ce dernier.

Le graphe représentant cette variation de $\lambda(t)$ est appelée la courbe baignoire :

Figure III.4. Courbe en baignoire.

Durant la phase de jeunesse on ne pratique que la maintenance corrective, pendant la phase de maturité beaucoup de préventif et peu de correctif, par contre en phase de vieillesse beaucoup de correctif et peu de préventif.

- **Remarques**

$R(t)$: probabilité de bon fonctionnement désignée par la fiabilité

$F(t) = 1 - R(t)$: Fonction de répartition de la défaillance

λ : Taux de défaillance, taux moyen

$\lambda(t)$: taux instantané.

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \quad (\text{III.4})$$

III.5 Lois de fiabilité

La fiabilité $R(t)$ représente la probabilité ou la possibilité de survie entre les instants 0 et t.

III.5.1 La loi exponentielle

Elle est donnée par :

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (\text{III.5})$$

C'est une loi très utilisée en phase de maturité où $\lambda(t)$ est globalement constant, ce qui entraîne :

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{III.6})$$

III.5.2 La loi de Weibull

Contrairement à la loi exponentielle, la loi de Weibull couvre aussi le cas où $\lambda(t)$ est variable. Elle s'ajuste donc aux phases de jeunesse et vieillesse, elle décrit par conséquent la durée de vie de l'équipement ou de l'installation. Elle est donnée par :

$$R(t) = e^{-\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad (\text{III.7})$$

β , γ et η sont des paramètres déterminés empiriquement par le constructeur après la phase de fabrication et plus exactement en phase d'essai de l'équipement appelée aussi phase d'avant-projet :

β : $\beta > 0$, Paramètre de forme.

η : $\eta > 0$, Paramètre d'échelle.

γ : $-\infty < \gamma < \infty$, paramètre de position.

La défaillance est quant à elle donnée par :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t-\gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \quad (\text{III.8})$$

III.5.3 MTBF

Elle définit la Moyenne du Temps de Bon Fonctionnement ou plus exactement en anglais, Middle Time Between Failure (MTBF) :

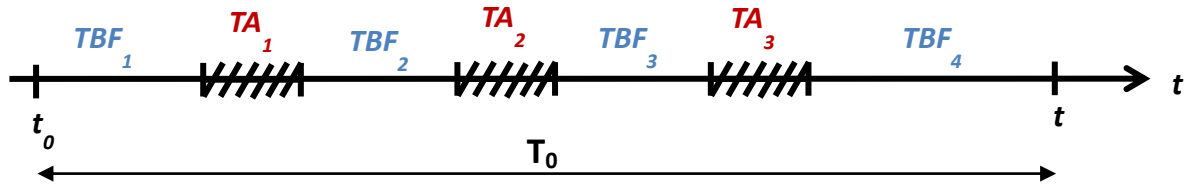


Figure III.5. Répartition du temps de bon fonctionnement.

T_0 : temps requis ou temps d'ouverture, il correspond au temps sur lequel nous calculons le *MTBF*.

$$MTBF = \sum_{i=1}^n \frac{TBF_i}{n} \quad (III.9)$$

Concrètement le *MTBF* veut dire que la machine est capable de fonctionner en moyenne pendant un temps $t = MTBF$ sans présenter de défaillances.

III.5.3 MTTR

Réellement le temps d'arrêt TA est constitué d'un temps technique de réparation TTR et du temps d'approvisionnement de la pièce de rechange, du temps d'acheminement du (des) maintenancier(s), du temps de remise en marche de l'équipement, ...

*Temps de détection,
d'acheminement des outils,
des maintenanciers, ...*

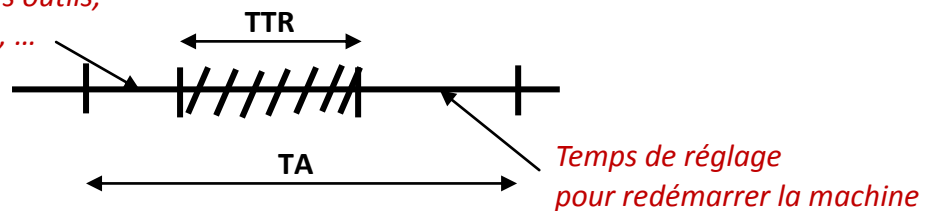


Figure III.6. Temps d'arrêt d'une machine.

La moyenne technique du temps de réparation MTTR est donnée par :

$$MTTR = \sum_{i=1}^n \frac{TTR_i}{n} \quad (III.10)$$

Nous pouvons ainsi définir le taux de réparation μ :

$$\mu = \frac{1}{MTTR} \quad (III.11)$$

Le *MTTR* représente le temps qu'il faut en moyenne pour une machine pour être réparée si elle tombe en panne. C'est une grandeur qui définit la maintenabilité.

Dans le cas d'une action de maintenance préventive, le temps d'arrêt *TA* représente pratiquement le *TTR*.

III.5.4 La disponibilité *D*

Elle représente la disponibilité d'un équipement sur une durée finie (T_0 par exemple). Donnée en pourcentage (%), elle est souvent assimilée à la fiabilité opérationnelle :

$$D = \frac{T_0 - \sum TA}{T_0} \quad (\text{III.12})$$

Elle peut être aussi approchée par:

$$D \approx \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (\text{III.13})$$

Ces valeurs et indicateurs peuvent être calculés pour un équipement ou un ensemble d'équipements (installation). Ils sont calculés après observation sur une durée finie T_0 (tableaux, statistiques, descriptifs,...) et utilisés pour faire des prévisions sur la maintenance en phase de maturité.

Ils peuvent être calculés de façon prévisionnelle (prédits) en utilisant la fiabilité:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t).dt \quad (\text{III.14})$$

Phase de maturité, nous utilisons la loi exponentielle :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{III.15})$$

Sur l'étendue de la durée de vie de l'équipement y compris les phases de jeunesse et vieillesse, nous utilisons la loi de Weibull :

$$MTBF = \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)^{\eta+\gamma} \quad (\text{III.16})$$

III.5.5 Périodicité T de la maintenance préventive

Par principe, la visite systématique (Maintenance préventive systématique) est déclenchée avant l'apparition de la défaillance. La périodicité de cette visite est alors:

$$T = k.MTBF \quad (\text{III.17})$$

k: Coefficient d'optimisation ou paramètre économique.

- Plus **k** est petit plus il y a du préventif et moins de correctif et donc des interventions plus fréquentes entraînant ainsi des Coûts directs plus élevé, par contre le risque de défaillance diminue
- Plus **k** est grand plus il y aura du correctif et moins de préventif avec toutes les conséquences du correctif surtout par rapport à la recherche de la défaillance.

Il va falloir trouver alors un compromis, cela dépend de la stratégie de l'entreprise. Elle définit une politique de maintenance, elle définit ainsi un seuil de correctif entre **5 %** et **10 %**, permettant ainsi d'évaluer **k**.

Remarque

En introduisant ces valeurs et indicateurs de fiabilité, le taux de défaillance en réalité est sous la forme suivante:

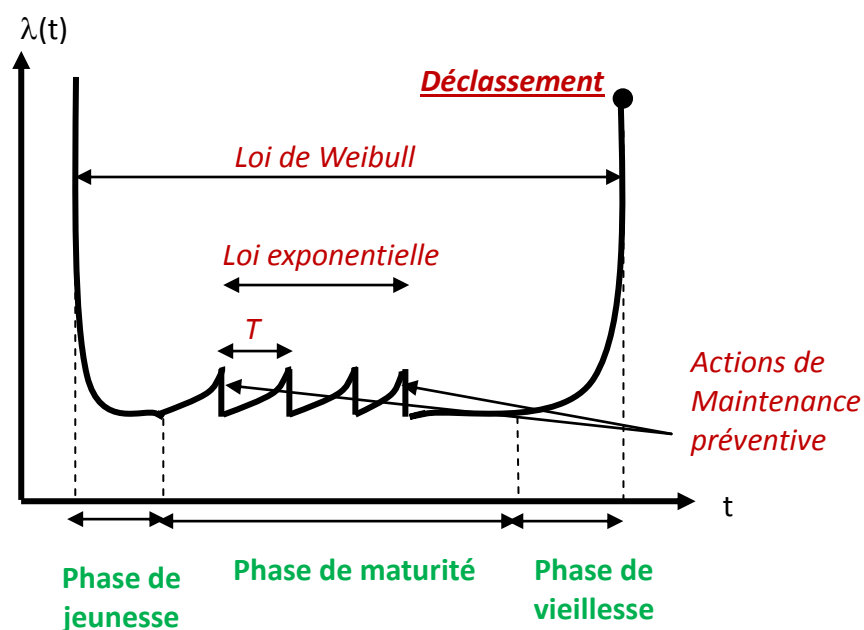


Figure III.7. Taux de défaillance réel d'une machine.

En réalité, en phase de maturité $\lambda(t)$ n'est pas constant il croit légèrement, cela est dû à une usure lente au niveau de cette phase. Des actions de maintenances préventives sont nécessaires pour garder $\lambda(t)$ globalement constant.

Par contre en phase de vieillesse $\lambda(t)$ croit rapidement, dû à une usure accélérée. Il s'ensuit alors le déclassement qui s'entrevoit de deux façons :

- Renouvellement de l'équipement, dans ce cas une concertation s'établit entre la production et la maintenance afin de décider, en commun accord, du type d'équipement (même type ou type différent).
- Rénovation de l'équipement, il s'agira dans ce cas d'une maintenance de niveau 5.