

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, NPRD, 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 :
 - $\beta = 1,5$ (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.