

Risques industriels et techniques de sécurité

Chapitre 4 : Sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques

4.1 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels - Principaux concepts

4.2 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes – Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité.

4.3 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes

– Exemples d'application

4.1 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels — Principaux concepts

4.1.1 Introduction

La **sûreté de fonctionnement** (*Dependability* en anglais) désigne l'ensemble des **dispositions techniques, organisationnelles et humaines** permettant à un système de :

- **fonctionner sans défaillance,**
- **être rétabli rapidement** en cas de panne,
- **limiter les risques** pour les personnes, l'environnement et les biens.

Elle vise à garantir la **continuité, la sécurité et la qualité du service industriel**.

4.1.2 Définitions fondamentales

| Concept | Définition | Symbole / unité |
|---------------------------|--|----------------------------------|
| Fiabilité (R) | Probabilité qu'un système fonctionne correctement pendant un temps donné sans défaillance. | Sans unité ($0 \leq R \leq 1$) |
| Maintenabilité (M) | Probabilité qu'un système en panne soit réparé dans un temps donné. | Sans unité |
| Disponibilité (D) | Probabilité qu'un système soit opérationnel à un instant donné. | Sans unité |
| Sécurité (S) | Capacité à éviter les conséquences graves sur l'humain ou l'environnement en cas de défaillance. | — |

Ces quatre composantes sont souvent regroupées sous l'acronyme **RAMS** :

Reliability – **A**vailability – **M**aintainability – **S**afety.

4.1.3 Classification des défaillances

| Type de défaillance | Description | Exemple |
|----------------------|--|-------------------------|
| Subite | Survient brutalement, sans signe avant-coureur | Rupture d'un câble |
| Progressive | Résulte d'une usure lente | Corrosion, fatigue |
| Totale | Arrêt complet du système | Coupure d'alimentation |
| Partielle | Fonctionnement dégradé | Baisse de pression |
| Permanente | Définitive sans remplacement | Court-circuit |
| Intermittente | Discontinue ou aléatoire | Faux contact électrique |

4.1.4 Indicateurs de la sûreté de fonctionnement

a/ TBF (Temps Moyen de Bon Fonctionnement) ou MTBF (Mean Time Between Failures)

$$MTBF = \frac{\text{Temps total de fonctionnement}}{\text{Nombre de défaillances}}$$

b/ TTR (Temps Total de Réparation) ou MTTR (Mean Time To Repair)

$$MTTR = \frac{\text{Temps total de réparation}}{\text{Nombre de réparations}}$$

c/ Disponibilité moyenne :

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

Plus le MTBF est grand et le MTTR petit, plus la disponibilité est élevée.

4.1.5 Objectifs de la sûreté de fonctionnement

- Réduire la probabilité de défaillance.
- Minimiser les conséquences sur la sécurité et la production.
- Optimiser la maintenance préventive.
- Améliorer la fiabilité globale du système.
- Garantir la conformité aux exigences réglementaires et normatives (ISO 9001, ISO 55000, ... , etc.).

4.1.6 Démarche générale de sûreté de fonctionnement

1. Identification du système et de ses fonctions.
2. Analyse fonctionnelle et décomposition en sous-systèmes.
3. Analyse prévisionnelle des défaillances (AMDEC, arbres de défaillance).
4. Évaluation des indicateurs de fiabilité.
5. Mise en œuvre de la maintenance préventive / corrective.
6. Suivi, retour d'expérience et amélioration continue.

4.2 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes — Analyse prévisionnelle et bases de données de fiabilité

4.2.1 Analyse prévisionnelle

L'analyse prévisionnelle consiste à anticiper les défaillances possibles avant la mise en service du système.

Elle repose sur des modèles statistiques et logiques.

Objectifs :

- Identifier les composants critiques,
- Prévoir la fiabilité globale,
- Optimiser la maintenance et les coûts de possession.

4.2.2 Principales méthodes d'analyse prévisionnelle

| Méthode | Principe | Application typique |
|----------------------------|--|--|
| AMDEC / FMEA | Identifier les modes de défaillance et évaluer leur gravité | Analyse de conception ou de procédé |
| Arbre de défaillance (FTA) | Représentation logique des causes d'un événement redouté | Étude de sécurité / disponibilité |
| Arbre d'événements (ETA) | Analyse des conséquences d'un événement initiateur | Étude de scénarios accidentels |
| Blocs fiabilistes (RBD) | Représentation graphique des relations de fiabilité entre composants | Calcul du MTBF global |
| Analyse de Weibull | Modélisation statistique des durées de vie | Estimation de la fiabilité dans le temps |

4.2.3 Données et bases de fiabilité

L'analyse de sûreté repose sur des **bases de données** issues :

- des **retours d'expérience (REX)**,
- des **fournisseurs d'équipements**,
- ou des **bases statistiques reconnues** (FIDES, MIL-HDBK-217, NRPD, OREDA...).

| Type d'équipement | Taux de défaillance λ (h^{-1}) | Source typique |
|------------------------|---|-----------------------------|
| Composant électronique | 10^{-6} à 10^{-5} | MIL-HDBK-217 |
| Pompe industrielle | 10^{-5} à 10^{-4} | OREDA |
| Capteur de pression | 10^{-5} | FIDES |
| Moteur électrique | 10^{-4} à 10^{-3} | Retour d'expérience interne |

4.2.4 Modélisation mathématique de la fiabilité

1. Fonction de fiabilité :

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

2. Taux de défaillance (loi exponentielle) :

$$\lambda = \frac{1}{MTBF}$$

3. Fiabilité d'un système en série :

$$R_{\text{série}} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

4. Fiabilité d'un système en parallèle :

$$R_{\text{parallèle}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Ces modèles permettent d'**estimer la fiabilité globale** à partir des composants.

4.2.5 Intégration de la sûreté dans le cycle de vie

| Phase | Objectif en sûreté de fonctionnement |
|-------------------------|--|
| Conception | Identifier les risques et choisir des composants fiables |
| Réalisation | Contrôler la qualité et la traçabilité |
| Exploitation | Surveiller les indicateurs (MTBF, MTTR) |
| Maintenance | Réduire les temps d'indisponibilité |
| Retrait / Démantèlement | Préserver la sécurité et l'environnement |

4.3 Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes — Exemples d'application

4.3.1 Exemple 1 : Système de pompage industriel

Objectif : garantir un débit constant sans interruption.

| Composant | MTBF (h) | MTTR (h) | Disponibilité D = MTBF / (MTBF+MTTR) |
|------------------|----------|----------|--------------------------------------|
| Pompe principale | 8 000 | 20 | 0,9975 |
| Pompe de secours | 9 000 | 15 | 0,9983 |

Système **en redondance (parallèle)** → disponibilité globale proche de **0,999999 (99,9999%)**.

4.3.2 Exemple 2 : Ligne de production automatisée

- **Éléments :** convoyeurs, capteurs, automates, moteurs.
- **Problème :** un arrêt d'un seul composant bloque toute la ligne → système **en série**.

Solution : ajout de **voies parallèles** et **maintenance préventive planifiée** pour augmenter la disponibilité.

4.3.3 Exemple 3 : Turbine à gaz – station de compression

Contexte : station SONATRACH – fiabilité critique pour le transport de gaz.

- **Méthode utilisée :** AMDEC + Weibull + arbre de défaillance.
- **Objectif :** identifier les sous-systèmes critiques :
 - Section de lancement,
 - Compresseur axial,
 - Chambre de combustion,
 - Turbine,
 - Système d'huile de graissage.

Résultats obtenus :

- Les défaillances les plus critiques sont liées au **système d'huile de graissage** (forte gravité et détection difficile).
- L'analyse de Weibull a permis d'estimer :
 - **β = 1,5** (usure progressive),
 - **MTBF = 4 500 h**,

- **Disponibilité = 98,2 %.**

Ces résultats servent à optimiser la **maintenance préventive** et à **réduire les arrêts non planifiés**.

4.3.4 Synthèse

| Aspect | Outil / méthode | Résultat attendu |
|----------------|----------------------|-------------------------------|
| Fiabilité | Analyse de Weibull | Taux de défaillance λ |
| Criticité | AMDEC | Priorisation des risques |
| Sécurité | Arbre de défaillance | Causes d'accidents |
| Disponibilité | Modèles RBD | Temps de bon fonctionnement |
| Maintenabilité | MTTR / REX | Réduction du temps d'arrêt |

4.3.5 Conclusion

La **sûreté de fonctionnement** constitue une approche globale et intégrée permettant de :

- **Prévoir et maîtriser les risques techniques,**
- **Optimiser la maintenance et la fiabilité,**
- **Améliorer la performance globale** et la sécurité industrielle.

Maîtriser la sûreté de fonctionnement, c'est maîtriser la continuité, la productivité et la sécurité du système.