

Chapitre

3

Utilisation des modèles de fiabilité pour l'optimisation de la maintenance

3.1 Généralités sur la maintenance

Définition 3.1.1 – Définition de la maintenance (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 définition de la maintenance fait donc apparaître quatre notions :

- Maintenir, qui suppose un suivi et une surveillance.
- Rétablir, qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut.
- État spécifié et service déterminé, qui précisent 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.

3.1.1 Objectifs de la maintenance

Les principaux objectifs de la maintenance sont

- Assurer le maintien (la disponibilité) des équipements de production.
- Assurer la disponibilité des équipements : garantir que les machines fonctionnent quand nécessaire.
- Prévenir les pannes et défaillances : réduire les interruptions de production et les coûts liés aux réparations d'urgence.

-
- Prolonger la durée de vie des équipements.
 - Garantir la sécurité.
 - Optimiser les coûts de maintenance : réaliser les interventions de manière planifiée et efficace afin de limiter les dépenses.

3.1.2 Types de maintenance

Il existe plusieurs façons d'organiser les actions de maintenance pour obtenir la disponibilité maximale du matériel au coût minimum. On distingue deux types de maintenance :

- La maintenance corrective
- La maintenance préventive

Maintenance corrective

La maintenance corrective est exécutée après la détection d'une panne. C'est l'ensemble des activités réalisées après la panne du système, pouvant être liée à sa défaillance ou à la dégradation de sa fonction.

Elle se subdivise en :

- La maintenance curative
- La maintenance palliative

Maintenance curative

Action de maintenance corrective destinée à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Elle est appelée couramment « dépannage ».

Maintenance palliative

Le dépannage est une opération de maintenance palliative qui est destinée à remettre le système en état provisoire de fonctionnement.

Maintenance préventive

La maintenance préventive est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits. Elle est destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien.

À partir de cette définition générale, on distingue trois formes de maintenance préventive :

Maintenance systématique

La maintenance systématique est une forme de maintenance dont les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier planifié. Les opérations telles que le remplacement de pièces ou de fluides sont effectuées périodiquement.

Maintenance conditionnelle

C'est une maintenance déclenchée en fonction de l'état réel du bien, sur la base de critères prédéterminés.

Maintenance prévisionnelle

La maintenance prévisionnelle est une maintenance préventive basée sur la surveillance de paramètres clés de dégradation, permettant de prévoir et de planifier les interventions.

3.2 Impact de la fiabilité sur la durée de vie des systèmes et sur la productivité

La fiabilité constitue un facteur déterminant dans la performance des systèmes industriels. Elle influence à la fois la durée de vie des équipements et leur contribution à la productivité globale.

3.2.1 Fiabilité et durée de vie des systèmes

La durée de vie d'un système industriel dépend directement de son niveau de fiabilité. Plus un équipement est fiable, plus sa période d'opération sans défaillance est longue.

L'analyse de taux de défaillance permet d'identifier le moment où l'équipement entre dans une phase critique nécessitant un remplacement ou une révision majeure.

3.2.2 Impact de la fiabilité sur la productivité

La fiabilité a un impact majeur sur la productivité, des pannes fréquentes entraînent des arrêts non planifiés une baisse du rendement, une perte de qualité et une augmentation des coûts d'exploitation. À l'inverse, un système fiable assure une disponibilité élevée, un meilleur flux de production et une maîtrise des coûts de maintenance.

3.3 Optimisation de la production industrielle

Dans un contexte industriel moderne, l'optimisation dépend fortement de la fiabilité des équipements.

Dans le cadre de l'optimisation de la maintenance, l'interaction entre fiabilité et optimisation est fondamentale. Les modèles de fiabilité apportent des informations quantitatives essentielles sur le comportement des équipements.

Une bonne fiabilité permet :

- Une meilleure stabilité de lignes.
- Augmentation du rendement des équipements.
- Une réduction des pertes de cadence.
- Les délais de livraison maîtrisés.

De quelle manière la fiabilité modifie-t-elle la capacité de production ?

La capacité de production réelle n'est jamais égale à la capacité théorique. On a :

$$\text{Capacité réelle} = \text{Capacité nominale} \times \text{Disponibilité}$$

avec

Capacité nominale = Production maximale possible par unité de temps (conditions parfaits).

La disponibilité : La disponibilité est la probabilité qu'un système soit opérationnel à un instant donné. Pour un système, la disponibilité est donnée par :

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

$MTTR$ = Mean Time To Repair (durée moyenne de réparation).

Donc si la fiabilité augmente, la disponibilité augmente, et la production réelle augmente.

Exemple : Atelier d'usinage Données :

- Capacité nominale d'une CNC = 50 pièces / heure.
- Disponibilité actuelle = 70%.

Production réelle :

$$C_{\text{réel}} = 50 \times 0,70 = 35 \text{ pièces / heure}$$

L'entreprise installe un système de surveillance vibratoire (moins de pannes mécaniques).

- Nouvelle disponibilité = 90%.

La production dans ce cas :

$$C_{\text{réelle}} = 50 \times 0,90 = 45 \text{ pièces / heure}$$

alors puisque la fiabilité mesure la probabilité de fonctionner sans panne, et la disponibilité mesure la probabilité d'être en état de marche (fonctionnel ou réparé).

Donc, si la fiabilité augmente $\Rightarrow$ MTBF augmente.

$\Rightarrow$ Disponibilité augmente.

$\Rightarrow$ La capacité réelle augmente.

3.4 Optimisation de l'exploitation des systèmes

L'optimisation de l'exploitation des systèmes consiste à utiliser les outils de fiabilité pour organiser et piloter au mieux le fonctionnement d'un équipement. L'objectif est d'adapter l'exploitation selon le comportement de fiabilité.

Les modèles de fiabilité fournissent des informations essentielles = taux de défaillance, périodes sensibles... Ces informations permettent d'adapter l'exploitation (vitesses, charges, cycles, repos, rotations...).

3.4.1 Adapter l'exploitation selon le comportement de fiabilité :

- Si le taux de défaillance augmente avec le temps (Loi de Weibull $\beta > 1$) :

L'exploitation doit être plus facile que le système vieillit :

- réduire la charge.
- limiter les vitesses, pression, températures.
- éviter les démarrages fréquents.

- Taux de défaillance constant $\beta = 1$:

Ici la stratégie clé n'est pas l'exploitation mais surveillance.

- Taux de défaillance décroissant $\beta < 1$:

Exploitation prudente au début puis augmentation :

- limiter la charge initiale.
- monter progressivement vers la charge nominale.
- éviter les contraintes mécaniques.

3.5 Optimisation de la gestion des stocks

La gestion des stocks constitue un élément essentiel de l'optimisation de la maintenance parce qu'elle garantit la disponibilité rapide des pièces de rechange nécessaires aux interventions. Une maintenance ne peut être efficace que si les pièces critiques sont immédiatement accessibles. Sinon, les réparations sont retardées, les temps d'arrêt augmentent et la productivité diminue.

Les modèles de fiabilité permettent d'anticiper :

- le moment où une pièce risque de tomber en panne.
- La durée moyenne entre deux défaillances.
- La probabilité d'avoir plusieurs pannes au même moment.

Exemple 3.5.1:

Si une pompe a un MTBF de 2 ans et qu'on en possède 6 identiques, Les pannes annuelles prévues sont $t = \frac{6}{2} = 3$ pannes par an. Ce nombre permet de définir la quantité à garder en stock.

3.5.1 Outils et techniques d'optimisation

Maintenance centrée sur la fiabilité (RCM) et décisions de stock :

RCM permet de répondre à : Quels composants doivent être remplacés préventivement, réparés ou stockés ? Si la fiabilité on peut stocker systématiquement partiellement seulement pour certaines machines n'est pas stocker.

Utilisation de la distribution de Weibull :

- si $\beta < 1$ = pannes aléatoires $\rightarrow$ stock faible suffisant.
- si $\beta = 1$ = pannes exponentielles $\rightarrow$ stock basé sur le MTBF.
- si $\beta > 1$ = usure rapide $\rightarrow$ augmenter le stock.

Exemple 3.5.2:

Pièce avec $\beta = 2,4$ (usure accélérée). Prévoir un stock plus important vers la fin de la période d'exploitation du système.

3.6 Utilisation des modèles de fiabilité pour gérer des systèmes complexes

Le comportement en termes de défaillance des systèmes industriels modernes dépend de :

- la configuration du système (séries, parallèles, redondances),
- le type de population étudiée (simple, mixte ou complexe).

3.6.1 Population simple

Une population simple est un ensemble de composants qui suivent statistiquement la même loi de durée de vie (même MTBF, Weibull, même λ).

La fiabilité, dans ce cas, permet de : estimer le MTBF, prévoir le nombre annuel de défaillances, dimensionner un stock unique pour plusieurs composants identiques, définir une politique de maintenance préventive.

On peut utiliser :

- le modèle exponentiel,
- ou le modèle de Weibull.

Exemple 3.6.1:

Une ligne possède 12 moteurs identiques. MTBF = 5000 h

Population simple $\Rightarrow$ même loi de fiabilité. **Nombre de pannes annuelles :**

$$\frac{12 \times 8760}{5000} \approx 21 \text{ pannes/an.}$$

La maintenance peut prévoir un stock et un plan basé sur les 21 remplacements.

Remarques 3.6.1

Nombre de pannes par heure = $\frac{1}{\text{MTBF}}$

Pour une année on multiplier par = 8760 heures par an.

Si on a N composants identiques alors

Nombre de pannes annuelles = $\frac{N \times 8760}{\text{MTBF}}$

3.6.2 Population complexe :

Systèmes en Série

La fiabilité R_s d'un ensemble de n constituants connectés en série est égale au produit les fiabilité respectives $R_A, R_B, R_C \dots R_n$ de chaque composant :

$$R_s = R_A \times R_B \times R_C \times \dots R_n$$

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

$$R_s = R^n$$

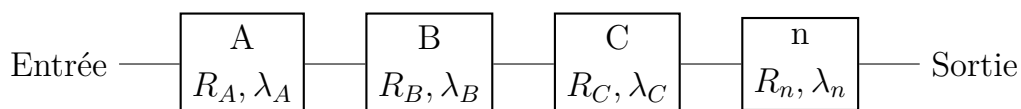


FIGURE 3.1 – Composants en série.

Le système fonctionne seulement si tous les composants fonctionnent.

Si les taux de défaillances sont constants :

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

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

Si en plus les composants sont identiques : $\lambda_A = \lambda_B = \dots = \lambda$
alors :

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

Exemple 3.6.2:

Soit un poste de radio constitué de quatre composants connectés en série :

- Une alimentation $R_A = 0,95$
- Une partie réception $R_B = 0,92$
- Un amplificateur $R_C = 0,97$
- Un haut-parleur $R_D = 0,89$

la fiabilité R_s de l'appareil est

$$R_s = R_A \cdot R_B \cdot R_C \cdot R_D = 0,7545$$

(soit une fiabilité de 75% environ).

Modèles en parallèle (redondance)

La fiabilité d'un système peut être augmentée en plaçant les composants en parallèle et le système continue de fonctionner tant qu'au moins un composant fonctionne.

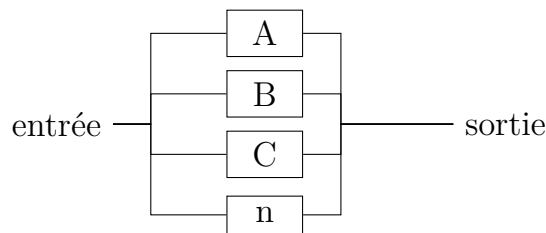


FIGURE 3.2 – Composants en parallèle.

Alors la fiabilité du système R_p est donnée par :

$$R_p = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) \cdots (1 - R_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Si les n composants sont identiques avec une même fiabilité R alors la fiabilité du système R_p est

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

le cas particulier de deux dispositifs en parallèle

Si λ est constant, R_p est obtenu par :

$$R_p = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B) = R_A + R_B - R_A R_B$$

$$R_p(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t}) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

Le MTBF est alors :

$$MTBF_p = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

Remarques 3.6.2

Dans le cas où le taux de défaillance est le même pour chaque sous-système, le MTBF du système global s'obtient par :

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}$$

Dans le cas contraire, il faut utiliser la formule :

$$MTBF = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} - \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j} + \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq j \neq i} \frac{1}{\lambda_i + \lambda_j + \lambda_k} + \dots + (-1)^{n+1} \frac{1}{\sum_i \lambda_i}$$

Exemple 3.6.3:

Trois dispositifs A, B et C de même fiabilité $R_A = R_B = R_C = 0,75$ sont connectés en parallèle. La fiabilité de l'ensemble.

$$R_s = 1 - (1 - 0,75)^3 = 0,984$$

Pour trois composants identiques de fiabilité $R = 0,75$, nous obtenons $R_{total} = 0,984$.

Le MTBF est alors calculé par :

$$MTBF_p = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = \frac{1,83}{\lambda} \quad (3.1)$$

Pour trois dispositifs identiques ayant une fiabilité $R = 0,75$ pour $t = 1000$ h, le taux de défaillance unitaire est :

$$\lambda = -\frac{\ln(0,75)}{1000} \approx 2,87 \times 10^{-4} \text{ pannes/h} \quad (3.2)$$

Le MTBF du système redondant est alors :

$$MTBF_s = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) \approx 6374 \text{ h} \quad (3.3)$$

Exemple 3.6.4:

Pour $n = 2$ composants identiques et $\lambda = 0.01 \text{ h}^{-1}$:

$$MTBF_p = \frac{1}{0.01} \left(1 + \frac{1}{2} \right) = 150 \text{ h}$$

Comparé à un composant seul : $MTBF = \frac{1}{\lambda} = 100 \text{ h}$. On voit que le système parallèle augmente la fiabilité globale.

systèmes parallèle-série

est constitué de n sous-systèmes connectés en série tel que chaque sous-système est composé de k éléments placés en parallèle.

Un système parallèle-série est le résultat de l'association des deux systèmes série et parallèle. Pour calculer sa fiabilité, on réduit le système complet en un système série en modélisant chaque sous-système en parallèle par un seul composant. La fiabilité d'un sous-système en parallèle j est :

$$R_j = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - R_{ij}(t)) \quad (3.4)$$

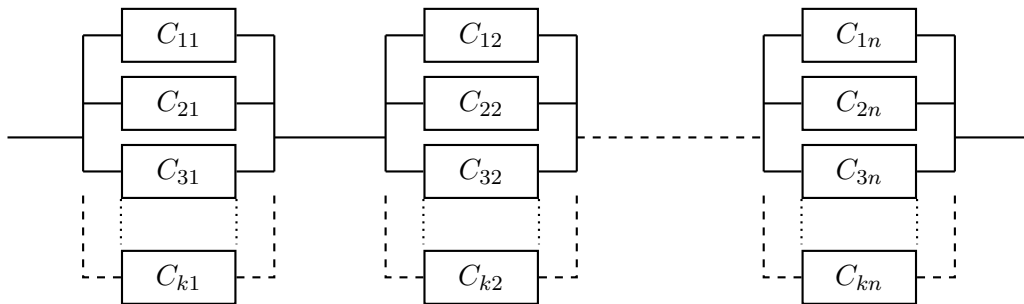


FIGURE 3.3 – Système parallèle-série

alors la fiabilité R_s du système complet est :

$$R_s = 1 - \prod_{j=1}^n R_j(t) \quad (3.5)$$

$$R_s = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \prod_{i=1}^k (1 - R_{ij}(t))) \quad (3.6)$$

Système série-parallèle

Le système série-parallèle **est constitué de** n sous-systèmes connectés en parallèle tel que chaque sous-système est composé de k éléments placés en série. Pour calculer sa fiabilité, on réduit le système complet en un système parallèle en modélisant chaque sous-système en série par un seul composant. La fiabilité d'un sous-système en série i est donnée par :

$$R_i(t) = \prod_{j=1}^n R_{ij}(t) \quad (3.7)$$

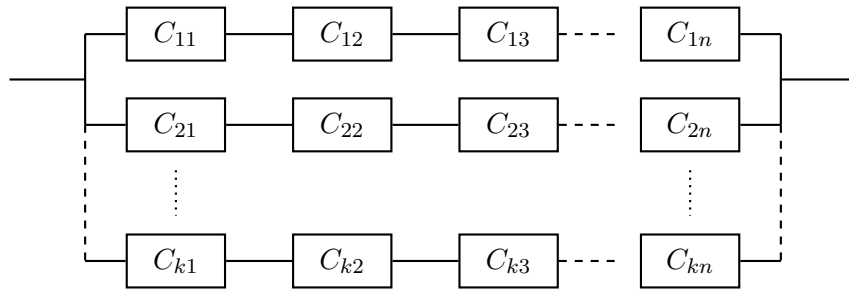


FIGURE 3.4 – Système série-parallèle

alors la fiabilité R_s du système complet est :

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - R_i(t)) \quad (3.8)$$

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^k \left(1 - \prod_{j=1}^n R_{ij}(t) \right) \quad (3.9)$$