الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hygiène et Sécurité Industrielle

Spécialité : Sécurité Industrielle et Environnement

Thème

Analyse par les méthodes de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel

Présenté et soutenu publiquement par :

BELLAHA REDOUANE & **BENTAHER RIAD**

Le 23 juin 2026

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
TITAH MAWLOUD	**MCA**	**IMSI**	**Président**
BENOMAR FATIMA	**MCB**	**IMSI**	**Encadrante**
CHEHMANNA SAFIA	**MCA**	**IMSI**	**Examinatrice**

2025 - 2026

RÉSUMÉ :

Ce mémoire porte sur l'analyse de la sûreté de fonctionnement d'un système industriel à travers l'utilisation de l'arbre de défaillance et des réseaux bayésiens. L'étude vise à identifier les défaillances susceptibles d'affecter le système, à modéliser leurs relations logiques et à évaluer les risques associés.

Après une présentation des notions essentielles de la sûreté de fonctionnement, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, le travail s'intéresse aux principales méthodes d'analyse des risques, puis à la construction et à l'exploitation de l'arbre de défaillance. Les réseaux bayésiens sont ensuite introduits comme outil probabiliste permettant de prendre en compte l'incertitude et d'améliorer le diagnostic des défaillances.

L'application réalisée sur un système de type Sideboom montre l'intérêt de l'intégration entre arbre de défaillance et réseau bayésien pour renforcer l'évaluation des risques et l'aide à la décision dans le domaine industriel.

Mots-clés : sûreté de fonctionnement, fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité, arbre de défaillance, réseaux bayésiens, risques industriels, Sideboom.

ABSTRACT:

This dissertation focuses on the dependability analysis of an industrial system through the use of Fault Tree Analysis and Bayesian Networks. The study aims to identify the failures likely to affect the system, model their logical relationships, and evaluate the associated risks.

After presenting the essential concepts of dependability, including reliability, availability, maintainability, and safety, the work examines the main risk analysis methods, followed by the construction and exploitation of the fault tree. Bayesian Networks are then introduced as a probabilistic tool capable of taking uncertainty into account and improving failure diagnosis.

The application carried out on a Sideboom-type system highlights the importance of integrating Fault Tree Analysis with Bayesian Networks in order to strengthen risk assessment and decision-making in the industrial field.

Keywords: Dependability, Reliability, Availability, Maintainability, Safety, Fault Tree Analysis, Bayesian Networks, Industrial Risks, Sideboom.

ملخص;

تتناول هذه المذكرة تحليل سلامة التشغيل لنظام صناعي من خلال استخدام شجرة الأعطال والشبكات البايزية. تهدف الدراسة إلى تحديد الأعطال التي يمكن أن تؤثر على النظام، ونمذجة العلاقات المنطقية بينها، وتقييم المخاطر المرتبطة بها.

بعد عرض المفاهيم الأساسية لسلامة التشغيل، والمتمثلة في الموثوقية، الجاهزية، القابلية للصيانة والسلامة، يتناول العمل أهم طرق تحليل المخاطر، ثم دراسة وبناء شجرة الأعطال واستغلالها في تحليل الأعطال الصناعية. بعد ذلك، تم تقديم الشبكات البايزية كأداة احتمالية تسمح بأخذ حالات عدم اليقين بعين الاعتبار وتحسين تشخيص الأعطال.

أهمية الدمج بين شجرة الأعطال والشبكات البايزية من أجل Sideboom وقد أظهر التطبيق المنجز على نظام من نوع تعزيز تقييم المخاطر والمساعدة على اتخاذ القرار في المجال الصناعي.

الكلمات المفتاحية: سلامة التشغيل، الموثوقية، الجاهزية، القابلية للصيانة، السلامة، شجرة الأعطال، الشبكات البايزية، المخاطر الصناعية، Sideboom.

REMERCIMENT

Avant tout, nous remercions **ALLAH**, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la patience, le courage et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Grâce à Sa volonté et à Sa bénédiction, nous avons pu surmonter les difficultés rencontrées tout au long de notre parcours universitaire et parvenir à l'achèvement de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur, **Madame BENOMAR**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien constant ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée durant la réalisation de ce travail. Son expérience, ses orientations et ses remarques constructives ont été d'une grande valeur pour l'aboutissement de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux **membres du jury** qui ont accepté d'examiner et d'évaluer ce travail. Nous leur sommes reconnaissants pour le temps consacré à la lecture de ce mémoire ainsi que pour leurs remarques et suggestions.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants du département qui ont contribué à notre formation et nous ont transmis leurs connaissances tout au long de notre cursus universitaire.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à **nos parents** pour leurs sacrifices, leur soutien moral et matériel, leurs encouragements permanents et leur confiance. Leur présence et leur affection ont toujours été une source de motivation et de réussite.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos frères, nos sœurs, nos proches, nos amis ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À tous, nous adressons nos plus sincères remerciements.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- ✓ **À mes très chers parents,**

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, le respect et la reconnaissance que je vous porte. Merci pour vos sacrifices, votre soutien inconditionnel, vos encouragements et vos prières qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

- ✓ **À mes frères, ma sœur et ma nièce ,**

Pour leur affection, leur soutien moral et leurs encouragements permanents.

- ✓ À mes amis et collègues,

Pour les moments de partage, d'entraide et de soutien durant mes années d'études.

- ✓ À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à la réalisation de ce mémoire.
- ✓ Et bien sûr à mon binôme BENTAHER MOHAMED RIAD

Je dédie ce travail avec toute ma gratitude et mon profond respect.

Redouane

DEDICACE

- ***Je dédie ce modeste travail à mes parents, mon père qui me donne des leçons de la vie, et à ma mère pour les conseils précieux, et de m'encourager dans ma vie.***
- ***A mon frère et mes sœurs.***
- ***A tous mes collègues en Hygiène et Sécurité Industrielle.***

A Mon Binôme REDOUANE BELLAHA

Riad

Table des matières

Introduction Générale 15
Chapitre I Sûreté de fonctionnement 4
Introduction 4
I Historique de la sûreté de fonctionnement 5
II Définition 5
III Les paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement 7
III.1. Fiabilité 7
III.2. Disponibilité 8
III.3. Maintenabilité 9
III.4. Sécurité 10
III.5. Défaillance 11
III.5.1. Définition 12
III.5.2. Types de défaillances 12
III.5.3. Causes des défaillances 13
III.5.4. Modes de défaillance 14
IV Notion de risque industriel 15
IV.1. Danger 16
IV.2. Risque 16
IV.3. Gravité 17
IV.4. Fréquence 17
V Les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement 18
V.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR) 18
V.2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) 18
V.3. Méthode HAZOP 19
V.4. Arbre de défaillance 19
V.5. Réseaux bayésiens 20
VI Importance de la sûreté de fonctionnement 20
Conclusion 21
Chapitre II Arbre de Défaillance 22
Introduction 22
I Arbre de défaillance 22
I.1. Historique 22
I.2. Définition 23
II Rôle des arbres de défaillances 23

II.3.1. Représentation graphique 24
III Construction d'un arbre de défaillances 25
III.1. Principe 25
1. Définition du système à étudier 27
2. Définition de la défaillance à analyser 28
3. Analyse fonctionnelle du système 28
II.2. Etapes de construction 28
II.2.1. Etape 01 : Evènement sommet (évènement indésirable) 28
II.2.2. Etape 02 : Evènement intermédiaires 29
II.2.3. Etape 03 : Evènements de base, transfert et conditions 29
IV Analyse fonctionnel de l'ADD 30
IV.1. L'identification 30
IV.2. Mise en œuvre des barrières de sécurité 32
V Analyse quantitative de l'ADD 32
V.1. Calcul des probabilités 33
V.1.1. Porte logique ET 33
V.1.2. Porte logique OU 33
V.2. Hypothèses de l'analyse quantitative 33
VI Importance et apports 34
VII Avantages et inconvénients de l'arbre de défaillance 34
VII.1. Avantages 34
VII.2. Inconvénients 34
Conclusion 35
Chapitre III Réseau bayésien 36
I Réseau Bayésien 36
I.1. Introduction 36
I.2. Historique 36
I.3. Définition 37
I.4. Modèles graphiques probabilistes 38
I.5. Structure d'un réseau bayésien 38
I.6. Construction d'un réseau bayésien 40
I.6.1. Les étapes de construction d'un réseau bayésien 40
II Inférence bayésien 42
II.1. Rôle de l'inférence dans un réseau bayésien 43
II.2. Inférence exacte 43
II.3. Inférence approximative 44
III Apprentissage des Réseaux bayésiens 44

III.1. Apprentissage des paramètres des réseaux bayésiennes 44
III.2. Apprentissage à partir de données complètes et incomplètes 45
III.3. Apprentissage de la structure des réseaux bayésiens 45
III.3.1. Détermination de la structure par un expert 46
III.3.2. Détermination de la structure à partir des données 47
IV Les avantages et les inconvénients des réseaux bayésiens 47
IV.1. Avantage des réseaux bayésiens 47
IV.2. Inconvénients des réseaux bayésiens 48
V Domaines d'application des réseaux Bayésiens 48
VI Interprétation d'ADD en RB pour l'analyse des risques 49
Introduction 49
VI.1. Transformation de l'arbre de défaillance vers le réseau bayésien 50
VI.2. Transformation qualitative de l'AdD vers le réseau bayésien 51
VI.3. Transformation quantitative de l'ADD vers le RB 52
Conclusion 54
Chapitre IV ÉTUDE DE CAS 59
I.Introduction 60
II.Présentation de site 60
II.1 Description de l'entreprise 60
II.2. Activités principales et secondaires de l'entreprise 60
II.3. Localisation 61
II.4. Valeur financière de l'entreprise 61
II.5. Caractéristiques générales et spécifiques de l'entreprise 61
II.6. Caractéristiques à caractère spécifique 62
II.7. Importance de l'entreprise 63
III. Présentation du système Sideboom 63
III.1.Définition du Sideboom 63
III.2 Description technique du Sideboom 65
III.3.Principe fonctionnement de sideboom 66
IV Analyse fonctionnelle du Sideboom 67
IV.1. Bête à cornes du Sideboom 67
IV.2 Fonctions principales et contraintes du Sideboom 67
IV.3 Diagramme pieuvre du Sideboom 68
V. Analyse structurelle du Sideboom 69
VI Activité du système Sideboom 70
VI.1. Préparation de la conduite 70
VI.2. Levage de la conduite 70

VI.3. Transport et déplacement 70
VI.4. Alignement de la conduite 70
VI.5. Maintien pendant le soudage 71
VI.6. Contrôle et pose finale 71
VII Définition de l'événement redouté 71
VII.1. Scénario de l'événement redouté 71
VIII Application de l'Arbre de Défaillance (ADD) 72
VIII.1 CONSTRUCTION DE L'ADD 72
IX . Transformation de l'ADD en Réseau Bayésien 76
IX.1. Tables de Probabilités Conditionnelles (TPC) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
IX.2. Interprétation du réseau bayésien 79
X . Discussion des résultats 79
XI Recommandations 84
XI I. Conclusion 85
CONCLUSION GÉNÉRALE 86

Liste des figures

- **Figure 1 :** Taxonomie de la sûreté de fonctionnement…….……...6
- **Figure 2 :** Évolution de la fiabilité en fonction du temps…….8
- **Figure 3 :** Évolution de la disponibilité d'un système en fonction du temps……9
- **Figure 4 :** Évolution de la maintenabilité en fonction du temps……..10
- **Figure 5 : L'arbre** de défaillance...……..23
- **Figure 6 :** exemple simplifié d'un arbre de défaillance…….26
- **Figure 7 :** Démarche de l'ADD ……27
- **Figure 8:** A simplified fault tree. …….30
- **Figure 9 :** Exemple simplifié de la structure d'un réseau bayésien. …….40
- **Figure 10 :** Étapes de construction d'un réseau bayésien. ……...41
- **Figure 11 :** Transformation depuis l'arbre des défaillances au réseau bayésien par l'algorithme de conversion……51
- **Figure 12 :** Exemple de structure d'un arbre de défaillance……..52
- **Figure 13 :** Structure du réseau bayésien crée à partir de la Figure 12……52
- **Figure 14 :** Organisation générale de l'entreprise et des sous-systemes. ……62
- **Figure 15 :** Structure fonctionnelle des défaillances du système industriel. ……62
- **Figure 16 :** Vue générale d'un Sideboom utilisé pour les travaux de levage et de pose des canalisations……..……..65
- **Figure 17 :** Bête à cornes du Sideboom.……..……..67
- **Figure 18 :** Fonctions principales et contraintes du Sideboom…….68
- **Figure 19 :** Diagramme pieuvre du Sideboom…….68
- **Figure 20 :** Analyse fonctionnelle de Sidebom……..69
- **Figure 21 :** Analyse structurelle du Sideboom…… .70
- **Figure 22 :** ADD du transport et de la pose des canalisations.……..……73
- **Figure 23 :** Réseau bayésien des causes possibles d'accident lors du transport et de la pose des canalisations……78

Liste des tableaux

- **Tableau 1 :** Symboles des évènements dans les arbres de défaillances……24
- **Tableau 2 :** Symboles des portes dans les arbres de défaillances…….25
- **Tableau 3 :** Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique Ou …..…53
- **Tableau 4 :** Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique K/N……53
- **Tableau 5 :** Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique ET……..54
- **Tableau 6 :** TPC de la défaillance des câbles (DC) …….79
- **Tableau 7 :** TPC de la défaillance du crochet (DCR) ……..79
- **Tableau 8 :** TPC de la panne moteur (PM) ……79
- **Tableau 9 :** TPC de l'événement sommet ES…….80
- **Tableau 10 :** Les probabilités de l'accident……83

LISTE DES ABREVIATIONS

- SDF : Sûreté de Fonctionnement
- ADD : Arbre de défaillance
- RB : Réseau bayésien
- ES : Échec du transport et de la pose des canalisations
- EO : Erreur opérateur
- DC : Défaillance des câbles
- DCR : Défaillance du crochet
- PM : Panne moteur
- ST : Surcharge du tuyau
- IM : Instabilité de la machine
- UC : Usure câble
- RC : Rupture de câble
- MI : Mauvaise inspection
- UCr : Usure du crochet
- FCr : Fissure du crochet
- DH : Défaillance hydraulique
- DM : Défaillance mécanique

Introduction Générale

Le développement rapide des systèmes industriels modernes, associé à l'évolution des technologies de production et d'automatisation, a considérablement augmenté la complexité des installations industrielles. Ces systèmes sont aujourd'hui composés d'un grand nombre d'équipements mécaniques, électriques, électroniques et informatiques interconnectées, dont le bon fonctionnement est indispensable pour assurer la continuité de production, la qualité des services ainsi que la sécurité des personnes et de l'environnement. Dans ce contexte, la maîtrise des risques industriels et des défaillances constitue une priorité majeure pour les entreprises industrielles. **[1]**

Les défaillances pouvant affecter un système industriel peuvent entraîner des conséquences importantes, telles que les arrêts de production, les pertes économiques, les dommages matériels, les accidents humains ou encore les impacts environnementaux. Ces risques deviennent encore plus critiques dans les secteurs sensibles tels que l'industrie chimique, pétrolière, énergétique, aéronautique ou les systèmes automatisés. Ainsi, la nécessité d'assurer un fonctionnement fiable, sécurisé et continu des installations industrielles a conduit au développement de la sûreté de fonctionnement. **[2]**

La sûreté de fonctionnement représente un domaine essentiel de l'ingénierie industrielle. Elle regroupe un ensemble de concepts, de méthodes et d'outils permettant d'étudier le comportement des systèmes face aux défaillances et aux situations dangereuses. Elle repose principalement sur quatre paramètres fondamentaux regroupés sous l'acronyme FDMS : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. Ces paramètres permettent d'évaluer les performances des systèmes industriels tout au long de leur cycle de vie et de mettre en place des stratégies adaptées afin de réduire les risques et d'améliorer la continuité de service. **[3]**

Afin d'assurer une meilleure maîtrise des risques industriels, plusieurs méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement ont été développées. Ces méthodes permettent d'identifier les défaillances potentielles, d'évaluer leurs conséquences et de proposer des actions préventives ou correctives adaptées. Parmi les méthodes les plus utilisées figurent l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), la méthode HAZOP ainsi que l'arbre de défaillance et le réseau bayésien **[3]**

L'arbre de défaillance constitue l'une des méthodes les plus importantes dans les études de sûreté de fonctionnement. Cette approche permet de représenter de manière graphique et logique les différentes combinaisons de défaillances pouvant conduire à un événement

redouté. Grâce à son aspect hiérarchique et déductif, l'arbre de défaillance facilite l'identification des causes des dysfonctionnements, l'analyse des scénarios critiques et l'évaluation des risques associés aux systèmes industriels complexes. **[3]**

Cependant, malgré son importance, l'arbre de défaillance présente certaines limites lorsqu'il s'agit de modéliser les dépendances complexes entre les événements, de traiter les données incomplètes ou d'intégrer les phénomènes d'incertitude. Pour répondre à ces limitations, les réseaux bayésiens apparaissent comme une approche probabiliste particulièrement adaptée à l'analyse des systèmes complexes. **[4]**

Les réseaux bayésiens sont des modèles graphiques probabilistes permettant de représenter les relations de dépendance et de causalité entre différentes variables d'un système. Ils offrent des capacités importantes d'inférence, de diagnostic et de prédiction à partir des informations disponibles. Leur utilisation dans le domaine industriel permet d'améliorer l'analyse des risques, la maintenance prédictive ainsi que l'aide à la décision dans des environnements incertains. **[4]**

L'intégration des réseaux bayésiens avec les arbres de défaillance constitue aujourd'hui une approche performante pour renforcer les études de sûreté de fonctionnement. Cette combinaison permet non seulement de conserver la structure logique de l'arbre de défaillance, mais également d'introduire des mécanismes probabilistes capables de prendre en compte les dépendances entre les événements et les mises à jour des probabilités en fonction des nouvelles informations disponibles. **[4]**

Dans ce cadre, le présent travail s'intéresse à l'analyse d'un système industriel à l'aide des méthodes de sûreté de fonctionnement, en mettant particulièrement l'accent sur l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens. L'objectif principal est d'étudier les différentes défaillances susceptibles d'affecter le système, d'évaluer les risques associés et d'analyser l'apport des réseaux bayésiens dans l'amélioration de la modélisation probabiliste des défaillances.

Ce mémoire est organisé en plusieurs chapitres. Le premier chapitre est consacré aux notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement ainsi qu'aux principales méthodes d'analyse des risques industriels. Le deuxième chapitre présente l'arbre de défaillance, ses principes, ses méthodes de construction ainsi que ses analyses qualitative et quantitative. Le troisième chapitre est dédié aux réseaux bayésiens, à leurs concepts fondamentaux et à leur utilisation dans les études de sûreté de fonctionnement. Enfin, le dernier chapitre porte sur l'application

pratique des méthodes étudiées pour l'analyse d'un système industriel et l'interprétation de l'arbre de défaillance sous forme de réseau bayésien.

Chapitre I
Sûreté de fonctionnement

Introduction

La sûreté de fonctionnement représente aujourd'hui un domaine essentiel dans le secteur industriel, en raison du développement rapide des technologies, de l'automatisation croissante des systèmes et des exigences de plus en plus fortes en matière de sécurité, de qualité et de performance. Les installations industrielles modernes sont constituées de systèmes complexes dont le fonctionnement dépend de nombreux composants matériels, logiciels et humains interagissant entre eux. Dans ce contexte, la maîtrise des défaillances et des risques devient indispensable afin d'assurer la continuité des opérations et de limiter les conséquences des dysfonctionnements éventuels. **[3]**

Les défaillances pouvant affecté un système industriel peuvent avoir des impacts importants sur la production, la sécurité des personnes, l'environnement ainsi que sur les coûts de maintenance et d'exploitation. Pour cette raison, la sûreté de fonctionnement constitue une approche essentielle pour identifier les causes des défaillances, évaluer les risques associés et définir les mesures de prévention adaptées **[3]**.

La sûreté de fonctionnement regroupe un ensemble de concepts, de méthodes et d'outils destinés à étudier le comportement des systèmes face aux défaillances et aux situations dangereuses. Elle s'appuie principalement sur quatre paramètres fondamentaux, connus sous l'acronyme FDMS : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. Ces paramètres permettent d'évaluer les performances d'un système tout au long de son cycle de vie et de garantir son aptitude à accomplir les fonctions requises dans des conditions déterminées. **[4]**

Afin d'assurer une meilleure maîtrise des risques, plusieurs méthodes d'analyse ont été développées, notamment l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), l'HAZOP et l'arbre de défaillance. Ces approches constituent des outils importants d'aide à la décision pour la maintenance, le diagnostic et l'évaluation des risques industriels. **[5]**

Ainsi, ce chapitre présente les principales notions relatives à la sûreté de fonctionnement, notamment les concepts fondamentaux de fiabilité, de maintenabilité, de disponibilité et de sécurité, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour l'analyse et la maîtrise des risques industriels.

I Historique de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement s'est développée avec l'essor des systèmes industriels et des technologies complexes. Ses premières préoccupations remontent à la révolution industrielle, période durant laquelle l'utilisation des machines à vapeur et des systèmes mécaniques a fait apparaître la nécessité de mieux maîtriser les défaillances susceptibles de provoquer des accidents graves. **[1]**

Au cours du XXe siècle, le développement des secteurs aéronautique, spatial, nucléaire et militaire a fortement contribué à l'évolution de cette discipline. L'augmentation de la complexité des systèmes et des exigences en matière de sécurité a conduit à l'élaboration de méthodes spécifiques d'analyse et de maîtrise des risques. Après la Seconde Guerre mondiale, les études de fiabilité ont pris une place importante, notamment dans les domaines électronique et aéronautique, où les défaillances pouvaient avoir des conséquences critiques. C'est dans ce contexte que se sont développées des méthodes telles que l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) et l'arbre de défaillance. **[1]**

Aujourd'hui, la sûreté de fonctionnement occupe une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'énergie, les transports, l'industrie chimique, les télécommunications et les systèmes automatisés. Elle constitue un outil indispensable pour améliorer la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité des systèmes complexes. **[1]**

II Définition

La sûreté de fonctionnement est l'aptitude d'un système à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une période déterminée. Elle constitue une discipline essentielle dans l'étude, la conception, l'exploitation et la maintenance des systèmes industriels, car elle vise à garantir que ces systèmes remplissent correctement leur mission tout en limitant les défaillances et leurs conséquences. Elle regroupe ainsi un ensemble de méthodes, de démarches et d'outils permettant d'analyser les causes de défaillance, d'évaluer les risques associés et d'améliorer les performances globales du système.**[2]**

Cette notion repose principalement sur quatre paramètres fondamentaux regroupés sous l'acronyme FDMS : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. La fiabilité traduit la capacité d'un système à fonctionner correctement sans défaillance pendant une durée

donnée. La disponibilité correspond à l'aptitude du système à être opérationnel lorsqu'il est sollicité. La maintenabilité désigne la facilité avec laquelle un système peut être réparé ou remis en service après une panne. Enfin, la sécurité vise à limiter les conséquences des défaillances sur les personnes, les biens et l'environnement. L'ensemble de ces paramètres permet d'apprécier le comportement d'un système face aux défaillances et de mieux en maîtriser les performances tout au long de son cycle de vie. **[2]**

Dans le domaine industriel, la sûreté de fonctionnement joue un rôle majeur, car elle contribue à réduire la probabilité d'apparition des pannes, à limiter les effets des dysfonctionnements et à assurer la continuité de service des installations. Elle permet également de renforcer la sécurité des opérateurs, de protéger l'environnement et de maîtriser les risques liés à l'exploitation de systèmes complexes. Cette approche est particulièrement importante dans les secteurs où les exigences de fiabilité et de sécurité sont élevées, tels que l'énergie, les transports, l'industrie chimique ou encore les systèmes automatisés.**[2]**

Ainsi, la sûreté de fonctionnement constitue une démarche indispensable pour concevoir des systèmes plus sûrs, plus performants et mieux adaptés aux contraintes industrielles actuelles.
Les principaux composants de la sûreté de fonctionnement peuvent être présentés dans le schéma suivant :

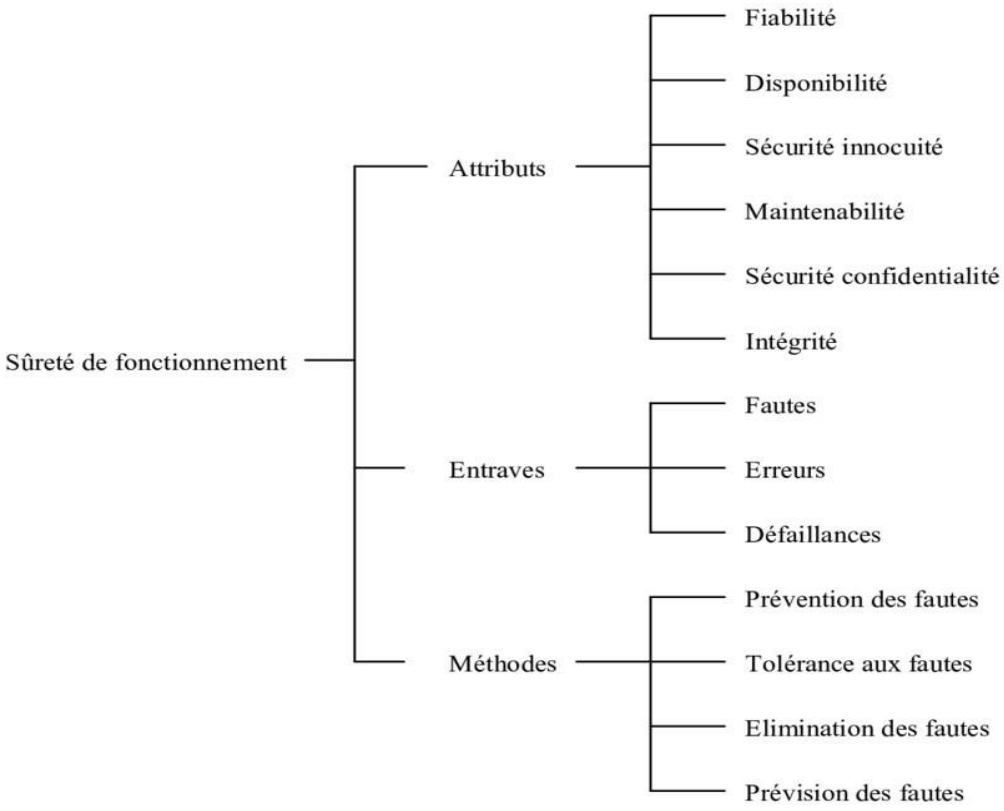


Figure 01 : Taxonomie de la sûreté de fonctionnement

III Les paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement

Les paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement constituent les principaux critères permettant d'évaluer les performances et le comportement d'un système industriel face aux défaillances. Ces paramètres, regroupés sous l'acronyme FDMS, comprennent la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité. Leur étude permet d'assurer le bon fonctionnement des systèmes, de réduire les risques de panne et d'améliorer la continuité de service ainsi que la sécurité des installations industrielles. **[3]**

III.1. Fiabilité

La fiabilité est l'un des paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement. Elle représente l'aptitude d'un système ou d'un équipement à accomplir correctement une fonction requise pendant une durée déterminée et dans des conditions données, sans apparition de défaillance.**[3]**

Elle permet d'évaluer le comportement d'un système au cours du temps et de mesurer sa capacité à fonctionner de manière continue et satisfaisante. Dans le domaine industriel, elle joue un rôle essentiel, car une faible fiabilité peut entraîner des arrêts de production, des coûts de maintenance élevés ainsi que des risques importants pour la sécurité des installations et des opérateurs. **[3]**

D'un point de vue probabiliste, la fiabilité correspond à la probabilité qu'un système fonctionne sans panne pendant un intervalle de temps donné. Elle est généralement représentée par la relation suivante : **[3]**

$R(t)=P(T>t)$ où :

R(t) représente la fiabilité du système, **T** désigne le temps avant défaillance et **t** la durée de fonctionnement considérée.

La fiabilité dépend de plusieurs facteurs, notamment la qualité de conception, les conditions d'utilisation, l'environnement de fonctionnement, la maintenance et les caractéristiques des composants du système. Son étude permet d'identifier les éléments les plus critiques et d'améliorer les performances globales des installations industrielles. **[3]**

La figure suivante illustre l'évolution de la fiabilité R(t) en fonction du temps. Elle montre que la probabilité de fonctionnement sans défaillance diminue progressivement au cours du temps sous l'effet de l'usure, du vieillissement des composants et des conditions

d’exploitation du système.

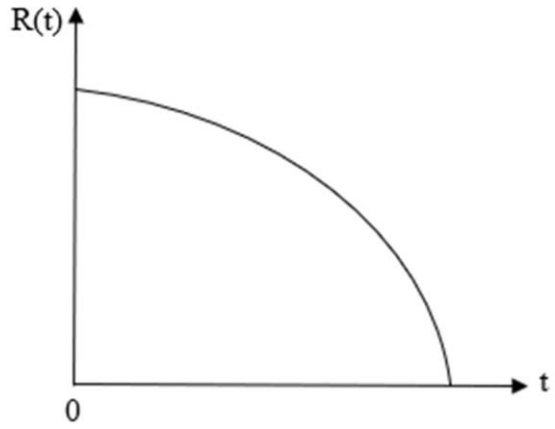


Figure 02 : Évolution de la fiabilité en fonction du temps.

III.2. Disponibilité

La disponibilité est l’un des paramètres essentiels de la sûreté de fonctionnement. Elle représente l’aptitude d’un système ou d’un équipement à être en état d’accomplir une fonction requise à un instant donné ou pendant une période déterminée, dans des conditions données d’utilisation et de maintenance. **[3]**

Elle dépend principalement de la fiabilité du système ainsi que de la rapidité des opérations de maintenance et de réparation. Elle traduit donc la capacité du système à assurer le service demandé lorsqu’il est sollicité. **[3]**

Dans le domaine industriel, la disponibilité joue un rôle important, car elle influence directement la continuité de production, la qualité du service et les coûts d’exploitation. Une faible disponibilité peut entraîner des arrêts fréquents des installations, des pertes économiques importantes ainsi qu’une diminution des performances globales du système.

D’un point de vue probabiliste, la disponibilité peut être exprimée par la relation suivante : **[3]**

$$A = \frac{MTBF}{\mathrm{MTBF} + \mathrm{MTTR}}$$

Où

A représente la disponibilité du système, MTBF le temps moyen entre deux défaillances et MTTR le temps moyen de réparation.

La disponibilité d’un système peut être améliorée par une meilleure maintenance, une réduction des temps de réparation et une amélioration de la fiabilité des composants. Elle

constitue ainsi un indicateur important dans l'évaluation des performances et de l'efficacité des systèmes industriels. **[3]**

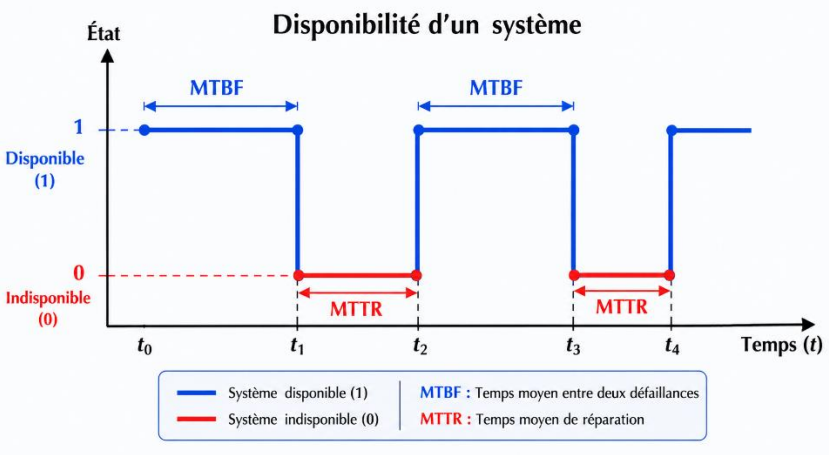


Figure 03 : Évolution de la disponibilité d'un système en fonction du temps.

La figure suivante illustre l'évolution de la disponibilité A(t) d'un système au cours du temps. Elle montre les différentes périodes de fonctionnement et d'arrêt du système ainsi que l'influence des temps de défaillance et de réparation sur la continuité de service. **[3]**

III.3. Maintenabilité

La maintenabilité est l'un des paramètres fondamentaux de la sûreté de fonctionnement. Elle représente l'aptitude d'un système ou d'un équipement à être maintenu ou rétabli dans un état de fonctionnement donné après l'apparition d'une défaillance, dans des conditions déterminées d'utilisation et de maintenance. **[3]**

Elle traduit la facilité et la rapidité avec lesquelles les opérations de maintenance, de réparation ou de remplacement peuvent être réalisées. Elle dépend notamment de la conception du système, de l'accessibilité des composants, de la disponibilité des moyens de maintenance ainsi que des compétences du personnel chargé des interventions. **[3]**

Dans le domaine industriel, une bonne maintenabilité permet de réduire les temps d'arrêt des installations, d'améliorer la disponibilité des équipements et de diminuer les coûts de maintenance. Elle contribue également à assurer une meilleure continuité de service et à renforcer les performances globales du système.

D'un point de vue probabiliste, la maintenabilité représente la probabilité qu'un système en panne soit réparé et remis en état de fonctionnement dans un intervalle de temps donné. Elle peut être exprimée par la relation suivante : **[3]**

$$M(t) = \mathrm{P}\,(\,\mathrm{Tr}\ \leq \mathrm{t}\,)$$

Où

M(t) représente la maintenabilité du système,

Tr Le temps de réparation et

t le temps considéré.

La maintenabilité constitue ainsi un indicateur important dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle permet d'améliorer l'efficacité des opérations de maintenance et de limiter les conséquences des défaillances sur le fonctionnement des systèmes industriels **[3]**.

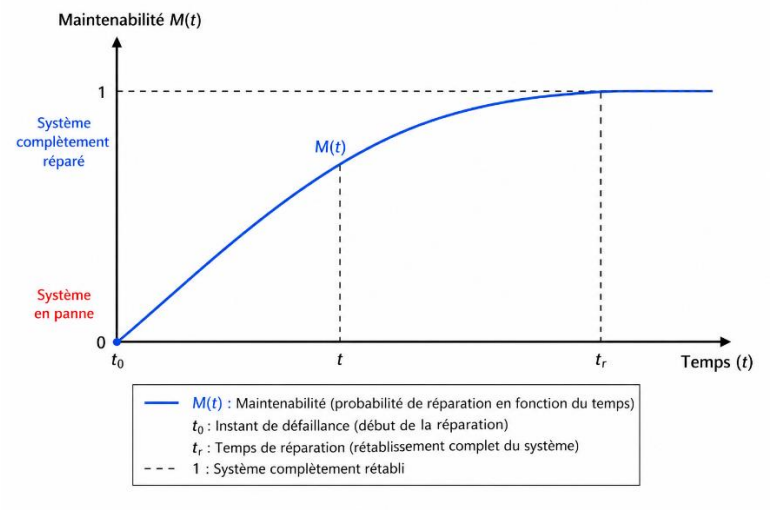


Figure 04 : Évolution de la maintenabilité en fonction du temps.

La figure suivante représente l'évolution de la maintenabilité M(t) en fonction du temps. Elle montre que la probabilité de réparation d'un système augmente progressivement avec le temps jusqu'au rétablissement complet du fonctionnement du système.

III.4. Sécurité

La sécurité est l'un des paramètres essentiels de la sûreté de fonctionnement. Elle représente l'aptitude d'un système à éviter l'apparition de situations dangereuses susceptibles de provoquer des dommages aux personnes, aux équipements ou à l'environnement. **[3]**

Elle vise principalement à réduire les risques liés aux défaillances des systèmes industriels et à limiter les conséquences des accidents éventuels. Elle repose sur l'identification des dangers, l'évaluation des risques ainsi que la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection adaptées.

Dans le domaine industriel, la sécurité occupe une place importante, notamment dans les secteurs où les installations présentent des risques élevés, tels que l'industrie chimique, les centrales énergétiques, les transports ou encore les systèmes automatisés. Une défaillance non maîtrisée peut entraîner des conséquences humaines, matérielles, économiques et environnementales importantes. **[3]**

La sécurité dépend de plusieurs facteurs, notamment la fiabilité des équipements, la qualité de la maintenance, les procédures d'exploitation ainsi que le respect des normes et des réglementations en vigueur. Elle contribue ainsi à assurer un fonctionnement plus sûr des systèmes et à améliorer la maîtrise des risques. **[3]**

Par conséquent, la sécurité constitue un élément fondamental dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle permet de protéger les personnes, les installations et l'environnement contre les conséquences des défaillances et des situations dangereuses. **[3]**

Ainsi, la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité constituent les quatre piliers de la sûreté de fonctionnement. Chacun de ces paramètres apporte une vision différente du comportement d'un système, que ce soit face aux défaillances, aux interventions de maintenance ou aux situations dangereuses. Pris ensemble, ils permettent de mieux comprendre le fonctionnement global du système et d'évaluer sa capacité à remplir sa mission tout au long de son cycle de vie. [3]

III.5. Défaillance

La défaillance est une notion centrale en sûreté de fonctionnement, puisqu'elle correspond à la perte de capacité d'un système, d'un composant ou d'un équipement à remplir la fonction qui lui est demandée. Elle peut entraîner un mauvais fonctionnement, un arrêt partiel ou total du système, et parfois des conséquences importantes sur l'exploitation industrielle. **[4]**

L'étude des défaillances permet de comprendre l'origine des pannes, d'évaluer leurs effets sur le système et de définir des mesures de prévention ou de maintenance plus efficaces. Elle contribue ainsi à améliorer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des installations. **[4]**

Dans cette partie, seront présentées les notions principales liées aux défaillances, notamment leur définition, leurs types, leurs causes et les modes de défaillance susceptibles d'affecter les systèmes industriels. **[4]**

III.5.1. Définition

La défaillance correspond à la cessation de l'aptitude d'un système, d'un composant ou d'un équipement à accomplir une fonction requise dans des conditions données. Elle se traduit par l'incapacité du système à assurer correctement le service attendu. **[4]**

Elle peut résulter de plusieurs facteurs, tels que l'usure des composants, les erreurs humaines, des conditions d'exploitation défavorables ou encore des défauts de conception. Ses conséquences peuvent être plus ou moins importantes sur la disponibilité, la sécurité et les performances globales du système industriel. **[4]**

Dans les études de sûreté de fonctionnement, l'identification des défaillances constitue une étape essentielle pour évaluer les risques, améliorer la fiabilité des installations et mettre en place des actions de maintenance et de prévention adaptées. **[4]**

III.5.2. Types de défaillances

Les défaillances susceptibles d'affecter un système industriel peuvent être classées selon plusieurs critères, notamment leur mode d'apparition, leurs conséquences ou leur origine. Cette classification permet de mieux comprendre la nature des dysfonctionnements et d'adapter les stratégies de diagnostic, de maintenance et de prévention. **[4]**

- **Les défaillances soudaines** surviennent brutalement, sans signe précurseur apparent, et entraînent généralement une interruption immédiate du fonctionnement. Elles peuvent résulter d'une rupture mécanique, d'un court-circuit ou d'une panne électrique.

- **Les défaillances progressives** correspondent à une dégradation lente des composants sous l'effet de l'usure, du vieillissement, de la corrosion ou des conditions d'exploitation. Elles peuvent souvent être détectées avant l'arrêt complet du système.

- **Les défaillances totales** provoquent l'arrêt complet du système ou de l'équipement concerné, qui devient alors incapable d'assurer la fonction demandée.

- **Les défaillances partielles** se traduisent par une diminution des performances sans arrêt total du fonctionnement. Le système continu donc à fonctionner, mais de manière dégradée.

- **Les défaillances intermittentes** apparaissent puis disparues de manière irrégulière. Elles sont souvent difficiles à détecter et à diagnostiquer, car le système peut retrouver temporairement un état de fonctionnement normal.

- **Les défaillances internes** sont liées à des causes propres au système, telles que des défauts de conception, l'usure des composants ou des erreurs de fabrication.

- **Les défaillances externes** sont provoquées par des facteurs extérieurs au système, comme les conditions environnementales, les erreurs humaines ou les perturbations énergétiques.

L'identification des différents types de défaillances permet d'améliorer l'analyse des risques, de faciliter le diagnostic des pannes et de mettre en place des stratégies de maintenance adaptées, afin de renforcer la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.

III.5.3. Causes des défaillances

Les défaillances des systèmes industriels peuvent avoir des origines multiples et résulter de facteurs techniques, humains ou environnementaux. L'identification de leurs causes constitue une étape importante dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle permet de mieux comprendre les mécanismes de panne, d'améliorer la fiabilité des équipements et de mettre en place des actions de prévention adaptées. **[4]**

Parmi les principales causes de défaillance, l'usure et le vieillissement des composants occupent une place importante. Avec le temps, les équipements subissent des phénomènes de fatigue, de corrosion, d'échauffement ou de détérioration progressive qui peuvent réduire leurs performances et provoquer des pannes. Les conditions de fonctionnement sévères, telles que les températures élevées, les vibrations ou l'humidité, accélèrent souvent cette dégradation.

Les défauts de conception ou de fabrication constituent également une source importante de défaillance. Une conception inadaptée, le choix de matériaux non appropriés ou des erreurs lors du processus de fabrication peuvent entraîner des dysfonctionnements prématurés et affecter la sécurité des installations. **[4]**

Les erreurs humaines représentent aussi une cause fréquente de défaillance dans les systèmes industriels. Elles peuvent apparaître lors des opérations d'exploitation, de maintenance, de contrôle ou de réparation. Une mauvaise manipulation, le non-respect des procédures de sécurité ou un manque de formation du personnel peuvent provoquer des incidents ou des accidents importants. **[4]**

Les défaillances peuvent également être causées par des perturbations externes, telles que les coupures d'alimentation électrique, les variations de tension, les incendies, les catastrophes

naturelles ou les agressions environnementales. Ces facteurs extérieurs peuvent perturber le fonctionnement normal des équipements et entraîner des arrêts imprévus du système. **[4]**

Le manque ou l'insuffisance de maintenance constitue une autre cause importante de défaillance. Une maintenance mal planifiée ou insuffisante peut favoriser l'apparition de pannes répétitives et réduire la durée de vie des équipements industriels.

Enfin, les mauvaises conditions d'utilisation ou la surcharge des équipements peuvent également provoquer des défaillances. L'utilisation d'un système en dehors de ses limites de fonctionnement peut entraîner une dégradation rapide des composants et augmenter les risques de panne. **[4]**

Ainsi, l'analyse des différentes causes de défaillance permet d'améliorer la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels en mettant en place des actions correctives et préventives adaptées afin de limiter les risques et d'assurer une meilleure continuité de service.

III.5.4. Modes de défaillance

Le mode de défaillance représente la manière selon laquelle une défaillance apparaît et se manifeste sur un composant, un équipement ou un système industriel. Il décrit la forme observable du dysfonctionnement ainsi que les effets produits sur le fonctionnement normal du système. L'identification des modes de défaillance constitue une étape importante dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle permet d'analyser les causes des pannes, d'évaluer leurs conséquences et de définir les actions de maintenance ou de prévention appropriées. **[4]**

Les modes de défaillance varient selon la nature des équipements, les conditions d'exploitation ainsi que l'environnement de fonctionnement. Dans les systèmes industriels, une même défaillance peut se manifester de différentes manières et produire des conséquences plus ou moins importantes sur la sécurité, la disponibilité et les performances du système.

Parmi les principaux modes de défaillance rencontrés dans les installations industrielles, on peut citer : **[4]**

- La rupture mécanique d'un composant ;
- Le blocage ou le grippage des pièces mécaniques ;
- La fuite de liquide ou de gaz ;
- La perte d'alimentation électrique ;

- Le court-circuit ;
- La surchauffe des équipements ;
- L'usure excessive des composants ;
- La corrosion ;
- Les vibrations anormales ;
- La perte de performance ;
- Les défauts de commande ou de régulation ;
- Les erreurs de fonctionnement.

La rupture mécanique correspond généralement à la cassure ou à la destruction d'un élément sous l'effet des contraintes mécaniques ou de la fatigue des matériaux. Le blocage mécanique peut empêcher le mouvement normal des équipements et provoquer l'arrêt du système. Les fuites de liquide ou de gaz constituent également un mode de défaillance fréquent, notamment dans les systèmes hydrauliques ou pneumatiques **[4]**.

Les défaillances électriques, telles que les court-circuit ou les pertes d'alimentation, peuvent perturber le fonctionnement des équipements et provoquer des arrêts imprévus. De même, la surchauffe des composants peut entraîner une détérioration progressive du matériel et augmenter les risques d'incendie ou de panne totale.

L'usure et la corrosion constituent aussi des modes de défaillance importants, car elles provoquent une dégradation progressive des composants au cours du temps. Les vibrations anormales ou les défauts de régulation peuvent également affecter les performances du système et entraîner des dysfonctionnements plus complexes **[4]**.

L'étude des modes de défaillance permet ainsi d'améliorer le diagnostic des pannes, de renforcer la sécurité des installations industrielles et de faciliter l'application des méthodes d'analyse des risques, notamment l'AMDEC, les arbres de défaillance et les réseaux bayésiens. **[4]**

IV Notion de risque industriel

Le risque industriel représente l'une des préoccupations majeures dans les études de sûreté de fonctionnement. Les systèmes industriels peuvent être exposés à différentes situations dangereuses susceptibles de provoquer des dommages humains, matériels, économiques ou environnementaux. L'analyse des risques permet ainsi d'identifier les dangers potentiels, d'évaluer leurs conséquences et de mettre en place des mesures de prévention adaptées afin

de limiter les accidents et les défaillances.**[5]**

Dans le domaine industriel, le risque dépend généralement de la probabilité d'apparition d'un événement dangereux ainsi que de la gravité de ses conséquences. La maîtrise des risques constitue donc une étape essentielle pour assurer la sécurité des installations, protéger les personnes et garantir la continuité de fonctionnement des systèmes industriels. **[5]**

Dans cette partie, seront présentées les notions principales liées au risque industriel, notamment le danger, le risque, la gravité et la fréquence. **[5]**

IV.1. Danger

Le danger représente toute source, situation ou propriété susceptible de provoquer des dommages aux personnes, aux équipements, à l'environnement ou aux installations industrielles. Il constitue un élément potentiel pouvant conduire à un accident ou à une situation dangereuse lorsqu'il n'est pas correctement maîtrisé. **[5]**

Dans le domaine industriel, les dangers peuvent être d'origine mécanique, électrique, chimique, thermique ou humaine. Ils peuvent être liés aux équipements, aux produits utilisés, aux conditions de travail ou encore aux erreurs d'exploitation et de maintenance. **[5]**

L'identification des dangers constitue une étape essentielle dans les études de sûreté de fonctionnement et d'analyse des risques. Elle permet de détecter les situations dangereuses, d'évaluer leurs conséquences potentielles et de mettre en place des mesures de prévention et de protection adaptées afin de réduire les risques industriels. **[5]**

IV.2. Risque

Le risque correspond à la possibilité qu'un danger provoque des conséquences dommageables sur les personnes, les équipements, l'environnement ou les installations industrielles. Il résulte généralement de la combinaison entre la probabilité d'apparition d'un événement dangereux et la gravité de ses conséquences. **[5]**

Dans le domaine industriel, le risque peut être lié à différents facteurs tels que les défaillances des équipements, les erreurs humaines, les conditions d'exploitation ou les agressions extérieures. La présence d'un danger ne signifie pas nécessairement qu'un accident se produira, mais elle augmente la probabilité d'apparition d'un événement indésirable lorsque les mesures de prévention sont insuffisantes. **[5]**

L'évaluation des risques constitue une étape importante dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle permet d'identifier les situations critiques, de hiérarchiser les dangers

et de mettre en œuvre des actions de prévention et de protection adaptées afin de réduire les conséquences des accidents potentiels. **[5]**

Ainsi, la maîtrise des risques contribue à améliorer la sécurité des installations industrielles, à protéger les personnes et à assurer une meilleure continuité de fonctionnement des systèmes.

IV.3. Gravité

La gravité représente l'importance des effets pouvant résulter d'un événement dangereux ou d'une défaillance. Elle permet d'évaluer le niveau des dommages susceptibles d'affecter les personnes, les équipements, l'environnement ou les installations industrielles. **[5]**

Dans les études de sûreté de fonctionnement, la gravité constitue un critère essentiel pour l'évaluation des risques. Plus les effets d'un événement sont importants, plus le niveau de gravité associé au risque est élevé. **[5]**

Les conséquences d'un accident peuvent être humaines, matérielles, économiques ou environnementales. Elles peuvent se traduire par des blessures, des pertes de production, des dommages matériels importants ou encore des impacts négatifs sur l'environnement. **[5]**

L'évaluation de la gravité permet de hiérarchiser les risques et de définir les mesures de prévention et de protection les plus adaptées afin de réduire les effets des événements dangereux dans les systèmes industriels. **[5]**

IV.4. Fréquence

La fréquence représente le nombre d'occurrences d'un événement dangereux ou d'une défaillance pendant une période donnée. Elle permet d'évaluer la probabilité qu'un risque se manifeste dans un système industriel. **[5]**

Dans les études de sûreté de fonctionnement, la fréquence constitue un critère important pour l'analyse et l'évaluation des risques. Un événement susceptible de se produire fréquemment présente généralement un niveau de risque plus élevé qu'un événement rare, surtout lorsque les conséquences associées sont importantes. **[5]**

La fréquence d'apparition d'un événement dépend de plusieurs facteurs, notamment la fiabilité des équipements, les conditions d'exploitation, la qualité de la maintenance ainsi que les facteurs humains et environnementaux. **[5]**

L'évaluation de la fréquence permet ainsi de mieux estimer les niveaux de risque et de mettre en place des mesures de prévention adaptées afin de réduire la probabilité d'apparition des

accidents et des défaillances dans les systèmes industriels. **[5]**

V Les méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement

Afin d'améliorer la sécurité, la fiabilité et la disponibilité des systèmes industriels, plusieurs méthodes d'analyse ont été développées dans le domaine de la sûreté de fonctionnement. Elles permettent d'identifier les défaillances potentielles, d'évaluer les risques associés et de mettre en place des actions préventives ou correctives adaptées. **[6]**

Ces méthodes constituent des outils importants d'aide à la décision dans les domaines industriels. Elles contribuent à améliorer le diagnostic des pannes, à réduire les risques d'accident et à assurer une meilleure continuité de fonctionnement des installations. **[6]**

Parmi les principales méthodes utilisées dans les études de sûreté de fonctionnement, on peut citer l'Analyse Préliminaire des Risques (APR), l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC), la méthode HAZOP, l'arbre de défaillance ainsi que les réseaux bayésiens. Ces derniers occupent une place particulière, car ils permettent de représenter les dépendances probabilistes entre les événements et d'améliorer l'analyse des systèmes complexes soumis à des incertitudes. **[6]**

V.1. Analyse Préliminaire des Risques (APR)

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) est une méthode structurée d'identification et d'évaluation des dangers utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement. Elle permet de détecter les situations dangereuses susceptibles d'affecter un système industriel dès les premières phases de conception ou d'exploitation. **[6]**

L'APR consiste à identifier les événements dangereux, leurs causes possibles ainsi que leurs conséquences sur les personnes, les équipements et l'environnement. Cette méthode permet également de proposer des mesures de prévention et de protection afin de réduire les risques associés. **[6]**

L'Analyse Préliminaire des Risques constitue une méthode qualitative largement utilisée dans les domaines industriels, notamment pour améliorer la sécurité des installations et faciliter la prise de décision en matière de maîtrise des risques. **[6]**

V.2. Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) est une méthode d'analyse préventive utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement. Elle vise

à identifier les défaillances potentielles d'un système, leurs causes ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement des installations industrielles. **[6]**

Cette méthode consiste à examiner chaque composant ou fonction du système afin de déterminer les différents modes de défaillance possibles, leurs effets sur le système et le niveau de criticité associé. Son objectif principal est de prévenir les pannes et de réduire les risques en mettant en place des actions correctives ou préventives adaptées. **[6]**

L'AMDEC permet également de hiérarchiser les défaillances selon leur gravité, leur fréquence d'apparition et leur détectabilité. Elle constitue ainsi un outil important d'aide à la maintenance, à l'amélioration de la fiabilité et à la maîtrise des risques industriels. Cette méthode est largement utilisée dans plusieurs secteurs, notamment l'énergie, les transports, l'industrie manufacturière et les systèmes automatisés. **[6]**

V.3. Méthode HAZOP

La méthode HAZOP (Hazard and Operability Study) est une méthode d'analyse des risques utilisée pour identifier les dangers potentiels ainsi que les problèmes d'exploitation pouvant affecter un système industriel. Elle est particulièrement employée dans les industries chimiques, pétrolières et, plus généralement, dans les systèmes complexes pour lesquels la sécurité des procédés est essentielle. **[6]**

La méthode HAZOP repose sur une analyse systématique des différentes parties du système afin de détecter les écarts possibles entre le fonctionnement prévu et le fonctionnement observé des installations. Cette analyse s'appuie sur des mots-guides permettant d'identifier les anomalies susceptibles de provoquer des situations dangereuses ou des dysfonctionnements. **[6]**

L'objectif principal de la méthode HAZOP est d'identifier les causes des écarts, d'évaluer leurs conséquences et de proposer des mesures correctives ou préventives adaptées afin d'améliorer la sécurité et la fiabilité du système. **[6]**

La méthode HAZOP constitue ainsi un outil important dans les études de sûreté de fonctionnement, car elle contribue à prévenir les accidents industriels, à réduire les risques et à améliorer les conditions d'exploitation des installations. **[6]**

V.4. Arbre de défaillance

L'arbre de défaillance est une méthode d'analyse des risques utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement afin d'identifier les causes pouvant conduire à un événement indésirable

ou à une défaillance d'un système industriel. **[6]**

Cette méthode repose sur une représentation graphique sous forme d'arbre logique reliant les différents événements de défaillance à travers des portes logiques telles que « ET » et « OÙ ». L'analyse débute généralement par un événement redouté, appelé événement sommet, puis cherche à déterminer l'ensemble des causes susceptibles de provoquer son apparition.

L'arbre de défaillance permet d'analyser les relations de causalité entre les défaillances des composants et les conséquences sur le système global. Il facilite ainsi l'identification des éléments critiques, l'évaluation des risques et la mise en place de mesures de prévention adaptées. **[6]**

Cette méthode est largement utilisée dans les systèmes industriels complexes en raison de sa capacité à représenter clairement les scénarios de défaillance et à améliorer les opérations de diagnostic, de maintenance et d'analyse de sécurité. **[6]**

V.5. Réseaux bayésiens

Les réseaux bayésiens constituent une méthode probabiliste utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement afin de représenter et d'analyser les relations de dépendance entre les variables d'un système. Ils reposent sur une structure graphique orientée permettant de modéliser les phénomènes d'incertitude ainsi que les relations de causalité entre les événements. **[6]**

Les réseaux bayésiens permettent de réaliser des opérations d'inférence, de diagnostic et de prédiction à partir des informations disponibles. Ils présentent également l'avantage d'intégrer des données incomplètes ainsi que les connaissances expertes. **[6]**

Dans le domaine industriel, les réseaux bayésiens sont utilisés pour l'analyse des risques, le diagnostic des défaillances, la maintenance prédictive et l'aide à la décision. Leur association avec les arbres de défaillance permet d'améliorer la modélisation des systèmes complexes et de renforcer l'analyse probabiliste des défaillances. **[6]**

VI Importance de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement occupe une place fondamentale dans les systèmes industriels modernes, en raison des exigences croissantes en matière de sécurité, de fiabilité, de disponibilité et de performance. Elle constitue une démarche essentielle visant à garantir un fonctionnement maîtrisé des installations industrielles tout en limitant les risques de défaillance et les conséquences susceptibles d'en découler. **[7]**

L’intégration des principes et des méthodes de sûreté de fonctionnement permet d’améliorer la disponibilité des équipements, d’optimiser les stratégies de maintenance et de réduire les interruptions de production. Elle contribue également à renforcer la protection des personnes, à préserver l’environnement et à diminuer les coûts liés aux pannes, aux arrêts non planifiés et aux dysfonctionnements. **[7]**

Par ailleurs, la sûreté de fonctionnement représente un véritable outil d’aide à la décision dans le domaine industriel. Grâce aux différentes méthodes d’analyse des risques et des défaillances, telles que l’APR, l’AMDEC, l’arbre de défaillance et les réseaux bayésiens, il devient possible d’identifier les éléments critiques d’un système, de comprendre les mécanismes de défaillance et de définir des actions préventives ou correctives adaptées. Cette approche favorise ainsi une meilleure maîtrise des risques et une amélioration continue des performances globales des installations. **[7]**

Ainsi, la sûreté de fonctionnement constitue une composante indispensable de la conception, de l’exploitation et de la maintenance des systèmes industriels, dans la mesure où elle vise à garantir la continuité de service, à renforcer la fiabilité et à assurer un niveau élevé de maîtrise des risques. **[7]**

Conclusion

Ce chapitre a présenté les principaux concepts liés à la sûreté de fonctionnement, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, ainsi que les notions de défaillance, de risque et de criticité. Il a également introduit plusieurs méthodes d’analyse couramment utilisées dans le domaine industriel, telles que l’APR, l’AMDEC, la méthode HAZOP, l’arbre de défaillance et les réseaux bayésiens. **[7]**

Ces éléments constituent un cadre méthodologique utile pour l’étude des systèmes industriels et pour l’évaluation de leur comportement face aux défaillances. Dans la suite de ce travail, l’accent sera mis sur l’arbre de défaillance et les réseaux bayésiens afin d’examiner leur apport dans la modélisation et l’analyse des risques. **[7]**

Chapitre II
Arbre de Défaillance

Introduction

Le diagnostic des défaillances dans les systèmes industriels est une étape essentielle pour assurer leur bon fonctionnement. Il consiste à repérer, analyser et localiser les défauts susceptibles de perturber le comportement normal du système. Cette démarche permet ensuite de proposer des solutions adaptées afin de rétablir un fonctionnement conforme aux objectifs initiaux. De ce fait, le diagnostic joue un rôle clé dans les systèmes de production, notamment lorsque ceux-ci doivent fonctionner de manière fiable et continue où être utilisés par des opérateurs. **[1]**

Lorsqu'il s'agit d'analyser les défaillances d'un système, la construction d'un arbre de défaillance ne se fait pas directement. Elle repose généralement sur une étude préalable du système, basée sur une analyse dysfonctionnelle. Parmi les approches les plus utilisées, l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) permet d'identifier les différentes causes de défaillance ainsi que leurs impacts sur le fonctionnement global. Cette méthode suit une logique inductive, en partant des causes pour comprendre leurs conséquences. Les informations obtenues, notamment les modes de défaillance des composants, sont ensuite utilisées pour construire les niveaux inférieurs de l'arbre de défaillance de manière structurée et cohérente. **[1]**

I Arbre de défaillance

I.1. Historique

L'analyse par arbre de défaillance constitue l'une des premières méthodes développées pour réaliser une étude systématique des risques dans les systèmes complexes. Elle a été introduite au début des années 1960 par la compagnie américaine Bell Téléphone Laboratories, dans le cadre de l'évaluation de la sécurité des systèmes de lancement de missiles. Son objectif principal est d'identifier les différentes combinaisons d'événements et de défaillances susceptibles de conduire à un événement redouté considéré comme point de départ de l'analyse **[1]**

Avec le temps, cette méthode s'est largement diffusée et est aujourd'hui utilisée dans plusieurs secteurs industriels tels que l'aéronautique, le nucléaire ou encore l'industrie chimique, où la maîtrise des risques est essentielle. Elle peut également être appliquée après la survenue d'un accident afin d'en analyser les causes. Dans ce cas, l'événement final étant déjà connu, l'analyse vise principalement à remonter aux origines réelles du dysfonctionnement. On parle alors d'arbre des causes, dont l'objectif est de comprendre les mécanismes ayant conduit à l'accident afin de prévenir **[2]**

I.2. Définition

L'arbre de défaillance (ADD) est une méthode déductive de la sûreté de fonctionnement utilisée pour analyser de manière systématique les causes d'un événement redouté unique, appelé événement sommet (par exemple un accident grave, une défaillance d'un système de sécurité ou une exposition dangereuse en milieu industriel). Il consiste en une représentation graphique hiérarchique qui, partant de cet événement indésirable, décompose, niveau par niveau, les causes possibles (pannes matérielles, erreurs humaines, défaillances organisationnelles) jusqu'aux événements de base, en reliant intermédiaires et causes par des portes logiques (ET, OU, etc.). Lorsque celles-ci sont indépendantes et probabilisables, l'ADD permet non seulement de visualiser les scénarios de défaillance conduisant à un risque industriel, mais aussi de quantifier, par un traitement mathématique, la probabilité d'occurrence de l'événement redouté, contribuant ainsi à la maîtrise des risques en hygiène et en sécurité.**[3]**

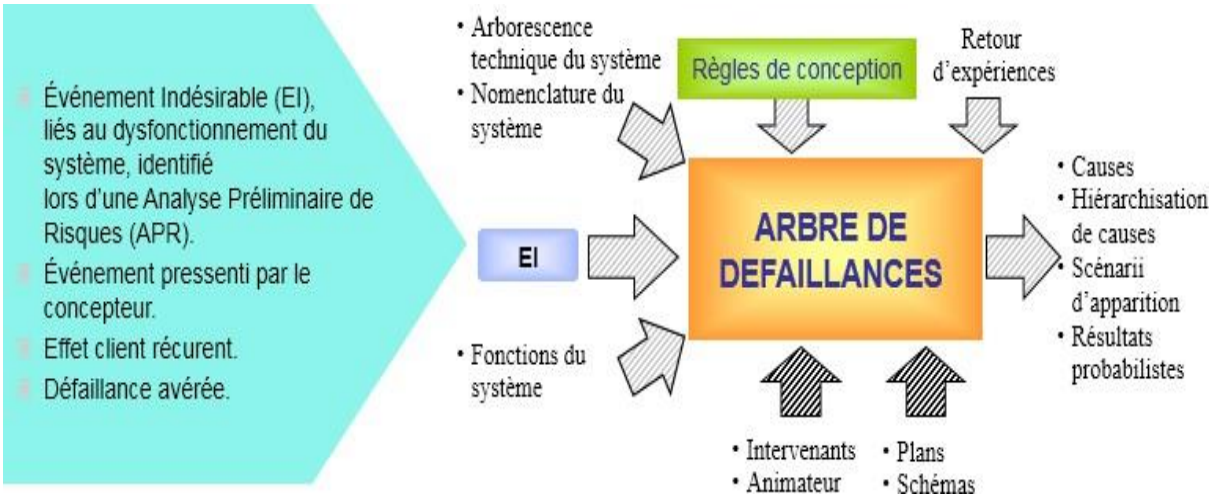


Figure 05 : L'arbre de défaillance. **[7]**

II Rôle des arbres de défaillance

L'arbre de défaillance constitue un outil essentiel en ingénierie de la sûreté, particulièrement dans les secteurs industriels à haut risque. Il est largement utilisé dès les premières phases de conception afin d'anticiper les situations pouvant conduire à des événements indésirables. Cette approche permet d'identifier, de manière structurée, les combinaisons de défaillances susceptibles d'engendrer un accident, ce qui contribue à améliorer la conception du système et à éviter des modifications tardives souvent coûteuses. **[4]**

Par ailleurs, l'arbre de défaillance joue également un rôle important dans le diagnostic des systèmes en fonctionnement. Il permet d'analyser les causes probables d'une défaillance en mettant en évidence les composants les plus critiques, facilitant ainsi la prise de décision en matière de maintenance et de prévention des risques. **[4]**

II.3.1. Représentation graphique

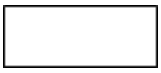
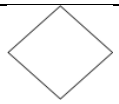
La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à travers une symbolisation graphique classée en deux types **[5]**

- Evènements ;
- Portes logiques

➢ **1° Evènements : [5]**

La symbolisation des évènements a pour but de faciliter la désignation entre les différents types d'évènements. **(Tableau 01)**

Tableau 01 : Symboles des évènements dans les arbres de défaillances

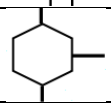
Symbole	Nom	Description
	Evènement intermédiaire ou final	Evènement du plus haut niveau : sommet d'arbre « évènement redouté », ou évènement intermédiaire résultant d'un évènement redouté.
	Evènement de base	Evènement du plus bas niveau pour lequel la probabilité d'apparition ou d'information est disponible.
	Evènement non développé	Le développement de cet évènement n'est pas terminé, soit parce que ses conséquences sont négligeables, soit par manque d'information.
	Evènement maison	Evènement qui doit se produire avec certitude lors de la production ou de la maintenance. On peut aussi le définir comme un évènement non- probabilisé ou (P=1).

➢ **2° Portes logiques : [5]**

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU (Tableau 3.2). Les portes fonctionnent comme suit :

- OÙ : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent ;
- ET : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents

Tableau 02 : Symboles des portes dans les arbres de défaillances

Symbole	Nom	Description	Nombre d'entrées
	**OU (OR)**	L'évènement de sortie apparait si au moins un des évènements d'entrées apparait	>1
	**ET (AND)**	L'évènement de sortie apparait si tous les évènements apparaissent	>1
	**SI (IF)**	Sortie générée si l'évènement entrée est présent et si la condition X est réalisée	=1

III Construction d'un arbre de défaillances

III.1. Principe [3]

Le principe de la construction d'un arbre de défaillance est fondé sur les points suivants :

- Le point de départ de la construction de l'arbre c'est l'évènement redouté lui-même. Ce dernier étant le niveau le plus haut ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire les sous événements déclencheurs de sa survenance. Il est essentiel qu'il soit unique et bien identifier. **[3]**
- Un arbre de défaillance étant construit généralement de haut en bas, il est divisé en niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs évènements du niveau inférieur et qui s'articulent par l'intermédiaire des portes logiques. Pour chaque évènement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des évènements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation. **[3]**
- Les relations entre les niveaux sont représentées par des liens logiques, dont la plupart sont des « portes OU » et des « portes ET ».Ces portes logiques permettent de définir précisément les liens entre les évènements des différents niveaux. Remonter d'effets en causes de l'évènement redouté à des évènements élémentaires probables et indépendants entre eux en adoptant une logique déductive et booléenne (allant des effets vers les causes). Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées. **[3]**
- Le processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des évènements en combinaison d'évènements de niveaux inférieurs, notamment parce qu'ils disposent

d’une valeur de probabilité d’occurrence de l’évènement analysé. Ces évènements non décomposés de l’arbre sont appelés évènements élémentaires (ou évènements de bases). En résumé, les règles importantes de la construction de l’arbre de défaillance sont : **[3]**

1. Partir de l’évènement redouté (sommet de l’arbre),

2. Imaginer les évènements intermédiaires possibles expliquant l’évènement sommet,

3. Considérer chaque évènement intermédiaire comme un nouvel évènement sommet,

4. Imaginer les causes possibles de chaque évènement au niveau considéré,

5. Descendre progressivement dans l’arbre jusqu’aux évènements de base.

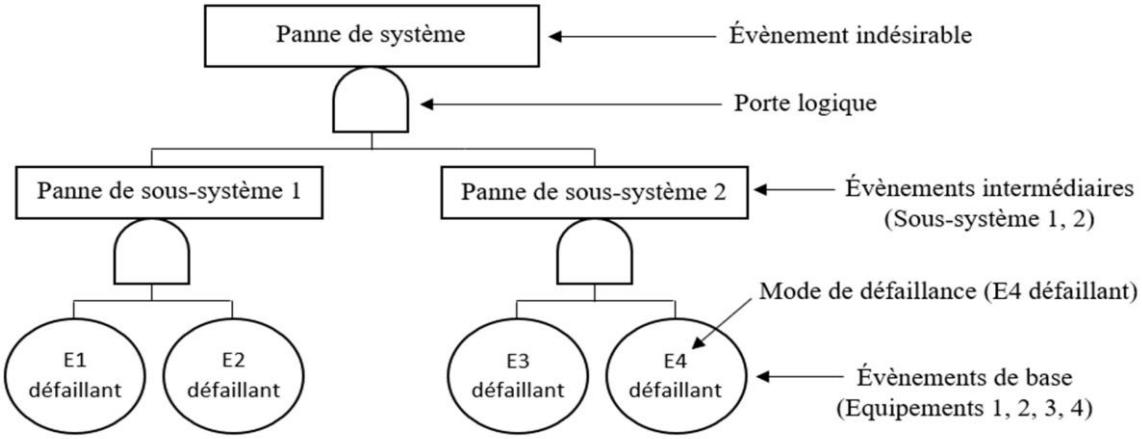


Figure 06 : exemple simplifié d’un arbre de défaillance.

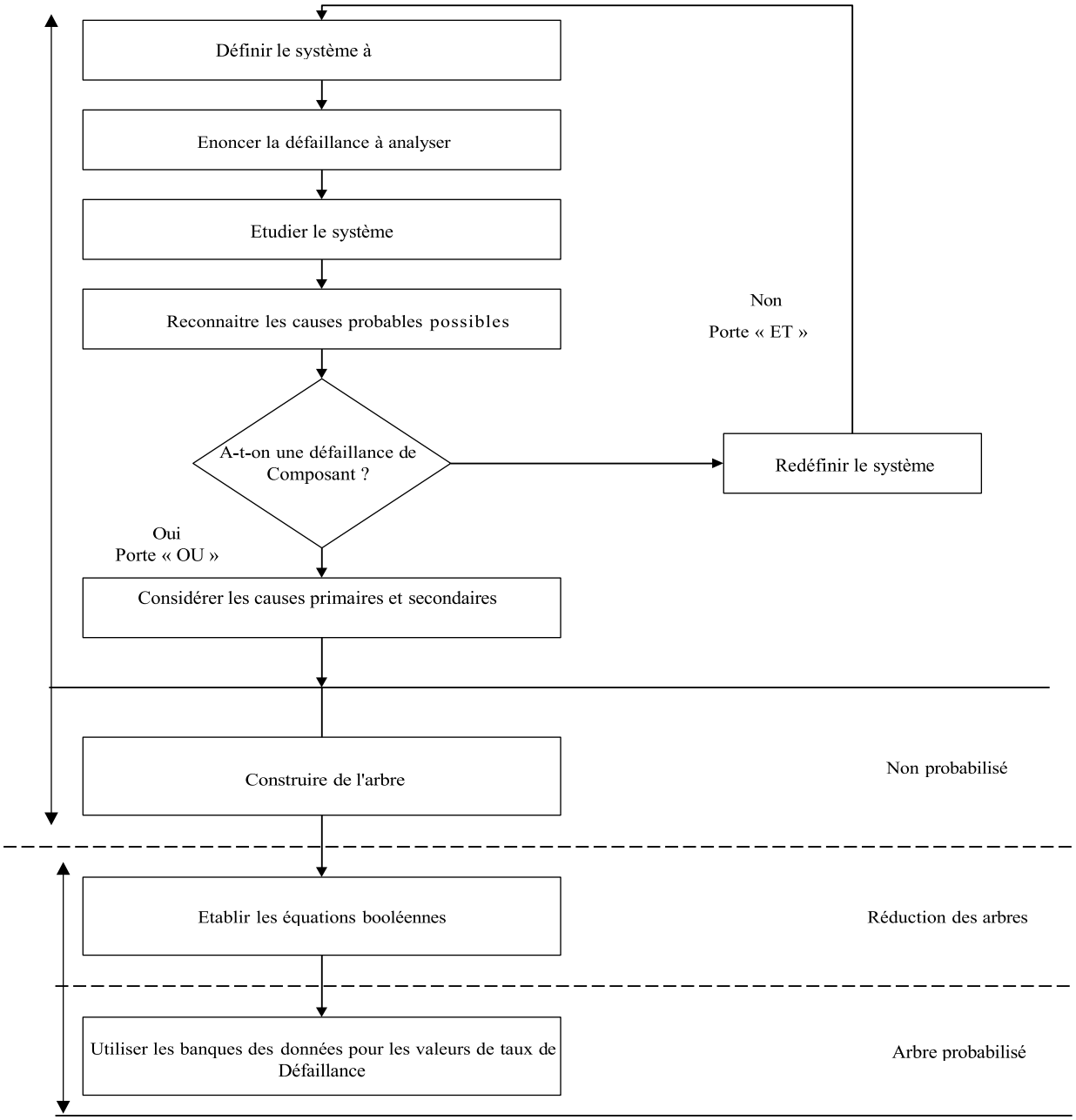


Figure 07 : Démarche de l'ADD

1. Définition du système à étudier

La première étape consiste à délimiter clairement le système faisant l'objet de l'analyse, en précisant ses frontières physiques et fonctionnelles. Ce système peut correspondre à une installation complète ou à un sous-ensemble présentant un niveau de risque particulier. À ce stade, il est indispensable de rassembler l'ensemble des documents techniques disponibles afin de garantir une compréhension globale du système.

Par la suite, une décomposition du système est réalisée selon une approche structurée,

généralement basée sur des critères tels que la technologie utilisée, les aspects liés à la maintenance ou encore les données disponibles sur le système étudié. Cette étape permet d'identifier les différents éléments constitutifs du système.

Enfin, il s'agit de recenser les composants élémentaires correspondant au niveau le plus détaillé de l'analyse. Ces composants représentent les unités de base sur lesquelles portera l'ét0bude des défaillances.

2. Définition de la défaillance à analyser

Cette étape consiste à préciser l'événement indésirable à étudier, en définissant de manière claire les modes de défaillance associés aux différents composants. Pour chaque élément, il est nécessaire d'identifier les différentes formes sous lesquelles une défaillance peut se manifester, afin de couvrir l'ensemble des situations possibles.

3. Analyse fonctionnelle du système

Une fois les composants identifiés, il convient de reconstituer le fonctionnement global du système en établissant les relations entre ses différentes parties. Cette reconstitution permet de comprendre le rôle de chaque composant et son influence sur le comportement global du système.

4. Identification des causes potentielles de défaillance

La dernière étape consiste à rechercher les causes susceptibles d'être à l'origine des défaillances identifiées. Cette analyse peut s'appuyer sur des outils méthodologiques tels que la méthode des 5M ou le diagramme d'Ishikawa, permettant de structurer les causes en différentes catégories. Les causes identifiées peuvent être classées en causes principales et secondaires, facilitant ainsi leur analyse et leur interprétation.

II.2. Etapes de construction

II.2.1. Etape 01 : Evènement sommet (évènement indésirable)

- Cette étape réside dans la définition de l'évènement à étudier d'une façon explicite et précise, cet évènement est appelé sommet, ou encore évènement redouté.**[8]**
- Elle est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse.
- L'arbre de défaillance se veut être une représentation synthétique ; le libellé de l'évènement devra être bref, mais aussi évocateur que possible dans la boite qui le représente dans l'arbre, on lui associant un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'évènement. **[8]**
- Cette remarque est aussi valable pour tous les éléments qui vont figurer dans l'arbre.

II.2.2. Etape 02 : Evènement intermédiaires

- L'évènement sommet étant défini, il convient de décrire la combinaison d'évènements pouvant conduire à cet évènement sommet.
- Les évènements intermédiaires sont des évènements moins globaux.
- Une fois un évènement définis, ils seront liés à l'évènement sommet via un connecteur.
- Ces évènements intermédiaires peuvent être, à leur tour, redéfinis par d'autres évènements intermédiaires plus détaillés. **[8]**

II.2.3. Etape 03 : Evènements de base, transfert et conditions

- Il est possible de prendre en compte des évènements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces évènements sont appelés évènements non développés. **[8]**
- Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée.
- Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page.
- Les évènements de bases sont les évènements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage ; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel…) d'un élément du système. **[8]**

La construction de l'arbre de défaillance est une phase importante de la méthode car sa complétude conditionne celle de l'analyse qualitative ou quantitative qui sera réalisée par la suite. Cette construction est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025. [8]**

Dans l'objectif de donner une vue claire et structurée des évènements et des enchainements, l'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés **[6]** :

- Identification des scénarios critiques susceptibles de conduire à l'évènement redouté.
- Analyse des différentes combinaisons de défaillances menant à l'évènement sommet.

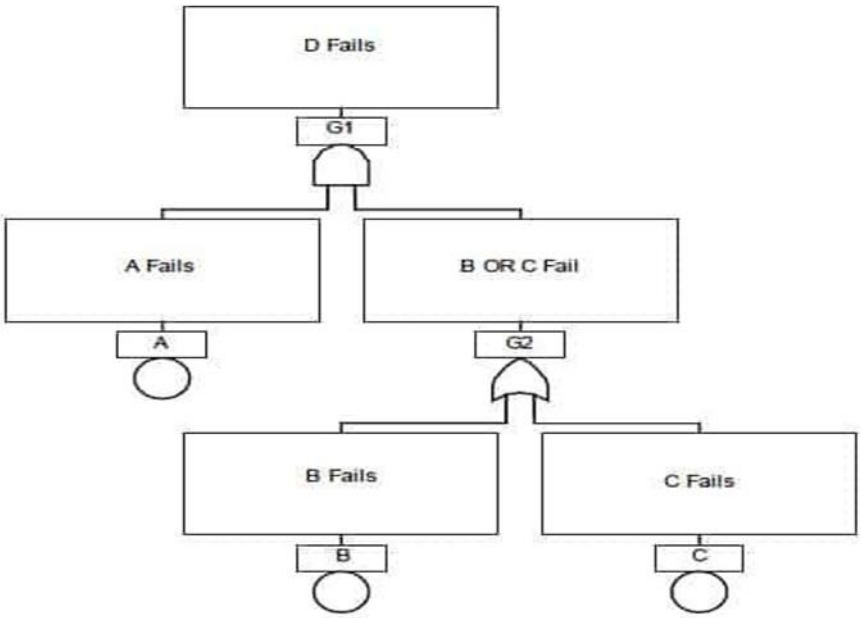


Figure 08 : arbre de défaillance simplifier.

IVAnalyse fonctionnelle de l'ADD [8]

L'analyse qualitative d'un système, également appelée analyse fonctionnelle, consiste en une démarche structurée visant à examiner de manière complète les défaillances potentielles d'un système ainsi que leurs impacts sur les fonctions qu'il doit assurer, et ce dans l'ensemble des conditions de fonctionnement possibles. Une fois l'arbre de défaillance élaboré, celui-ci peut être exploité selon deux approches principales relevant de l'analyse qualitative : **[8]**

IV.1. L'identification

La première étape de l'analyse fonctionnelle consiste à identifier les scénarios de défaillance pouvant conduire à l'événement redouté. Pour cela, on étudie les différentes combinaisons d'événements de base qui peuvent provoquer cet événement. **[8]**

L'objectif est de repérer les combinaisons les plus simples, appelées coupes minimales. Ce sont les plus petits groupes d'événements dont la réalisation suffit à entraîner la défaillance du système. Leur identification permet de mieux comprendre les causes principales du dysfonctionnement. **[8]**

- **Coupe minimale :**

Une coupe correspond à un ensemble d'événements de base dont la réalisation entraîne l'apparition de l'événement indésirable. Parmi ces ensembles, on distingue les **coupes**

minimales, qui représentent les combinaisons les plus simples capables de provoquer la défaillance du système. **[8]**

Une coupe est dite minimale lorsqu'aucun de ses éléments ne peut être supprimé sans empêcher la survenue de l'événement redouté. Autrement dit, si l'un des événements constituant cette coupe ne se produit pas, alors l'événement indésirable ne peut pas avoir lieu. **[8]**

La détermination des coupes minimales repose sur la transformation de l'arbre de défaillance en une expression logique à l'aide de l'algèbre de Boole. Dans cette représentation : **[8]**

- Chaque événement de base est modélisé par une variable logique,
- Une porte ET est traduite par un produit logique,
- Une porte OU est traduite par une somme logique.

L'événement redouté peut alors être exprimé comme une combinaison des différentes coupes minimales, ce qui permet de simplifier l'analyse et d'identifier les scénarios critiques du système **[8]**.

- **Représentation mathématique :**

$$F = C1 + C2 + \ldots + Cn = \sum_{i=1} Ci$$

Chaque coupe minimale Ci est définie comme le produit logique de plusieurs événements de base : **[8]**

$$C_i = B_i^1 * B_i^2 * \& * B_i^{mi} = \prod_{i=1}^{m_i} B_i^j$$

- **Interprétation :**

- **F :** événement redouté
- **Ci :** coupe minimale
- **Bj :** événement de base
- **mi :** nombre d'événements dans la coupe

Une fois l'expression simplifiée, les termes obtenus correspondent directement aux coupes minimales. Leur identification peut être réalisée à l'aide de méthodes classiques de simplification logique, comme les tableaux de Karnaugh. **[8]**

IV.2. Mise en œuvre des barrières de sécurité

La seconde forme d'exploitation de l'analyse fonctionnelle consiste à mettre en place une stratégie de protection basée sur l'allocation de **barrières de sécurité**. Cette démarche vise à réduire le risque d'apparition de l'événement redouté en fonction de sa gravité et des exigences réglementaires. **[8]**

Dans ce cadre, la **technique des barrières** est utilisée pour renforcer la maîtrise des risques, notamment lorsque les données probabilistes relatives aux événements de base ne sont pas disponibles ou restent difficiles à estimer. Cette approche a été largement développée dans les études de sûreté, en particulier dans les domaines industriels sensibles. **[8]**

Une barrière correspond à un moyen de prévention destiné à empêcher ou limiter la survenue d'un événement indésirable. On distingue généralement deux catégories principales : **[8]**

- **Les barrières techniques,** qui reposent sur des dispositifs matériels tels que les systèmes de protection, les alarmes ou les équipements de sécurité.

- **Les barrières organisationnelles,** qui concernent les procédures d'exploitation, les règles de maintenance ou encore la formation des opérateurs.

En pratique, les barrières techniques sont souvent privilégiées, car elles offrent une meilleure fiabilité et une efficacité plus durable dans la prévention des risques.

V Analyse quantitative de l'ADD

L'analyse quantitative de l'arbre de défaillance représente une étape avancée de l'étude de la sûreté de fonctionnement, permettant d'évaluer de manière numérique le comportement du système face aux défaillances. Contrairement à l'analyse qualitative, qui se limite à l'identification des scénarios possibles, cette approche vise à quantifier la probabilité d'apparition de l'événement redouté. **[8]**

Cette démarche repose sur l'exploitation des données de fiabilité associées aux événements de base. Ces données peuvent provenir de différentes sources telles que les bases de données industrielles, les retours d'expérience ou encore des estimations issues d'expertises techniques. L'objectif est de traduire les défaillances identifiées en valeurs probabilistes afin d'évaluer leur impact global sur le système. **[8]**

Dans ce cadre, l'arbre de défaillance est converti en un modèle mathématique basé sur les règles de la probabilité et les principes de l'algèbre de Boole. Chaque événement de base est représenté par une variable aléatoire, et les relations logiques entre ces événements sont transformées en expressions mathématiques permettant de calculer la probabilité de l'événement sommet. **[8]**

V.1. Calcul des probabilités

L'évaluation de la probabilité de l'événement redouté dépend de la nature des relations logiques reliant les événements de base. **[8]**

V.1.1. Porte logique ET

$$P(E)=P(A) \cdot P(B)$$

Lorsque les événements sont indépendants, la probabilité de l'événement résultant correspond au produit des probabilités des événements d'entrée. Ce type de configuration traduit une situation où plusieurs conditions doivent être réunies simultanément pour que la défaillance globale se produise. **[8]**

V.1.2. Porte logique OU

$$P(E)=P(A) +P(B) -P(A) \cdot P(B)$$

Dans ce cas, l'événement redouté se produit dès qu'au moins un des événements se réalise. La probabilité correspond alors à la somme des probabilités individuelles, corrigée afin d'éviter un double comptage. **[8]**

V.2. Hypothèses de l'analyse quantitative

L'application de cette méthode repose sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices permettant de rendre les calculs réalisables : **[8]**

- les événements de base sont supposés statistiquement indépendants,
- les probabilités associées aux défaillances sont connues ou peuvent être estimées,
- le système est considéré comme statique, sans évolution temporelle complexe.

Ces hypothèses facilitent la modélisation, mais doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats.

VI -Importance et apports

L'analyse quantitative offre plusieurs avantages dans l'étude des systèmes industriels : **[8]**

- elle permet d'estimer le niveau global de risque,
- elle met en évidence les éléments les plus critiques du système,
- elle contribue à orienter les actions de maintenance et d'amélioration,
- elle permet de comparer différentes solutions techniques en termes de fiabilité.

Ainsi, elle constitue un outil d'aide à la décision essentiel pour optimiser la sécurité et la performance des installations industrielles.

VII-Avantages et inconvénients de l'arbre de défaillance

VII.1. Avantages

- Permet de combiner une approche qualitative avec une analyse quantitative basée sur les probabilités. **[2]**
- Met en évidence les situations critiques du système en identifiant les combinaisons d'événements les plus influentes. **[2]**
- Facilite l'évaluation de l'impact des actions d'amélioration sur le niveau de risque. **[2]**
- Permet d'intégrer les défaillances humaines dans l'analyse. **[2]**
- Offre une représentation graphique claire et structurée. **[2]**

VII.2. Inconvénients

- Nécessite un effort important en termes de temps et de ressources. **[2]**
- Dépend de l'expertise des analystes, pouvant entraîner des résultats différents.
- Repose sur des hypothèses simplificatrices. **[2]**
- Peut être affectée par l'incertitude des données probabilistes. **[2]**
- Les résultats doivent être interprétés avec précaution. **[2]**

Conclusion

L’analyse par arbre de défaillance constitue une méthode essentielle de la sûreté de fonctionnement, permettant d’étudier de manière structurée les causes pouvant conduire à un événement redouté. Grâce à son approche déductive, elle offre une représentation claire des relations entre les différentes défaillances et facilite la compréhension des mécanismes responsables des dysfonctionnements d’un système.

Sur le plan qualitatif, cette méthode permet d’identifier les scénarios critiques ainsi que les combinaisons d’événements les plus significatives, notamment à travers la détermination des coupes minimales. Elle contribue également à la mise en place de stratégies de prévention, telles que l’introduction de barrières de sécurité adaptées aux risques identifiés.

Sur le plan quantitatif, l’arbre de défaillance permet d’évaluer la probabilité d’occurrence de l’événement sommet en s’appuyant sur des modèles mathématiques basés sur l’algèbre de Boole et les lois de probabilité. Cette dimension apporte une aide précieuse à la prise de décision en matière de gestion des risques et d’optimisation de la fiabilité des systèmes industriels.

Cependant, l’efficacité de cette méthode repose sur certaines conditions, notamment la disponibilité de données fiables, l’hypothèse d’indépendance des événements de base et la nécessité de construire un modèle cohérent et représentatif du système étudié. Malgré ces limites, l’ADD demeure un outil puissant largement utilisé dans les domaines industriels à haut risque, en raison de sa capacité à structurer l’analyse et à améliorer la maîtrise des défaillances.

Chapitre III
Réseau bayésien

I Réseau Bayésien

I.1. Introduction

Contrairement à l'arbre de défaillance, qui repose sur une logique booléenne et une approche déductive, le réseau bayésien introduit explicitement l'incertitude et les dépendances entre événements, ce qui le rend particulièrement adapté aux systèmes industriels complexes où les données sont partielles ou incertaines. **[16]**

Les réseaux bayésiens constituent une méthode probabiliste largement utilisée dans l'analyse des systèmes complexes et la gestion des incertitudes. Ils permettent de représenter les relations de dépendance entre différents événements à l'aide d'un modèle graphique orienté associé à des probabilités conditionnelles. **[16]**

Cette approche repose sur les principes de la théorie des probabilités et du théorème de Bayes, offrant ainsi un outil efficace pour le raisonnement en présence d'informations incomplètes ou incertaines. Grâce à leur capacité à modéliser les interactions entre plusieurs variables, les réseaux bayésiens sont aujourd'hui appliqués dans de nombreux domaines, notamment le diagnostic industriel, la maintenance, la sûreté de fonctionnement et l'aide à la décision. **[16]**

Dans le domaine industriel, cette méthode est particulièrement appréciée pour sa capacité à analyser les causes de défaillance, à prédire l'évolution des systèmes et à améliorer l'évaluation des risques. Elle représente ainsi une alternative performante aux méthodes classiques d'analyse de fiabilité, notamment lorsque les relations entre les événements deviennent complexes. **[16]**

I.2. Historique

Les réseaux bayésiens occupent une place importante parmi les modèles graphiques probabilistes grâce à leur capacité à représenter et à traiter des connaissances incertaines ou probabilistes. Leur appellation est liée aux travaux du mathématicien **Thomas Bayes**, à l'origine des fondements de la théorie bayésienne des probabilités au XVIII^{e} siècle.

Le développement moderne des réseaux bayésiens a été principalement initié dans les années 1980 par **Judea Pearl**, qui a contribué à leur formalisation et à leur diffusion dans plusieurs domaines scientifiques. Depuis, ces modèles sont devenus des outils efficaces pour la représentation des connaissances et le raisonnement probabiliste dans des environnements caractérisés par l'incertitude.**[17]**

Les réseaux bayésiens permettent notamment d'estimer la probabilité d'apparition de

certains événements à partir d'informations disponibles et d'identifier les facteurs susceptibles d'influencer le comportement d'un système. Grâce à ces propriétés, ils sont largement utilisés dans le diagnostic, l'analyse des risques, la maintenance et la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. **[17]**

I.3. Définition [9]

Les réseaux bayésiens sont des modèles graphiques probabilistes utilisés pour représenter les relations de dépendance entre différentes variables aléatoires. Ils reposent sur un graphe orienté acyclique dans lequel les nœuds représentent les variables du système, tandis que les arcs traduisent les relations de dépendance conditionnelle entre ces variables. **[9]**

Cette méthode est fondée sur le théorème de Bayes, qui permet de calculer la probabilité d'un événement en fonction d'informations observées. La formule de Bayes s'écrit comme suit : **[9]**

$$P(A/B) = \frac{\mathrm{p(B).P(B/A)}}{\mathrm{P(A)}}$$

où:

- P(A|B) représente la probabilité de l'événement A sachant B
- P(B|A) est la probabilité de B sachant A
- P(A) correspond à la probabilité a priori de A
- P(B) représente la probabilité de l'événement B.

Dans un réseau bayésien, la probabilité globale du système est calculée à partir des probabilités conditionnelles associées aux différentes variables du réseau : **[9]**

$$P(X1, X2, \dots, Xn) = \prod_{i=1}^{n} P(Xi|parents(Xi))$$

Cette formulation permet de simplifier les calculs probabilistes en tenant compte uniquement des dépendances directes entre les variables.

Grâce à leur capacité à modéliser les incertitudes et les interactions entre événements, les réseaux bayésiens sont largement utilisés dans plusieurs domaines tels que le diagnostic

industriel, la maintenance, l'aide à la décision et la sûreté de fonctionnement. **[9]**

I.4. Modèles graphiques probabilistes

Les modèles graphiques probabilistes constituent une approche de représentation des connaissances permettant de modéliser des systèmes complexes en tenant compte des relations de dépendance et des incertitudes entre différentes variables. Ils combinent les principes de la théorie des graphes et ceux des probabilités afin de représenter de manière structurée les interactions existant au sein d'un système. **[9]**

Le principe fondamental de ces modèles repose sur la décomposition d'un problème complexe en plusieurs éléments plus simples reliés entre eux par des relations de dépendance. Cette représentation facilite la compréhension, l'analyse et le traitement des phénomènes étudiés. **[9]**

Un modèle graphique probabiliste est généralement composé de deux éléments principaux : **[9]**

- une composante graphique, représentée sous forme de graphe permettant d'illustrer les relations entre les variables du système ;
- une composante numérique, associée aux probabilités conditionnelles ou aux paramètres décrivant le comportement des variables.

Selon la nature des relations, les modèles peuvent être représentés par des graphes orientés ou non orientés. Les réseaux bayésiens appartiennent à la catégorie des modèles graphiques orientés et reposent sur des relations probabilistes conditionnelles entre les variables. **[9]**

Grâce à leur capacité à représenter les dépendances et à gérer l'incertitude, ces modèles sont largement utilisés dans plusieurs domaines, notamment le diagnostic industriel, la maintenance, l'aide à la décision et la sûreté de fonctionnement.

I.5. Structure d'un réseau bayésien [10]

La structure d'un réseau bayésien repose sur un graphe orienté acyclique permettant de représenter les relations de dépendance entre les différentes variables d'un système. Cette structure constitue l'élément fondamental du réseau, car elle permet d'organiser les connaissances et de modéliser les interactions probabilistes entre les événements étudiés. **[10]**

Un réseau bayésien est composé de deux parties principales : **[10]**

- Une partie qualitative, représentée par la structure graphique du réseau,

- Une partie quantitative, correspondant aux probabilités conditionnelles associées aux différents nœuds du graphe.

Dans cette représentation, chaque nœud correspond à une variable aléatoire pouvant représenter un état, une défaillance, une cause ou un événement observé. Les arcs orientés reliant les nœuds traduisent les relations de dépendance ou de causalité entre les variables. **[10]**

La structure d'un réseau bayésien doit respecter la propriété d'acyclicité, c'est-à-dire qu'aucun chemin orienté ne doit permettre de revenir au nœud de départ. Cette caractéristique garantit la cohérence du modèle probabiliste et facilite les mécanismes d'inférence. **[10]**

Dans un réseau bayésien, les relations entre les variables sont définies selon une organisation hiérarchique faisant intervenir les notions de nœuds parents et de nœuds enfants. Lorsqu'un arc relie deux variables, le nœud situé à l'origine de l'arc est appelé nœud parent, tandis que le nœud recevant l'arc est appelé nœud enfant. **[10]**

Chaque nœud du réseau est associé à une table de probabilité conditionnelle permettant de quantifier l'influence des variables parentes sur la variable considérée. Lorsqu'un nœud ne possède aucun parent, une probabilité a priori lui est directement associée.

La probabilité conjointe d'un réseau bayésien est obtenue à partir du produit des probabilités conditionnelles des différentes variables du réseau : **[10]**

$$P(X1, X2,\ldots, Xn)=\prod_{i=1}^{n} P(Xi|Parents(Xi))$$

Cette représentation permet de simplifier les calculs probabilistes tout en tenant compte des dépendances existant entre les variables. Grâce à cette structure, les réseaux bayésiens sont largement utilisés dans l'analyse des systèmes complexes, le diagnostic industriel et la sûreté de fonctionnement. **[10]**

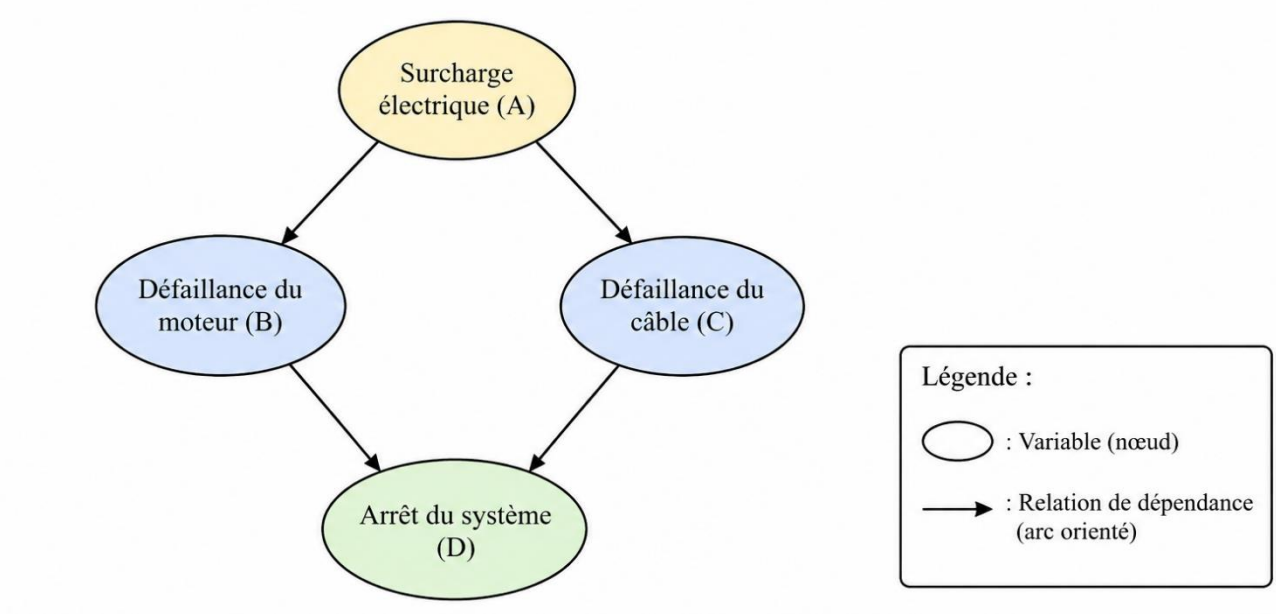


Figure 09 : Exemple simplifié de la structure d'un réseau bayésien.

A : cause possible (surcharge électrique).

B : défaillance du moteur.

C : défaillance du câble.

D : évènement observé (arrêt du système).

I.6. Construction d'un réseau bayésien

La construction d'un réseau bayésien constitue une étape essentielle dans la modélisation probabiliste d'un système. Elle consiste à représenter les relations de dépendance entre les différentes variables du système étudié afin de décrire son comportement en présence d'incertitudes. Cette étape joue un rôle important dans la qualité de l'inférence et la pertinence des résultats obtenus, notamment dans les applications liées au diagnostic, à l'analyse des risques et à la sûreté de fonctionnement. **[10]**

I.6.1. Les étapes de construction d'un réseau bayésien

La construction d'un réseau bayésien se déroule généralement en trois étapes principales. La première consiste à identifier les variables du système ainsi que leurs espaces d'états. La deuxième porte sur la définition de la structure du réseau, c'est-à-dire les relations de dépendance entre les variables. Enfin, la troisième étape concerne l'affectation des probabilités conditionnelles permettant de définir la loi de probabilité conjointe du modèle. Cette démarche progressive assure une représentation cohérente

du système et constitue la base de l'inférence probabiliste. **[10]**

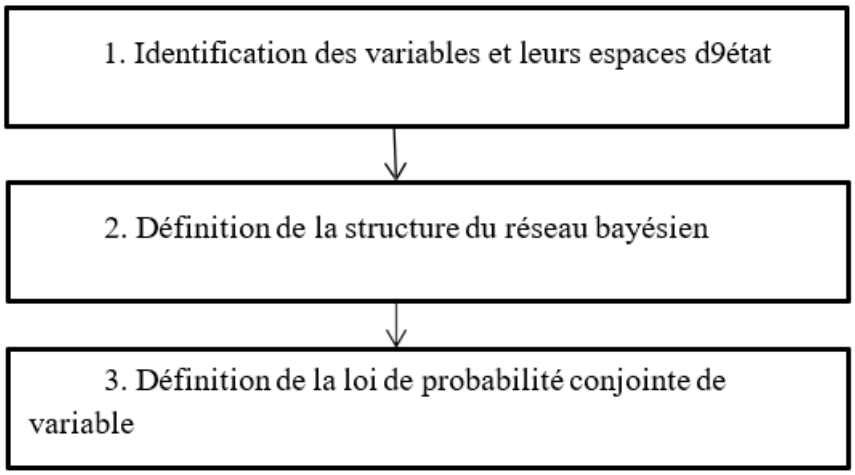


Figure 10 : Étapes de construction d'un réseau bayésien.

1. **Identification des variables et de leurs espaces d'états**

La première étape de la construction d'un réseau bayésien consiste à identifier les variables représentant le système étudié. Cette phase nécessite généralement l'intervention des experts afin de sélectionner les variables les plus significatives pour la modélisation. Ces variables peuvent correspondre à des états de fonctionnement, des défaillances, des causes, des symptômes ou des événements observés. **[10]**

Après l'identification des variables, il est nécessaire de définir leurs espaces d'états, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs possibles associées à chaque variable. Dans la plupart des réseaux bayésiens, les variables sont discrètes et possèdent un nombre limité d'états. Lorsque certaines variables sont continuées, elles peuvent être discrétisées en plusieurs intervalles afin de faciliter leur intégration dans le réseau bayésien. Toutefois, une discrétisation excessive peut augmenter la taille des tables de probabilités conditionnelles et compliquer les calculs probabilistes. **[10]**

2. **Définition de la structure du réseau bayésien**

La deuxième étape consiste à établir les relations de dépendance entre les variables identifiées. Cette phase permet de déterminer les influences existant entre les différents événements du système et de construire les liens orientés du réseau bayésien.

La structure du réseau est généralement définie à partir des connaissances d'experts, du retour d'expérience ou de données disponibles. Des échanges entre les spécialistes du domaine et le modélisateur sont souvent nécessaires afin d'obtenir une représentation cohérente du système étudié. **[10]**

Le réseau bayésien est représenté sous forme d'un graphe orienté acyclique dans lequel les nœuds représentent les variables et les arcs traduisent les relations de dépendance ou de causalité. La présence de boucles orientées n'est pas autorisée, car elle compromet la cohérence du modèle probabiliste. **[10]**

Lorsque des données suffisantes sont disponibles, certains outils permettent également de déterminer automatiquement la structure du réseau à partir des observations expérimentales. **[10]**

3. Définition de la loi de probabilité conjointe des variables

La dernière étape de construction d'un réseau bayésien consiste à définir les probabilités associées aux différentes variables du modèle. Cette étape permet de quantifier les relations de dépendance entre les nœuds à l'aide de probabilités conditionnelles.

Deux cas peuvent être distingués : lorsqu'une variable ne possède aucun parent, une probabilité a priori lui est attribuée ; lorsqu'une variable dépend d'autres variables parentes, sa probabilité est définie conditionnellement aux états de ces variables. **[10]**

Les probabilités utilisées dans le réseau peuvent être obtenues à partir de l'expertise humaine, de données expérimentales ou du retour d'expérience. Cependant, l'estimation de certaines probabilités peut être difficile lorsque les événements étudiés sont rares ou peu observés. **[10]**

Les logiciels de réseaux bayésiens permettent également d'ajuster automatiquement les probabilités conditionnelles à partir des données disponibles afin d'améliorer progressivement la précision du modèle.

II Inférence bayésienne

L'inférence bayésienne représente le mécanisme de raisonnement utilisé dans les réseaux bayésiens pour estimer la probabilité d'un événement à partir des informations disponibles. Elle repose sur les relations probabilistes entre les variables du réseau ainsi que sur le théorème de Bayes. Ce mécanisme permet de mettre à jour les probabilités des variables lorsqu'une nouvelle observation est introduite dans le réseau. Ainsi, l'inférence bayésienne facilite l'estimation des événements non observés à partir des données disponibles et des dépendances existant entre les variables. **[11]**

II.1. Rôle de l'inférence dans un réseau bayésien

Dans un réseau bayésien, l'inférence joue un rôle essentiel dans l'analyse et l'exploitation du modèle probabiliste. Elle permet de propager les informations à travers le réseau afin d'évaluer les probabilités associées aux différents événements. Grâce à ce mécanisme, il devient possible d'identifier les causes probables d'une défaillance, d'estimer la probabilité d'apparition d'un événement critique, de réaliser des opérations de diagnostic, d'aider à la prise de décision en présence d'incertitudes et de prédire l'évolution d'un système à partir des informations observées. **[11]**

L'inférence bayésienne constitue ainsi un outil important dans les domaines du diagnostic industriel, de la maintenance et de la sûreté de fonctionnement, où les informations disponibles sont souvent incomplètes ou incertaines. **[11]**

II.2. Inférence exacte

Il existe une relation étroite entre la structure graphique d'un réseau bayésien et sa représentation probabiliste, ce qui permet de transformer certains problèmes probabilistes en problèmes de graphes plus faciles à analyser. Cette propriété facilite l'exploitation des réseaux bayésiens dans les opérations de raisonnement et d'inférence probabiliste. **[11]**

L'inférence probabiliste dans les réseaux bayésiens consiste à calculer les probabilités a posteriori de certaines variables à partir d'informations observées. Autrement dit, lorsqu'un ensemble de variables observées est connu, il devient possible d'estimer la probabilité des états des autres variables du réseau en tenant compte des relations de dépendance existant entre elles. **[11]**

Parmi les méthodes d'inférence exacte les plus utilisées figure l'arbre de jonction, également appelé méthode JLO (Jensen, Lauritzen et Olesen). Cette méthode repose sur un mécanisme de propagation de messages entre les cliques du réseau afin de calculer les probabilités a posteriori des variables non observées. **[11]**

La méthode de l'arbre de jonction comprend généralement plusieurs étapes principales : la moralisation du graphe, la triangulation du graphe moral, la construction de l'arbre de jonction à partir des cliques obtenues, puis la propagation des messages entre ces cliques. **[11]**

Cette méthode permet de simplifier les calculs probabilistes dans les réseaux bayésiens complexes et d'améliorer l'efficacité des mécanismes d'inférence.

II.3. Inférence approximative

Lorsqu'un réseau bayésien comporte un grand nombre de variables ou de dépendances, les méthodes d'inférence exacte deviennent souvent difficiles à appliquer en raison de la complexité des calculs probabilistes et du temps de traitement nécessaire. Dans ce contexte, l'inférence approximative permet d'obtenir des estimations proches des probabilités réelles avec un coût de calcul plus faible. Elle rend possible le raisonnement probabiliste sur des réseaux complexes lorsque les méthodes exactes deviennent trop coûteuses à mettre en œuvre. Cette approche repose sur plusieurs techniques d'estimation, notamment la propagation de croyances, les méthodes de Monte Carlo et les approches variationnelles. Ces méthodes fournissent des résultats satisfaisants dans un délai raisonnable et facilitent l'exploitation des réseaux bayésiens de grande taille. **[11]**

III Apprentissage des Réseaux bayésiens

L'apprentissage des réseaux bayésiens vise à construire ou à améliorer un modèle probabiliste à partir de connaissances expertes et/ou de données observées. Il représente une étape fondamentale dans la modélisation des systèmes complexes, car il permet d'ajuster le réseau aux informations disponibles et d'optimiser la qualité des inférences réalisées. Selon les objectifs et la nature des données, l'apprentissage peut porter sur la structure du réseau, sur les paramètres probabilistes, ou sur les deux simultanément. Cette démarche renforce l'efficacité du réseau bayésien dans les tâches de diagnostic, de prédiction et d'aide à la décision dans un contexte incertain. **[11]**

III.1. Apprentissage des paramètres des réseaux bayésiennes

L'apprentissage des paramètres dans un réseau bayésien consiste à estimer les probabilités conditionnelles associées aux différents nœuds du réseau à partir des données disponibles. Cette étape permet de quantifier les relations de dépendance entre les variables du modèle probabiliste. **[11]**

Le principe de cette approche repose sur l'exploitation d'observations expérimentales ou de données historiques afin d'évaluer les probabilités correspondant aux différents états des variables. Les valeurs obtenues sont ensuite intégrées dans les tables de probabilités conditionnelles du réseau bayésien. **[11]**

Lorsque la structure du réseau est déjà connue, l'apprentissage porte uniquement sur les

paramètres probabilistes. Dans ce cas, seules les probabilités associées aux relations entre les variables sont ajustées afin d'améliorer la précision du modèle.

Cette méthode permet d'adapter progressivement le réseau bayésien au comportement réel du système étudié et d'améliorer la qualité des opérations d'inférence, de diagnostic et de prédiction dans des environnements incertains. **[11]**

III.2. Apprentissage à partir de données complètes et incomplètes

L'apprentissage des paramètres dans un réseau bayésien consiste à estimer les probabilités conditionnelles associées aux différents nœuds à partir des données disponibles. Lorsque toutes les variables nécessaires sont observées, cette estimation repose généralement sur une approche statistique fondée sur les fréquences observées dans l'échantillon d'apprentissage. Cette méthode, appelée approche fréquentiste ou maximum de vraisemblance, permet d'estimer la probabilité d'un événement à partir de son nombre d'occurrences dans les données. Elle est simple à mettre en œuvre lorsque la quantité d'informations est suffisante, mais elle peut devenir moins fiable lorsque le nombre de paramètres est élevé ou lorsque certaines configurations n'apparaissent pas dans l'échantillon. Dans ce cas, des approches bayésiennes, telles que le maximum a posteriori et l'espérance a posteriori, permettent d'intégrer des connaissances a priori dans l'estimation des paramètres. **[11]**

Lorsque les données sont incomplètes ou partiellement observées, l'apprentissage devient plus délicat, car certaines valeurs nécessaires à l'estimation des probabilités conditionnelles sont absentes. L'algorithme EM (Expectation-Maximization) est alors souvent utilisé pour traiter ce type de situation. Il alterne une phase d'estimation des valeurs manquantes et une phase de mise à jour des paramètres jusqu'à convergence. Cette méthode permet d'obtenir des estimations satisfaisantes malgré l'absence partielle de certaines données. **[11]**

III.3. Apprentissage de la structure des réseaux bayésiens

- **Principe :**

L'apprentissage de la structure des réseaux bayésiens consiste à déterminer les relations de dépendance entre les différentes variables du modèle. Cette étape permet d'identifier les liens qui existent entre les variables lorsqu'une variable influence l'état ou le comportement d'une autre. **[14]**

Dans la majorité des applications, la structure du réseau bayésien est définie à partir des

connaissances et de l'expérience des experts du domaine étudié. Des échanges successifs entre les experts et le modélisateur sont alors nécessaires afin d'obtenir une représentation cohérente des interdépendances existant entre les variables du système.

Dans d'autres situations, la structure du réseau peut être apprise automatiquement à partir des données disponibles, qu'elles soient complètes ou incomplètes. Cette approche repose sur des méthodes d'apprentissage plus complexes, qui permettent d'analyser les relations statistiques entre les variables. **[14]**

L'apprentissage automatique de la structure devient particulièrement difficile lorsque le nombre de variables et la taille des données augmentent, car le nombre de structures possibles peut être très important. Pour réduire cette complexité, certaines approches s'appuient sur des stratégies d'optimisation visant à limiter l'espace de recherche et à améliorer l'efficacité de l'apprentissage. **[14]**

Ainsi, l'apprentissage de la structure contribue à améliorer la représentation des systèmes complexes et à renforcer les capacités d'analyse, de diagnostic et de prédiction des réseaux bayésiens. **[14]**

III.3.1. Détermination de la structure par un expert

La structure d'un réseau bayésien peut être définie à partir de l'expertise humaine. Dans ce cas, la construction du modèle se fait en plusieurs étapes, avec l'appui de spécialistes du domaine afin de représenter au mieux les relations entre les variables du système étudié. **[14]**

- **Identification des variables**

La première étape consiste à repérer les variables importantes du système. Avec l'aide des experts, on détermine ensuite les différents états possibles de chaque variable, c'est-à-dire les valeurs qu'elles peuvent prendre dans le modèle. **[14]**

- **Construction du réseau [14]**

Une fois les variables identifiées, il faut établir les relations entre elles. L'objectif est de montrer quelles variables influencent d'autres variables, afin de construire un graphe orienté sans cycle, comme l'exige un réseau bayésien. Il est important de distinguer une relation de causalité directe d'une causalité indirecte. Dans le premier cas, l'influence est immédiate entre deux variables. Dans le second, l'effet passe par une ou plusieurs variables intermédiaires. De plus, le fait que deux variables soient corrélées ne signifie pas forcément qu'il existe une relation de cause à effet entre elles.

- **Définition des probabilités**

La dernière étape consiste à associer des probabilités aux variables du réseau. Lorsqu'une variable n'a pas de parent, on lui attribue une probabilité marginale. Lorsqu'elle dépend d'autres variables, ses probabilités sont exprimées sous forme conditionnelle. Dans la pratique, les experts peuvent parfois avoir du mal à estimer certaines probabilités, surtout lorsque les événements sont rares ou peu observés. Dans ce cas, on peut recourir à des estimations qualitatives ou à des lois simplifiées, comme une loi uniforme, pour compléter le modèle. **[14]**

III.3.2. Détermination de la structure à partir des données

La structure d'un réseau bayésien peut aussi être apprise automatiquement à partir des données disponibles. Cette approche repose sur l'analyse des relations statistiques entre les variables afin de construire un réseau qui reflète au mieux le comportement réel du système. **[14]**

- **Détermination à partir de données complètes**

Lorsque les données sont complètes, plusieurs méthodes permettent de déterminer la structure du réseau. Certaines s'appuient sur des tests d'indépendance entre les variables, d'autres explorent plusieurs structures possibles pour retenir celle qui obtient le meilleur score, et d'autres encore combinent ces deux approches. **[14]**

- **Détermination à partir de données incomplètes**

Lorsque certaines données manquent, l'apprentissage devient plus délicat, car il faut estimer les relations entre variables malgré les informations absentes. Dans ce cas, des méthodes itératives permettent d'estimer progressivement les valeurs manquantes et d'ajuster le réseau jusqu'à obtenir une solution stable. **[14]**

IV Les avantages et les inconvénients des réseaux bayésiens

IV.1. Avantage des réseaux bayésiens [18]

- Les réseaux bayésiens permettent de représenter et de gérer les incertitudes dans les systèmes complexes ;
- Leur représentation graphique facilite la compréhension des relations de dépendance et de causalité entre les variables ;
- Ils permettent d'intégrer simultanément les connaissances d'experts et les données expérimentales ;

- Ils offrent des capacités d'inférence, de diagnostic et de prédiction dans des environnements incertains ;
- Ils permettent de mettre à jour les probabilités lorsqu'une nouvelle information devient disponible ;
- Ils sont robustes face aux données incomplètes ou partiellement observées ;
- Une même structure peut être utilisée pour différents types d'analyse, tels que le diagnostic, l'analyse de sensibilité ou l'évaluation des risques ;
- Ils facilitent l'aide à la décision grâce à leurs mécanismes de raisonnement probabiliste ;
- Les algorithmes d'inférence associés aux réseaux bayésiens permettent d'effectuer efficacement les calculs probabilistes lorsque la structure du réseau est bien définie.

IV.2. Inconvénients des réseaux bayésiens [18]

- La construction manuelle d'un réseau bayésien peut nécessiter beaucoup de temps et l'intervention d'experts spécialisés ;
- L'estimation des probabilités conditionnelles peut être difficile lorsque les données disponibles sont insuffisantes ;
- Les résultats obtenus dépendent fortement de la qualité des données et des hypothèses utilisées ;
- Les calculs probabilistes peuvent devenir complexes lorsque le réseau comporte un grand nombre de variables ;
- Les variables continues nécessitent souvent une discrétisation avant leur intégration dans le réseau ;
- Certaines méthodes d'inférence peuvent présenter un coût de calcul important pour les réseaux de grande taille ;
- L'expertise humaine seule peut parfois conduire à des estimations probabilistes imprécises ou subjectives.

V Domaines d'application des réseaux Bayésiens

Grâce à leur capacité à représenter les dépendances probabilistes et à gérer les incertitudes, les réseaux bayésiens trouvent aujourd'hui des applications dans plusieurs domaines scientifiques et industriels. Leur aptitude à effectuer des raisonnements probabilistes et à exploiter des informations incomplètes en fait des outils

particulièrement adaptés aux problèmes de diagnostic, de prédiction et d'aide à la décision. **[12]**

Les réseaux bayésiens sont ainsi utilisés dans différents secteurs tels que la médecine, l'industrie, la défense, la finance et la sûreté de fonctionnement. **[12]**

- **Domaine médical**

Les réseaux bayésiens ont d'abord été largement utilisés dans le domaine du diagnostic médical. Ils permettent d'intégrer les connaissances des experts et les données statistiques afin d'aider au diagnostic, à l'évaluation des risques et à la prise de décision médicale. Ils sont particulièrement adaptés aux situations où l'information est incomplète, incertaine ou imprécise. **[12]**

- **Domaine industriel**

Dans le domaine industriel, les réseaux bayésiens sont utilisés pour le diagnostic des défaillances, l'analyse des risques, la maintenance prédictive et la sûreté de fonctionnement. Ils permettent d'évaluer l'état d'un système complexe et d'anticiper l'apparition de pannes à partir des observations disponibles. **[12]**

- **Domaine de la défense**

Les réseaux bayésiens sont également employés dans les systèmes de défense et de fusion de données. Leur capacité à traiter des informations incertaines issues de plusieurs sources en fait un outil pertinent pour l'identification de menaces et l'aide à la décision dans des environnements complexes. Par exemple, l'identité d'un navire peut être estimée à partir de plusieurs indices observés, tels que sa signature sonar, sa vitesse ou sa trajectoire. **[12]**

- **Domaine bancaire et financier**

Dans le domaine bancaire et financier, les réseaux bayésiens sont utilisés pour l'analyse des risques, la détection de fraudes, le scoring financier et l'aide à la décision. Leur capacité à modéliser l'incertitude et à mettre à jour les probabilités en fonction de nouvelles informations représente un avantage important dans ce type d'applications. **[12]**

VI- Interprétation de l'ADD en RB pour l'analyse des risques

Introduction

L'arbre de défaillance est une méthode largement utilisée dans le domaine de la sûreté de fonctionnement pour analyser les causes pouvant conduire à un événement redouté. Cette approche permet de représenter les relations logiques entre les différentes

défaillances d'un système à l'aide d'une structure arborescente. Toutefois, malgré son efficacité dans l'identification des scénarios de défaillance, l'arbre de défaillance présente certaines limites, notamment dans la prise en compte des dépendances complexes et des incertitudes probabilistes. **[13]**

Afin d'améliorer l'analyse des risques, les réseaux bayésiens peuvent être utilisés pour transformer l'arbre de défaillance en un modèle probabiliste orienté. Cette approche permet d'intégrer les relations de causalité, de représenter les dépendances entre les événements et d'effectuer des raisonnements probabilistes plus avancés grâce aux mécanismes d'inférence bayésienne. **[13]**

L'interprétation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien constitue ainsi une méthode efficace pour renforcer les capacités de diagnostic, de prédiction et d'aide à la décision dans les systèmes complexes soumis à des incertitudes. **[13]**

VI.1. Transformation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien

La transformation d'un arbre de défaillance en réseau bayésien repose sur un algorithme de conversion qui permet de représenter la structure logique de l'arbre sous forme de modèle probabiliste orienté. Cette approche considère généralement des arbres de défaillance composés de portes logiques « ET », « OU » et « k-sur-n ».

Dans le réseau bayésien obtenu, chaque variable représente l'état d'un composant ou d'un événement du système. Les variables sont souvent binaires et peuvent prendre deux états : « Faux (F) » lorsque le composant fonctionne correctement et « Vrai (V) » lorsqu'il est défaillant. **[13]**

L'algorithme de transformation permet ainsi d'établir les relations de dépendance entre les différents événements du système tout en conservant la structure causale de l'arbre de défaillance. Cette méthode peut également être adaptée à des structures plus complexes selon les caractéristiques du système étudié. **[13]**

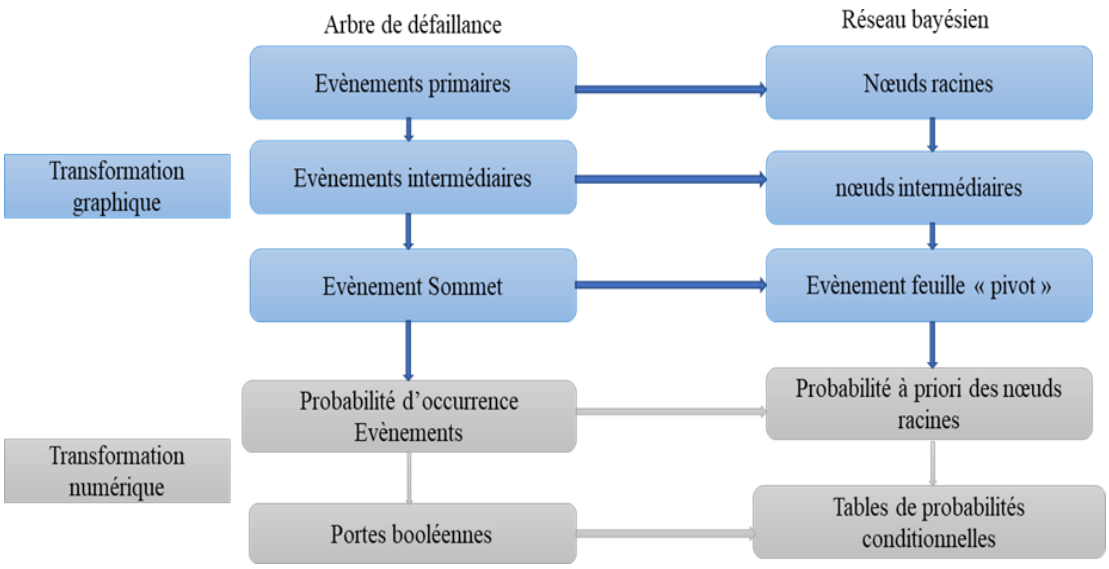


Figure 11 : Transformation depuis l'arbre des défaillances au réseau bayésien par l'algorithme de conversion

VI.2. Transformation qualitative de l'ADD vers le réseau bayésien

La transformation qualitative d'un arbre de défaillance vers un réseau bayésien consiste à convertir la structure graphique de l'arbre en un graphe probabiliste orienté tout en conservant les relations de causalité entre les événements. **[13]**

Dans cette transformation : **[13]**

- Chaque événement de base de l'arbre de défaillance est représenté par un nœud racine dans le réseau bayésien ;
- Chaque événement intermédiaire est transformé en un nœud intermédiaire du réseau
- Les portes logiques de l'arbre de défaillance sont représentées par des nœuds traduisant les relations de dépendance entre les événements ;
- L'événement sommet de l'arbre correspond généralement au nœud principal représentant la défaillance du système.
- Les relations entre les différents nœuds du réseau bayésien sont établies conformément à la structure logique de l'arbre de défaillance. Cette transformation permet de conserver l'organisation causale du système tout en introduisant les mécanismes probabilistes propres aux réseaux bayésiens

Les figures 12 et 13 ci-dessous présentent le passage de la structure d'un ADD simple vers la structure du RB.

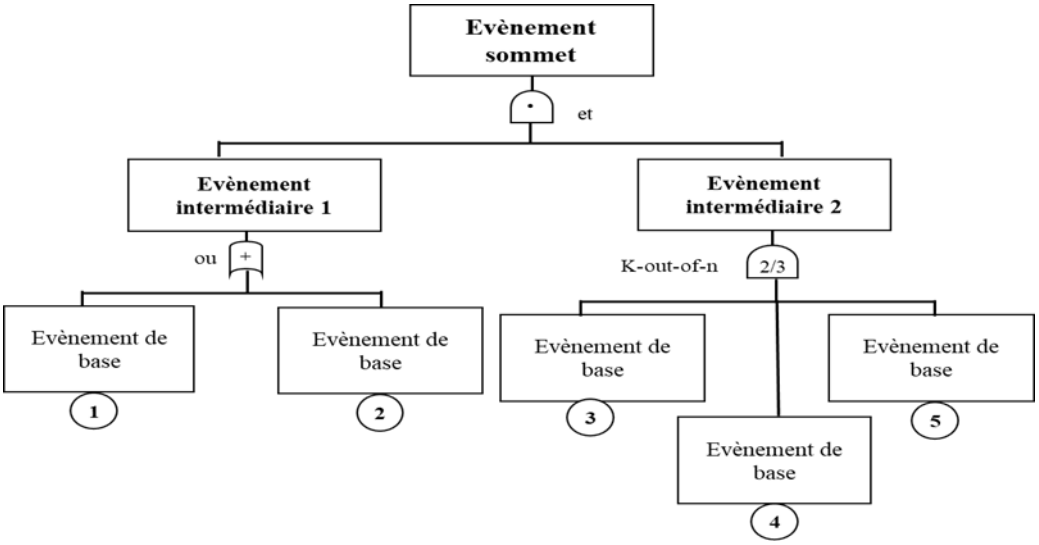


Figure 12 : Exemple de Structure d'un arbre de défaillance

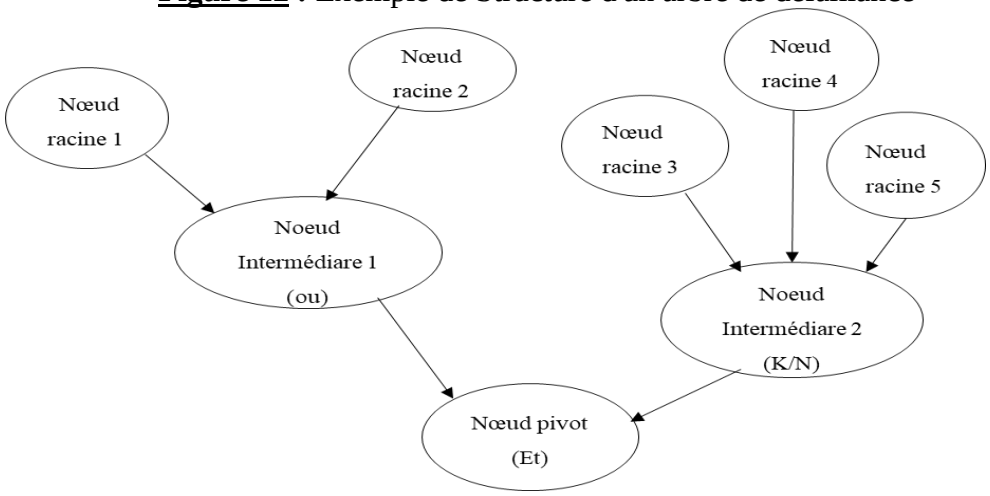


Figure 13 : Structure du réseau bayésien crée à partir de la Figure 12

VI.3. Transformation quantitative de l'ADD vers le RB

La transformation quantitative d'un arbre de défaillance vers un réseau bayésien consiste à associer des probabilités aux différents nœuds du réseau afin de représenter le comportement probabiliste du système étudié. **[13]**

Dans cette approche, les événements de base de l'arbre de défaillance sont généralement associés à des probabilités a priori représentant les probabilités de défaillance des composants du système. **[13]**

Les événements intermédiaires et l'événement sommet sont ensuite définis à l'aide de tables de probabilités conditionnelles permettant de représenter les relations logiques entre les différents événements. **[13]**

Les portes logiques de l'arbre de défaillance, telles que les portes « ET » et « OU », sont

converties en relations probabilistes dans le réseau bayésien. Les tables de probabilités conditionnelles traduisent ainsi le comportement logique des portes tout en intégrant les mécanismes probabilistes propres aux réseaux bayésiens. **[13]**

Cette transformation permet d'effectuer des calculs probabilistes plus avancés et d'améliorer l'analyse des risques, le diagnostic des défaillances et l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes. **[13]**

Tableau 03 : Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique Ou

Nœud racine 1	Nœud racine 2	P (Nœud Intermédiaire 1 [Or]=1)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tableau 04 : Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique K/N

Nœud racine 3	Nœud racine 4	Nœud racine 5	P (Nœud Intermédiaire 2 [K/N]=1)
0	0	1	0
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	1	1

Tableau 05 : Table de probabilité conditionnelle associée à la porte logique ET

Nœud Intermédiaire 2 [K/N]	Nœud Intermédiaire 1 [Or]	P (Nœud pivot [ET]=1)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Conclusion

Les réseaux bayésiens constituent une méthode probabiliste performante pour la modélisation et l'analyse des systèmes complexes soumis à des incertitudes. Grâce à leur représentation graphique sous forme de graphe orienté acyclique, ils permettent de décrire les relations de dépendance et de causalité entre les variables d'un système.

Dans ce chapitre, les principaux concepts liés aux réseaux bayésiens ont été présentés, notamment leur structure, les mécanismes d'inférence probabiliste ainsi que les méthodes d'apprentissage des paramètres et de la structure. Les avantages des réseaux bayésiens dans les domaines du diagnostic, de la prédiction, de l'analyse des risques et de la sûreté de fonctionnement ont également été mis en évidence.

Par ailleurs, leur intégration avec les arbres de défaillance permet d'améliorer l'analyse probabiliste des systèmes industriels en tenant compte des dépendances complexes, des données incomplètes et des mécanismes de mise à jour des probabilités. Cette approche renforce ainsi les capacités d'aide à la décision et d'évaluation des risques dans des environnements incertains.

Les réseaux bayésiens apparaissent donc comme un outil particulièrement adapté aux études de sûreté de fonctionnement et comme une approche efficace pour améliorer le diagnostic, la maintenance et l'analyse de fiabilité des systèmes complexes.

Chapitre IV
Étude de cas

I. Introduction

Après avoir présenté les notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement ainsi que les méthodes d'analyse basées sur l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens, il est nécessaire d'appliquer ces approches à un système industriel réel afin d'évaluer leur efficacité dans l'identification et l'analyse des risques.

Dans cette étude, le système retenu est le Sideboom, un engin largement utilisé dans les travaux de construction des pipelines pour le levage, le transport, le positionnement et la pose des canalisations. Cet équipement joue un rôle essentiel dans les opérations de manutention des tubes et contribue directement à la qualité et à la sécurité des travaux réalisés sur chantier.

L'objectif de ce chapitre est de présenter le système étudié, d'analyser sa structure et son fonctionnement, puis d'identifier les défaillances susceptibles d'affecter ses performances. Une modélisation par arbre de défaillance sera ensuite réalisée afin de représenter les différentes causes pouvant conduire à un événement indésirable. Enfin, cette modélisation sera interprétée sous forme de réseau bayésien afin d'améliorer l'analyse des risques et l'aide à la décision.

II.Présentation de site

II.1 Description de l'entreprise

L'entreprise Cosider a été créée en janvier 1979 par la Société Nationale de l'Acier et le groupe danois Christiani & Nielsen sous forme d'une société mixte en 1982. Ensuite, la part du partenaire danois a été rachetée par la Société Nationale de l'Acier. Depuis, Cosider est devenue une entreprise publique nationale sous la tutelle du Ministère de l'Industrie Lourde en 1984. En octobre 1989, Cosider a été transformée en société par actions. Le groupe Cosider est aujourd'hui composé de plusieurs filiales. Cosider Canalisations est l'une des filiales du groupe créée le 31 décembre 2003 avec un capital de 750.000.000 DA. Le projet du pôle C57 a été lancé en 2025.

II.2. Activités principales et secondaires de l'entreprise

- Construction de la base vie
- Ouverture des routes
- Ouverture des tranchées
- Réception et revêtement des conduites

- Soudage
- Enrobage
- Pose des conduites dans les tranchées
- Traversées spéciales des canalisations et des routes
- Travaux de génie civil
- Remblayage
- Installations centrales
- Essais hydrauliques
- Remise des lieux à leur état initial

II.3. Localisation

La base vie principale du pôle C57 est située dans la commune de Mjera, wilaya de Djelfa, dans une région semi-aride. Les températures peuvent atteindre 42°C en été et 0°C en hiver.

Base vie principale (Mjera) :

- Wilaya : Djelfa
- Daïra : Aïn El Ibel
- Commune : Medjbara

Limites géographiques : la base vie principale est située à 32 km au sud de la wilaya de Djelfa.

- Nord : terres agricoles
- Est : terres agricoles
- Ouest : route nationale n°189
- Sud : terres agricoles

II.4. Valeur financière de l'entreprise

La valeur financière de Cosider Canalisations est estimée à 4.000.000.000 dinars algériens.

II.5. Caractéristiques générales et spécifiques de l'entreprise

Méthode de construction : à l'exception des points de ventilation et du magasin, la base a été construite sous forme de cabines.

Zone 1	Zone 2
Centre de surveillance	Parc de matériel
Parking des véhicules Cosider et du propriétaire du projet	Bureau du chef du parc
Clinique	Atelier mécanique
Annexe du département du personnel	Réservoir d'essence
Bureau de sécurité interne	Atelier de soudage
Administration du projet	Fosse de maintenance et de graissage
Résidence du propriétaire du projet	Générateurs électriques
Résidence des cadres – contrôle – exécution	Magasin
Cuisine et salle de restauration Cosider et propriétaire du projet	Zone de stockage du gaz 02
Zone de stockage du gaz	Abri de stockage des sources radioactives
Mosquée	Zone de stockage des déchets (roues, batteries, déchets métalliques et non métalliques)

Figure 14 : organisastion generale de l'entreprise et des sous-systemes.

II.6. Caractéristiques à caractère spécifique

Zones	Points sensibles	Produits et matières sensibles
Zone 1 Base vie	Zone de stockage du gaz	Propane
Zone 2 Parc matériel	Générateurs électriques	Courant électrique / essence
	Station de lavage et vidange	Huiles et graisses mécaniques
	Atelier de soudage	Gaz acétylène et oxygène
	Magasin	Acétylène / peinture / graisse
	Réservoir carburant	Essence
	Zone de stockage des déchets	Huiles usées / batteries usées / roues usées / déchets métalliques
	Abri de rayonnement	Sources radioactives

Figure 15 : Structure fonctionnelle des defaillances du système industriel.

Des points sensibles sont répartis sur la surface du centre, parmi eux :

- Réservoir de carburant
- Zone de stockage du gaz (gaz propane)
- Générateur électrique
- Transformateur électrique
- Abri des rayonnements

- Nombre de travailleurs : 450
- Taux des cadres : environ 12%
- Capacité d'accueil de l'entreprise : 50 personnes
- Utilisateurs : /
- Visiteurs : /
- Autres : /
- Travailleurs étrangers : inexistants
- Capacité de production : dépend de l'avancement des travaux du projet

II.7. Importance de l'entreprise

L'entreprise possède un caractère vital et stratégique pour la réalisation de l'extension du gazoduc principal GG1 reliant Hassi R'mel à la station SC3 de Medjbara.

III. Présentation du système Sideboom

III.1.Définition du Sideboom

Le Sideboom est un engin de levage spécialisé utilisé principalement dans les travaux de construction et d'installation des pipelines. Il est conçu pour soulever, transporter, déplacer et maintenir les conduites dans une position stable durant les différentes opérations de pose et de soudage. Grâce à sa flèche latérale et à son système de levage, il permet la manutention de charges lourdes tout en assurant une grande précision de positionnement.

Le Sideboom est généralement monté sur un tracteur à chenilles lui permettant de circuler sur des terrains difficiles et accidentés. Il est largement utilisé dans les projets de transport des hydrocarbures, du gaz naturel et de l'eau, où les conduites doivent être manipulées avec sécurité et précision.

Lors des opérations de construction des pipelines, le Sideboom intervient dans plusieurs étapes importantes telles que le levage des tubes, leur alignement avant soudage, leur

déplacement sur le chantier ainsi que leur mise en place dans les tranchées. Son utilisation contribue à améliorer la productivité des travaux, à réduire les efforts manuels et à renforcer la sécurité des opérations de manutention.
En raison de son rôle essentiel dans les projets de canalisations, le Sideboom constitue un système industriel dont la fiabilité et la sécurité de fonctionnement sont particulièrement importantes. Toute défaillance de cet équipement peut entraîner des retards de chantier, des dommages matériels ou des accidents pouvant affecter les opérateurs et les installations environnantes.

Le Sideboom est un engin de levage spécialisé utilisé principalement dans les travaux de construction et d'installation des pipelines. Il est conçu pour soulever, transporter, déplacer et maintenir les conduites dans une position stable durant les différentes opérations de pose et de soudage. Grâce à sa flèche latérale et à son système de levage, il permet la manutention de charges lourdes tout en assurant une grande précision de positionnement.
Le Sideboom est généralement monté sur un tracteur à chenilles lui permettant de circuler sur des terrains difficiles et accidentés. Il est largement utilisé dans les projets de transport des hydrocarbures, du gaz naturel et de l'eau, où les conduites doivent être manipulées avec sécurité et précision.
Lors des opérations de construction des pipelines, le Sideboom intervient dans plusieurs étapes importantes telles que le levage des tubes, leur alignement avant soudage, leur déplacement sur le chantier ainsi que leur mise en place dans les tranchées. Son utilisation contribue à améliorer la productivité des travaux, à réduire les efforts manuels et à renforcer la sécurité des opérations de manutention.
En raison de son rôle essentiel dans les projets de canalisations, le Sideboom constitue un système industriel dont la fiabilité et la sécurité de fonctionnement sont particulièrement importantes. Toute défaillance de cet équipement peut entraîner des retards de chantier, des dommages matériels ou des accidents pouvant affecter les opérateurs ou les installations environnantes



Figure 16 : Vue générale d'un Sideboom utilisé pour les travaux de levage et de pose des canalisations.

III.2 Description technique du Sideboom

Le Sideboom est un engin de levage spécialement conçu pour les travaux de manutention et de pose des canalisations. Sa conception lui permet d'évoluer sur des terrains difficiles tout en assurant la stabilité nécessaire au levage de charges importantes.

Le système est constitué de plusieurs composants principaux assurant son fonctionnement :

- **Le moteur diesel** : il fournit l'énergie nécessaire au déplacement de la machine et au fonctionnement des différents organes mécaniques et hydrauliques.
- **Le châssis** : il constitue la structure porteuse de l'ensemble des équipements du Sideboom et assure la rigidité de la machine.
- **La cabine de conduite** : elle permet à l'opérateur de contrôler les déplacements et les opérations de levage en toute sécurité.
- **La flèche latérale (boom)** : elle supporte le système de levage et permet la manutention des conduites.
- **Le treuil** : il assure l'enroulement et le déroulement du câble de levage.
- **Les câbles de levage** : ils transmettent l'effort de levage entre le treuil et la charge manipulée.

- **Le crochet** : il constitue l'organe de liaison entre le câble et la conduite à soulever.
- **Le contrepoids** : il garantit la stabilité de la machine lors des opérations de levage.
- **Les chenilles** : elles assurent la mobilité du Sideboom sur les terrains accidentés.
- **Le système hydraulique** : il commande les mouvements de levage et contribue au bon fonctionnement de l'équipement.

L'ensemble de ces composants fonctionne de manière coordonnée afin d'assurer le levage, le déplacement, le positionnement et la pose des canalisations dans des conditions optimales de sécurité et de performance.

III.3.Principe fonctionnement de sideboom

Le Sideboom intervient principalement dans les opérations de transport, de levage, d'alignement et de pose des canalisations lors de la construction des pipelines. Son fonctionnement repose sur la coordination entre le système de propulsion, le système hydraulique, le treuil, les câbles de levage et la flèche latérale.

Au début de l'opération, le Sideboom est positionné à proximité de la conduite à manipuler. Le crochet est fixé à la canalisation à l'aide d'équipements de levage appropriés. Le treuil actionne ensuite les câbles afin de soulever la conduite à une hauteur suffisante tout en maintenant son équilibre.

Une fois la conduite levée, le Sideboom la transporte ou la maintient dans une position stable afin de permettre son alignement avec les autres tronçons du pipeline. Cette étape est essentielle pour garantir la qualité des opérations de soudage et la continuité géométrique de la canalisation.

Après l'alignement, la conduite est maintenue en position pendant les différentes étapes de préparation, de préchauffage et de soudage. Le Sideboom assure ainsi la stabilité de la charge jusqu'à la fin de l'opération. Une fois les travaux terminés, la conduite est déposée à l'emplacement prévu ou mise en place dans la tranchée selon les exigences du chantier.

Le bon fonctionnement du Sideboom dépend de l'état de ses composants mécaniques,

hydrauliques et de levage, ainsi que du respect des consignes de sécurité par les opérateurs.

IV- Analyse fonctionnelle du Sideboom

L'analyse fonctionnelle constitue une étape essentielle dans l'étude d'un système industriel. Elle permet d'identifier les fonctions assurées par le système ainsi que les interactions qu'il entretient avec son environnement. Cette approche facilite la compréhension du fonctionnement global du Sideboom et met en évidence les fonctions nécessaires à la réalisation de sa mission principale.

L'objectif de cette analyse est de déterminer les fonctions de service et les contraintes auxquelles le Sideboom doit répondre afin d'assurer le transport, le levage et la pose des canalisations dans des conditions optimales de sécurité et de performance.

IV.1. Bête à cornes du Sideboom

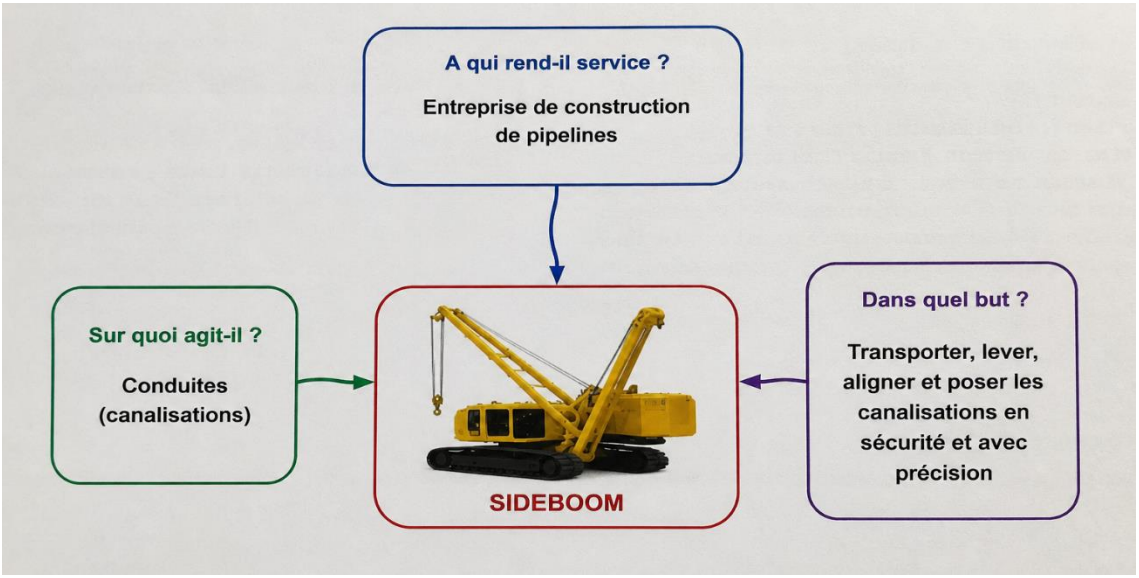


Figure 17 : Bête à cornes du Sideboom.

IV.2 Fonctions principales et contraintes du Sideboom

Fonctions	Désignation
Fonctions principales (FP)	
FP1	Soulever la conduite
FP2	Transporter la conduite
FP3	Maintenir la conduite
FP4	Positionner la conduite (alignement et pose)
Fonctions contraintes (FC)	
FC1	Assurer la sécurité du personnel
FC2	Résister aux conditions du chantier (terrain difficile, intempéries, poussière, etc.)
FC3	Supporter la charge de la conduite
FC4	Respecter les exigences réglementaires et normatives

Figure 18 : Fonctions principales et contraintes du Sideboom

IV.3 Diagramme pieuvre du Sideboom

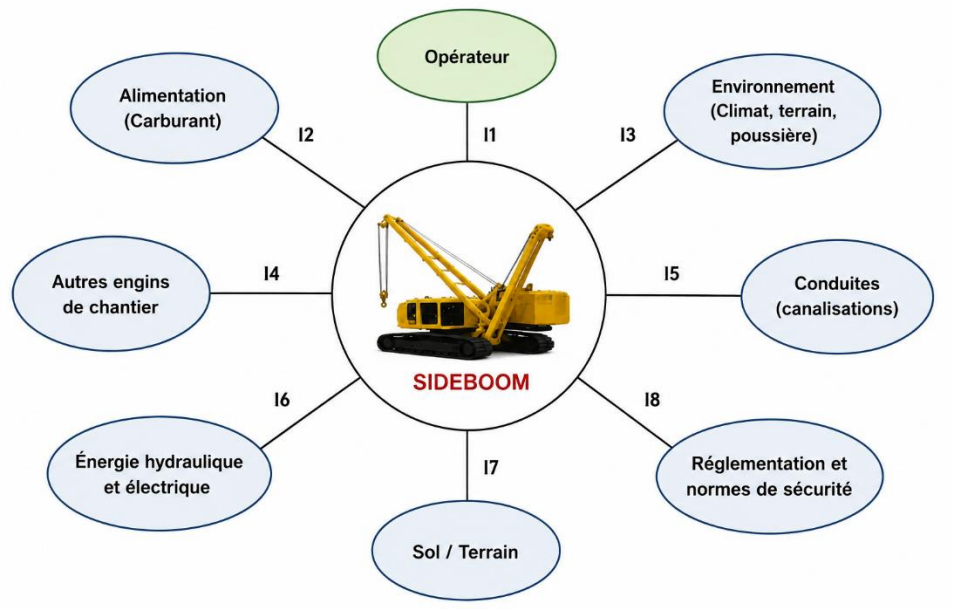


Figure 19 : Diagramme pieuvre du Sideboom

IV.4. Analyse fonctionnelle

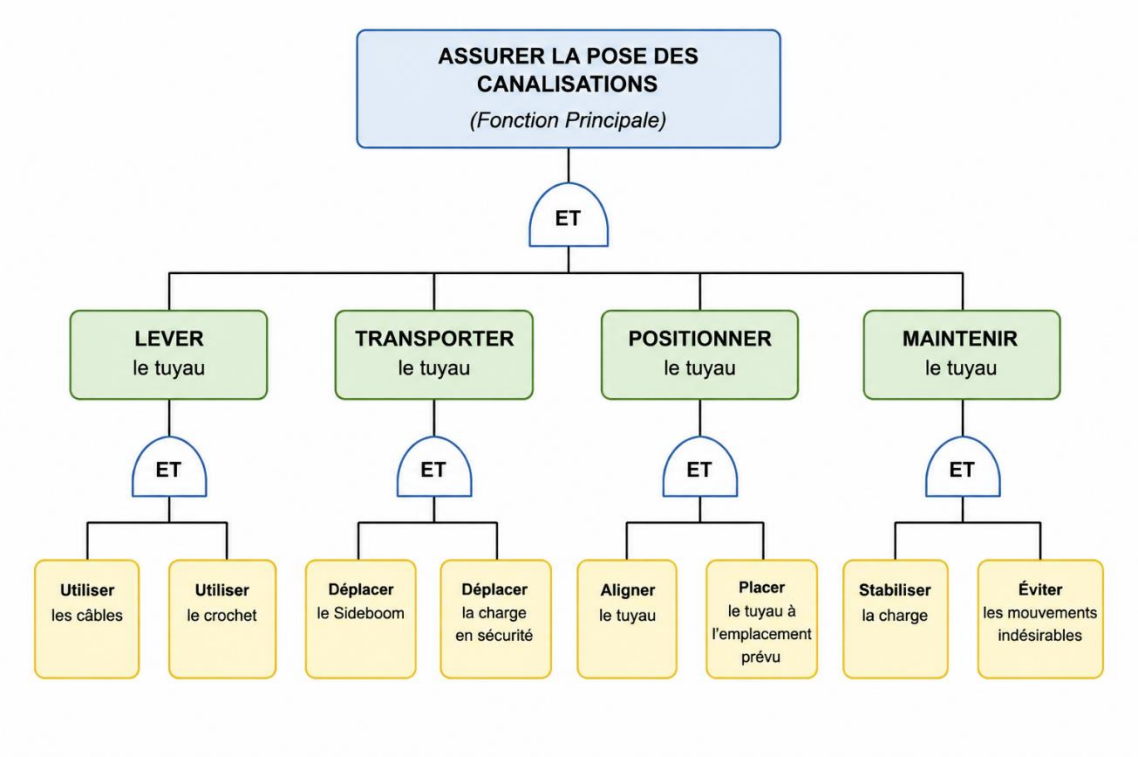


Figure 20 : Analyse fonctionnelle de Sidebom

V. Analyse structurelle du Sideboom

L'analyse structurelle consiste à identifier les différents composants constituant le Sideboom ainsi que leurs relations fonctionnelles. Cette analyse permet de mieux comprendre l'architecture du système et de localiser les éléments susceptibles d'être à l'origine d'une défaillance.

Le Sideboom est composé de plusieurs sous-systèmes mécaniques, hydrauliques et de commande qui assurent conjointement les opérations de levage, de transport et de positionnement des canalisations. Le bon fonctionnement de chacun de ces éléments est indispensable pour garantir la sécurité et l'efficacité des opérations réalisées sur le chantier.

L'identification des composants du Sideboom constitue une étape préalable à l'analyse des défaillances et à la construction de l'arbre de défaillance qui sera développé dans les sections suivantes.

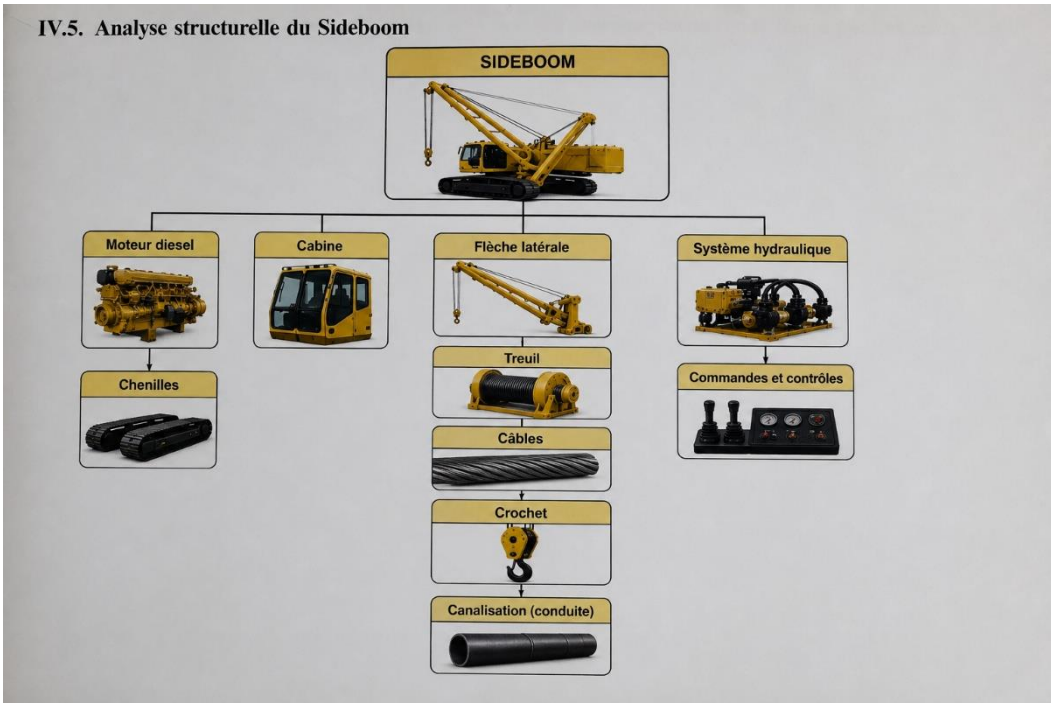


Figure 21 : Analyse structurelle du Sideboom.

VI- Activité du système Sideboom

Le Sideboom intervient dans les travaux de construction des pipelines afin d'assurer le levage, le transport, l'alignement et le maintien des canalisations durant les opérations de soudage et de pose. Son rôle est essentiel pour garantir la sécurité des opérations et la qualité de l'assemblage des conduites.

L'activité du Sideboom se déroule généralement selon les étapes suivantes :

VI.1. Préparation de la conduite

Avant toute opération de levage, la conduite est inspectée afin de vérifier son état général et la conformité des équipements de manutention utilisés. Les câbles et les crochets sont également contrôlés afin de garantir leur aptitude au levage.

VI.2. Levage de la conduite

Le crochet est fixé à la canalisation puis le treuil actionne les câbles afin de soulever progressivement la charge. Cette opération doit être réalisée en respectant les limites de capacité de la machine.

VI.3. Transport et déplacement

Une fois la conduite levée, le Sideboom assure son déplacement ou son maintien selon les besoins du chantier. L'opérateur contrôle la stabilité de la charge durant toute l'opération.

VI.4. Alignement de la conduite

La canalisation est positionnée avec précision afin de permettre son alignement avec le

tronçon précédent. Cette étape est essentielle pour assurer la qualité du soudage.

VI.5. Maintien pendant le soudage

Le Sideboom maintient la conduite dans la position souhaitée pendant les opérations de préchauffage, de soudage et de contrôle.

VI.6. Contrôle et pose finale

Après validation des opérations de soudage, la conduite est déposée à son emplacement définitif ou mise en place dans la tranchée conformément aux exigences du projet.

VII-Définition de l'événement redouté

Dans toute étude de sûreté de fonctionnement, il est nécessaire d'identifier l'événement redouté qui constitue le point de départ de l'analyse des défaillances. Cet événement correspond à une situation indésirable susceptible d'engendrer des conséquences sur les personnes, les équipements ou le déroulement des opérations.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse porte sur les opérations de levage, de transport, d'alignement et de pose des canalisations réalisées à l'aide du Sideboom. Ces opérations impliquent la manutention de charges importantes et nécessitent une coordination rigoureuse entre l'équipement et l'opérateur.

L'événement redouté retenu pour cette étude est :

« Échec du transport et de la pose des canalisations »

Cet événement peut résulter de plusieurs causes liées à des défaillances techniques, des erreurs humaines ou des conditions d'exploitation défavorables. Son apparition peut entraîner l'arrêt des travaux, des dommages matériels, la détérioration des conduites ainsi que des risques pour la sécurité du personnel présent sur le chantier.

VII.1. Scénario de l'événement redouté

Lors d'une opération de levage et de positionnement d'une canalisation, le Sideboom soulève la charge à l'aide de sa flèche latérale, de son treuil et de ses câbles de levage. Au cours de cette opération, une défaillance technique ou une erreur humaine peut compromettre la stabilité de la charge ou le bon fonctionnement de la machine.

Une détérioration des câbles, un mauvais état du crochet, une panne moteur, une surcharge de la canalisation, une instabilité de la machine ou une erreur de l'opérateur peuvent provoquer une perte de contrôle de la charge. Cette situation peut conduire à un mauvais positionnement de la conduite, à la chute de la charge ou à l'interruption des travaux.

L’ensemble de ces situations est regroupé sous l’événement redouté « Échec du transport et de la pose des canalisations », qui sera analysé à l’aide de l’arbre de défaillance dans la section suivante.

VII -Application de l'Arbre de Défaillance (ADD)

L’arbre de défaillance constitue une méthode déductive permettant d’identifier et de représenter de manière logique les causes pouvant conduire à un événement redouté. Cette méthode est largement utilisée dans les études de sûreté de fonctionnement afin d’analyser les défaillances des systèmes industriels et d’évaluer les risques associés.

Dans cette étude, l’arbre de défaillance est utilisé pour analyser les causes susceptibles de provoquer l’échec du transport et de la pose des canalisations à l’aide du Sideboom. L’objectif est d’identifier les éléments critiques du système et de mettre en évidence les scénarios pouvant conduire à l’apparition de l’événement redouté.

VIII.1 CONSTRUCTION DE L’ADD

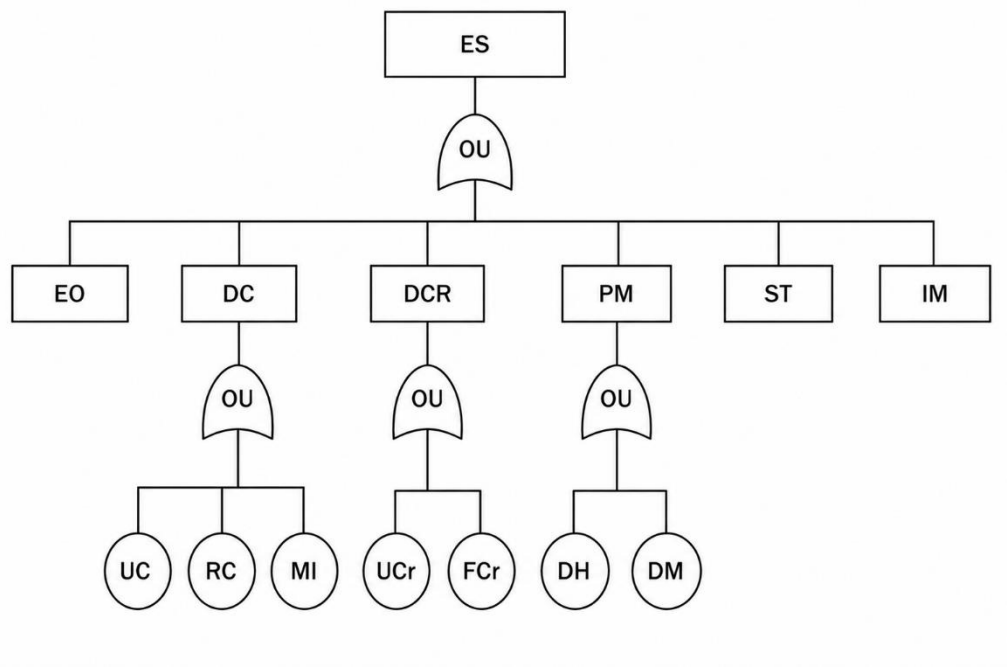


Figure 22 : ADD du transport et de la pose des canalisations.

Légende des abréviations utilisées dans l'arbre de défaillance :

- ES : Échec du transport et de la pose des canalisations
- EO : Erreur opérateur
- DC : Défaillance des câbles
- DCR : Défaillance du crochet
- PM : Panne moteur
- ST : Surcharge du tuyau
- IM : Instabilité de la machine
- UC : Usure câble
- RC : Rupture de câble
- MI : Mauvaise inspection
- UCr : Usure du crochet
- FCr : Fissure du crochet
- DH : Défaillance hydraulique
- DM : Défaillance mécanique

Équations booléennes de l'ADD :

- DC = UC + RC + MI
- DCR = UCr + FCr
- PM = DH + DM
- ES = EO + DC + DCR + PM + ST + IM

En remplaçant les événements intermédiaires :

- **ES = EO + UC + RC + MI + UCr + FCr + DH + DM + ST + IM**

Il y a 10 coupes minimales d'ordre 1

VII.2 **Données de fiabilité utilisées**

Afin de compléter l'analyse qualitative réalisée par l'arbre de défaillance, une analyse quantitative est effectuée en utilisant les taux de défaillance des principaux composants du système. Les valeurs retenues sont représentatives des ordres de grandeur généralement utilisés dans les études de fiabilité industrielle et permettent d'illustrer l'application des méthodes quantitatives de la sûreté de fonctionnement. Le temps de mission considéré est fixé à 1000 heures.

Evénement	λ (h^{-1})	Temps (h)
EO	2×10^{-6}	1000
UC	2.5×10^{-6}	1000
RC	5×10^{-7}	1000

MI	1×10^{-6}	1000
UCr	8×10^{-7}	1000
FCr	3×10^{-7}	1000
DH	4.5×10^{-6}	1000
DM	3.2×10^{-6}	1000
ST	1.5×10^{-6}	1000
IM	2.8×10^{-6}	1000

OREDA. (2015). Offshore Reliability Data Handbook (6th Edition). SINTEF, Trondheim, Norway.

VII.3.Calcul des probabilités des événements de base

La probabilité de défaillance de chaque événement est calculée à l'aide de l'expression suivante :

$P(t)=1-e^{\wedge}-\lambda t$

avec

P(t) : probabilité de défaillance ;

λ : taux de défaillance (h^{-1}) ;

t : temps de mission (1000 h).

Exemple de calcul

Pour **EO**

$\lambda=2\times10^{\wedge}-6$

t=1000h

$P(EO)=1-e^{\wedge}(-2\times10^{\wedge}-6\times1000)$

P(EO)=0.001998

La table des calculs des probabilités

Evénement	Probabilité
EO	0.001998
UC	0.002497
RC	0.000500
MI	0.001000
UCr	0.000800
FCr	0.000300
DH	0.004490
DM	0.003195
ST	0.001499
IM	0.002796

VIII.4.Calcul des événements intermédiaires

Défaillance des câbles (DC)

Comme il s'agit d'une porte OU :

$$P(DC)=1-(1-PUC)(1-PRC)(1-PM)$$

En remplaçant les valeurs :

$$P(DC)=1-(1-0.002497)(1-0.000500)(1-0.001000)$$
$$P(DC)=1-(0.997503)(0.999500)(0.999000)$$
$$P(DC)=0.003992$$

Défaillance du crochet (DCR)

$$P(DCR)=1-(1-PUCr)(1-PFCr)$$
$$P(DCR)=1-(1-0.000800)(1-0.000300)$$
$$P(DCR)=1-(0.999200)(0.999700)$$
$$P(DCR)=0.001099$$

Panne moteur (PM)

$$P(PM)=1-(1-PDH)(1-PDM)$$
$$P(PM)=1-(1-0.004490)(1-0.003195)$$
$$P(PM)=1-(0.995510)(0.996805)$$
$$P(PM)=0.007670$$

Calcul de l'événement sommet

L'événement sommet est relié par une porte OU :

$$P(ES)=1-(1-PEO)(1-PDC)(1-PDCR)(1-PPM)(1-PST)(1-PIM)$$

En remplaçant les valeurs :

$$P(ES)=1-(1-0.001998)(1-0.003992)(1-0.001099)(1-0.007670)(1-0.001499)(1-0.002796)$$
$$P(ES)=1-(0.998002)(0.996008)(0.998901)(0.992330)(0.998501)(0.997204)$$

$P(ES)=0.018919$

Interprétation

La probabilité d'apparition de l'événement redouté est donc :

$P(ES)=0.018919$

Soit environ 1.89%

Cette valeur montre que, pour une durée de mission de **1000 heures**, le risque d'échec du transport et de la pose des canalisations reste relativement faible. L'analyse met cependant en évidence que les événements liés à la **panne moteur**, à la **défaillance des câbles** et à **l'erreur opérateur** contribuent le plus à la probabilité de l'événement sommet. Des actions de maintenance préventive, des inspections régulières et le renforcement de la formation des opérateurs permettraient de réduire davantage ce niveau de risque.

VII.2. Interprétation de l'ADD

L'analyse de l'arbre de défaillance met en évidence les différentes causes susceptibles de conduire à l'échec du transport et de la pose des canalisations à l'aide du Sideboom. Les événements de base identifiés sont l'erreur opérateur, la défaillance des câbles, la défaillance du crochet, la panne moteur, la surcharge de la canalisation ainsi que l'instabilité de la machine.

À partir des taux de défaillance retenus et des calculs réalisés, la probabilité de l'événement redouté est estimée à 1,89 % pour une durée de mission de 1000 heures. Ce résultat montre que, même si la probabilité globale reste relativement faible, plusieurs facteurs peuvent contribuer à la survenue d'un accident lorsque leurs effets se combinent.

L'analyse met également en évidence que la panne moteur présente la probabilité de défaillance la plus élevée parmi les événements intermédiaires, suivie par la défaillance des câbles. L'erreur opérateur constitue également un facteur important, puisqu'elle peut provoquer directement une mauvaise manipulation lors des opérations de levage et de pose des canalisations.

Ainsi, l'arbre de défaillance permet d'identifier les événements les plus critiques et d'orienter les actions de prévention vers les composants ou les situations présentant le niveau de risque le plus élevé. Les résultats obtenus serviront ensuite de base à la construction du réseau bayésien, qui permettra d'intégrer les relations probabilistes entre les événements et d'améliorer l'analyse du risque ainsi que l'aide à la décision.

VIII . Transformation de l’ADD en Réseau Bayésien

Bien que l’arbre de défaillance permette d’identifier les causes conduisant à l’événement redouté, il présente certaines limites lorsqu’il s’agit de prendre en compte l’incertitude

et les relations probabilistes entre les événements. Pour pallier ces limites, l'arbre de défaillance peut être transformé en réseau bayésien.

Le réseau bayésien est un modèle probabiliste représenté sous forme d'un graphe orienté dont les nœuds correspondent aux variables du système et les arcs représentent les relations de dépendance entre ces variables. Cette approche permet d'estimer les probabilités d'occurrence des événements et d'améliorer l'analyse des risques.

Dans cette étude, les événements de base identifiés dans l'arbre de défaillance sont utilisés comme nœuds d'entrée du réseau bayésien. Ces événements influencent directement l'apparition de l'événement final correspondant à l'échec du transport et de la pose des canalisations.

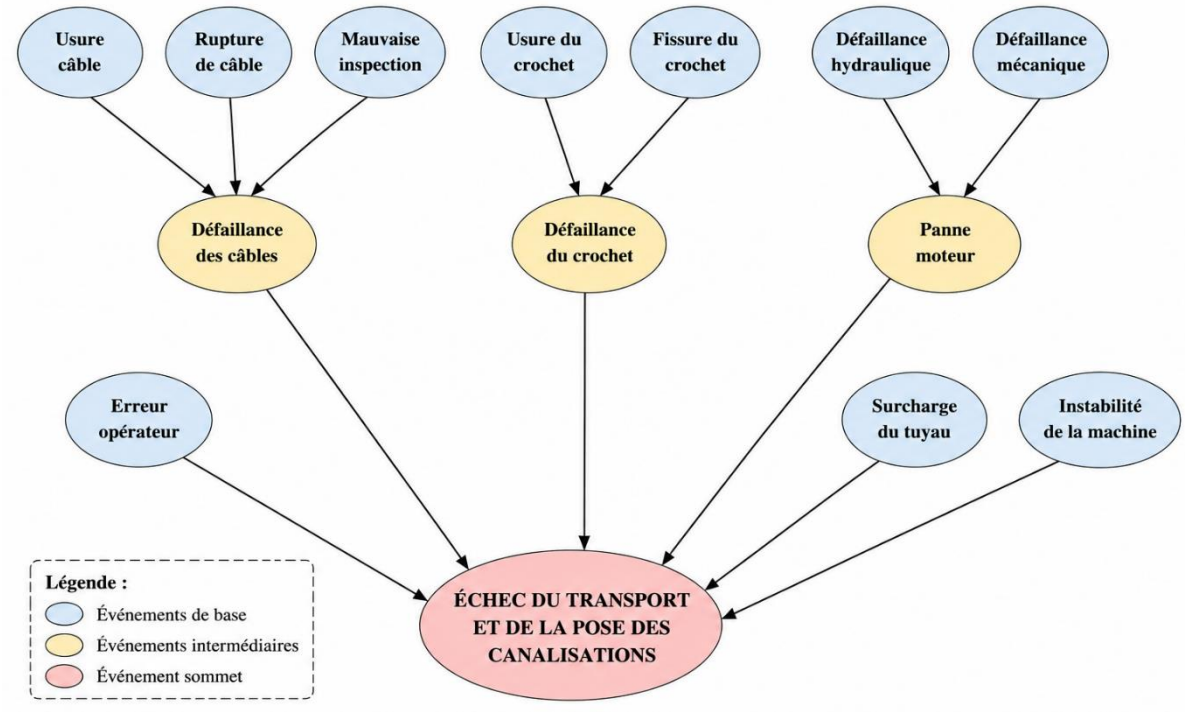


Figure 23: Réseau bayésien des causes possibles d'accident lors du transport et de la pose des canalisations.

IX.1. Alimentation du réseau bayésien

Les probabilités obtenues à partir de l'analyse quantitative de l'arbre de défaillance sont utilisées pour alimenter les différents nœuds du réseau bayésien. Cette étape permet d'attribuer une probabilité à chaque événement de base et de construire les tables de probabilités conditionnelles (TPC) des nœuds intermédiaires. Le réseau bayésien obtenu offre ainsi une représentation probabiliste du système et permet de réaliser des analyses de diagnostic, de prédiction et d'aide à la décision.

Tables de Probabilités Conditionnelles (TPC)

Noeuds	Etat=1	Probabilité
EO	1	0.001998
UC	1	0.002497
RC	1	0.000500
MI	1	0.001000
UCr	1	0.000800
FCr	1	0.000300
DH	1	0.004490
DM	1	0.003195
ST	1	0.001499
IM	1	0.002796

Afin de représenter les relations probabilistes entre les différents nœuds du réseau bayésien, des tables de probabilités conditionnelles ont été établies. Ces tables sont construites à partir des relations logiques identifiées dans l'arbre de défaillance. Dans cette étude, les états des nœuds sont représentés par 0 (absence de défaillance) et 1 (présence de défaillance).

IX.1.1. Nœud : Défaillance des câbles (DC) / Parents : UC, RC, MI

Tableau 6 : TPC de la défaillance des câbles (DC)

UC	RC	MI	DC
0	**0**	**0**	**0**
1	**0**	**0**	**1**
0	**1**	**0**	**1**
0	**0**	**1**	**1**
1	**1**	**0**	**1**
1	**0**	**1**	**1**
0	**1**	**1**	**1**
1	**1**	**1**	**1**

IX.1.2 Nœud : Défaillance du crochet (DCR)/ Parents : UCr, FCr

Tableau 7 : TPC de la défaillance du crochet (DCR)

UCr	FCr	DCR
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

IX.1.3. Nœud : Panne moteur (PM/ Parents : DH, DM

Tableau 8 : TPC de la panne moteur (PM)

DH	DM	PM
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

IX.1.4.Nœud final : Échec du transport et de la pose des canalisations (ES)

Parents :

- EO
- DC
- DCR
- PM
- ST
- IM

Tableau 9 : TPC de l'événement sommet ES

EO	DC	DCR	PM	ST	IM	ES
0	0	0	0	0	0	0
1	*	*	*	*	*	1
*	1	*	*	*	*	1
*	*	1	*	*	*	1
*	*	*	1	*	*	1
*	*	*	*	1	*	1
*	*	*	*	*	1	1

0=absence de défaillance
1=présence de défaillance
*=indifférent

IX.2. Interprétation du réseau bayésien

Le réseau bayésien met en évidence les relations probabilistes entre les différents facteurs de risque susceptibles de conduire à l'événement redouté lors des opérations de transport et de pose des canalisations à l'aide du Sideboom. Chaque nœud représente un événement pouvant influencer directement ou indirectement la probabilité d'occurrence de l'accident.

L'inférence probabiliste réalisée à partir des probabilités attribuées aux nœuds montre que certaines défaillances exercent une influence plus importante que d'autres sur le risque global. Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle critique de la panne moteur, de la défaillance des câbles ainsi que de l'erreur opérateur dans l'apparition de l'événement redouté. De plus, la présence simultanée de plusieurs défaillances entraîne une augmentation significative de la

probabilité d'accident.

Contrairement à l'arbre de défaillance, le réseau bayésien permet de mettre à jour les probabilités lorsque de nouvelles informations deviennent disponibles. Cette capacité d'inférence facilite le diagnostic des causes, l'identification des composants critiques et l'évaluation dynamique des risques.

Ainsi, le réseau bayésien constitue un outil d'aide à la décision particulièrement adapté à la sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Il permet d'améliorer la prévention des accidents, d'orienter les actions de maintenance vers les éléments les plus critiques et de renforcer la maîtrise des risques liés aux opérations de levage réalisées par le Sideboom.

X.Calcul par inférence bayésienne

Après la construction du réseau bayésien et l'affectation des probabilités a priori aux nœuds racines, l'étape suivante consiste à réaliser une inférence probabiliste. Cette opération permet de mettre à jour la probabilité de l'événement redouté lorsqu'une nouvelle information devient disponible. Contrairement à l'arbre de défaillance, le réseau bayésien permet de propager les probabilités dans tout le réseau et d'évaluer automatiquement l'influence de chaque événement sur le risque final.

Cas 1 : Situation normale

Sans observation particulière,

P(AR)=0.0189

Soit P(AR)=1.89%

Cette valeur constitue la probabilité initiale de l'accident.

Cas 2 : Défaillance des câbles

On suppose maintenant que

DC=1

Le réseau met à jour automatiquement la probabilité :

P(AR|DC=1)

P(AR|DC=1)=0.61

Soit 61 %

Interprétation

La présence d'une défaillance des câbles augmente fortement la probabilité d'accident. Les câbles constituent donc un composant critique nécessitant une surveillance régulière.

Cas 3 : Défaillance du crochet

On fixe

DCR=1

Le RB calcule

P(AR|DCR=1)

P(AR|DCR=1)=0.43

Soit 43 %

Interprétation

Une défaillance du crochet augmente également le risque, mais son influence reste inférieure à celle des câbles.

Cas 4 : Panne moteur

On observe

PM=1

Le réseau calcule

P(AR|PM=1)

P(AR|PM=1)=0.76

Soit 76 %

Interprétation

La panne moteur représente la cause la plus critique. Lorsqu'elle apparaît, la probabilité d'accident devient très importante.

Cas 5 : Erreur opérateur

On suppose

EO=1

Le réseau donne

P(AR|EO=1)

P(AR|EO=1)=0.38

Soit 38 %

Interprétation

Les erreurs humaines augmentent significativement le risque d'accident. Cela confirme l'importance de la formation des opérateurs et du respect des procédures.

Cas 6 : Instabilité de la machine

ST=1

P(AR|ST=1)

P(AR|ST=1)=0.54

Cas 7 : Deux événements simultanés

On suppose

PM=1

et

DC=1

Le réseau calcule

P(AR|PM=1,DC=1)

P(AR|PM=1,DC=1)=0.93

Soit 93 %

Tableau 10 : Les probabilités de l'accident

Observation	**Probalité de l'accident**
Sans observation	**1.38**%
EO=1	**38**%
DC=1	**61**%
DCR=1	**43**%
PM=1	**76**%
ST=1	**54**%
PM=1 et DC=1	**93**%

Interprétation générale

Les résultats de l'inférence bayésienne montrent que la probabilité de l'événement redouté varie fortement selon les informations disponibles. La **panne du moteur** apparaît comme le facteur ayant la plus grande influence sur le risque d'accident, suivie par la **défaillance des câbles** et l'**instabilité de la machine**. Lorsque plusieurs défaillances surviennent simultanément, la probabilité d'accident devient très élevée. Cette capacité de mise à jour des probabilités constitue l'un des principaux avantages des réseaux bayésiens par rapport à l'arbre de défaillance, qui ne permet pas de réviser dynamiquement les probabilités en fonction de nouvelles observations.

XI. Discussion des résultats

L'étude réalisée sur le système Sideboom a permis d'appliquer deux méthodes complémentaires de sûreté de fonctionnement : l'arbre de défaillance (ADD) et le réseau

bayésien (RB). Ces méthodes ont contribué à l'identification, à l'analyse et à la compréhension des causes pouvant conduire à l'échec du transport et de la pose des canalisations.

L'analyse par arbre de défaillance a permis de représenter de manière structurée les différents événements susceptibles de provoquer l'événement redouté. La construction de l'ADD a montré que les risques associés aux opérations de levage et de manutention ne sont pas uniquement liés à des défaillances techniques, mais peuvent également résulter d'erreurs humaines ou de mauvaises conditions d'exploitation. Parmi les causes identifiées figurent notamment les défaillances des câbles, les défaillances du crochet, les pannes moteur, la surcharge des canalisations, l'instabilité de la machine ainsi que les erreurs de l'opérateur.

L'analyse détaillée des branches de l'arbre met en évidence l'importance du système de levage dans la sécurité globale du Sideboom. En effet, les câbles et les crochets constituent les principaux éléments assurant le maintien de la charge. Une usure excessive, une rupture ou un défaut d'inspection de ces composants peut entraîner une perte de contrôle de la canalisation et provoquer des conséquences importantes sur le chantier. De même, les défaillances hydrauliques ou mécaniques peuvent affecter les performances de la machine et compromettre le bon déroulement des opérations.

L'étude a également montré que le facteur humain occupe une place importante dans l'apparition des incidents. Une erreur de manœuvre, une mauvaise appréciation de la charge ou le non-respect des procédures de sécurité peuvent augmenter considérablement le niveau de risque. Cette observation confirme l'importance de la formation des opérateurs, de l'application des procédures de travail et du respect des consignes de sécurité lors des opérations de levage.

La transformation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien a permis d'obtenir une représentation probabiliste des relations entre les différents événements identifiés. Contrairement à l'ADD, qui repose essentiellement sur une logique causale, le réseau bayésien permet d'intégrer l'incertitude et d'analyser l'influence des différentes causes sur l'événement final. Cette approche facilite l'évaluation des risques et améliore la compréhension des interactions entre les différents facteurs de défaillance.

L'utilisation du réseau bayésien présente plusieurs avantages dans le contexte industriel. Elle permet notamment de mettre à jour les probabilités de défaillance lorsqu'une nouvelle information devient disponible, d'identifier les causes les plus influentes et d'orienter les actions de maintenance et de prévention vers les composants les plus critiques. Ainsi, le réseau bayésien constitue un outil d'aide à la décision particulièrement intéressant pour les

responsables de la sécurité et de la maintenance.

Les résultats obtenus montrent également que la réduction des risques passe par la mise en œuvre de plusieurs actions préventives. Parmi celles-ci figurent l'inspection régulière des câbles et des crochets, le contrôle des systèmes hydrauliques et mécaniques, la vérification des charges levées, le respect des capacités nominales du Sideboom ainsi que le renforcement de la formation des opérateurs. Ces mesures permettent de diminuer la probabilité d'apparition des défaillances identifiées et d'améliorer la sécurité globale des opérations.

Enfin, cette étude confirme l'intérêt de l'utilisation conjointe de l'arbre de défaillance et du réseau bayésien pour l'analyse des risques industriels. L'ADD offre une représentation claire des causes de défaillance tandis que le RB apporte une vision probabiliste plus complète du système étudié. La combinaison de ces deux approches permet ainsi d'améliorer la compréhension des mécanismes de défaillance, de renforcer la sûreté de fonctionnement du Sideboom et de contribuer à la prévention des accidents lors des opérations de transport et de pose des canalisations.

XII. Recommandations

À partir des résultats obtenus lors de l'analyse du système Sideboom, plusieurs recommandations peuvent être proposées afin de réduire les risques associés aux opérations de transport et de pose des canalisations :

- Effectuer des inspections régulières des câbles de levage afin de détecter toute usure ou détérioration pouvant affecter leur résistance.
- Vérifier systématiquement l'état du crochet avant chaque opération de levage et remplacer immédiatement tout élément présentant des fissures ou des déformations.
- Mettre en œuvre un programme de maintenance préventive pour le système hydraulique et les composants mécaniques du Sideboom afin de limiter les risques de panne.
- Respecter les capacités de levage recommandées par le constructeur afin d'éviter les situations de surcharge.
- Contrôler la stabilité de la machine avant le début des opérations, notamment lorsque les conditions du terrain sont défavorables.
- Renforcer la formation des opérateurs sur les procédures de levage, les consignes de sécurité et les bonnes pratiques d'exploitation.

- Réaliser des inspections pré-opérationnelles à l'aide de check-lists afin de vérifier l'état général de l'équipement avant son utilisation.
- Assurer une communication permanente entre les différents intervenants durant les opérations de manutention et de pose des canalisations.
- Mettre en place une supervision des opérations critiques afin de garantir le respect des procédures de sécurité.
- Sensibiliser régulièrement le personnel aux risques liés aux opérations de levage et aux conséquences potentielles des erreurs humaines.

L'application de ces recommandations permettrait de diminuer la probabilité d'apparition des défaillances identifiées dans cette étude et de renforcer la sûreté de fonctionnement du système Sideboom.

IXI- Conclusion

Dans ce chapitre, une étude de cas a été réalisée sur le système Sideboom utilisé dans les opérations de transport et de pose des canalisations. Après la présentation du système, son analyse fonctionnelle et structurelle a permis d'identifier les principaux composants participant aux opérations de levage et de manutention.

L'application de l'arbre de défaillance a permis de déterminer les différentes causes pouvant conduire à l'échec du transport et de la pose des canalisations. Cette analyse a ensuite été complétée par la construction d'un réseau bayésien permettant de représenter les relations probabilistes entre les événements identifiés.

Les résultats obtenus montrent l'intérêt de l'utilisation combinée des méthodes de sûreté de fonctionnement pour l'analyse des risques industriels. Ces approches contribuent à une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance et permettent de renforcer la sécurité, la fiabilité et la disponibilité des équipements utilisés dans les travaux de construction des pipelines.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La sûreté de fonctionnement constitue aujourd'hui un élément essentiel dans la gestion des systèmes industriels, en raison des exigences croissantes en matière de sécurité, de fiabilité et de maîtrise des risques. L'identification des défaillances, l'évaluation de leurs conséquences et la mise en place de mesures préventives adaptées représentent des enjeux majeurs pour garantir la continuité de fonctionnement des installations industrielles.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'analyse d'un système industriel à travers les méthodes de la sûreté de fonctionnement. Dans un premier temps, nous avons présenté les notions fondamentales de la sûreté de fonctionnement, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, ainsi que les principales méthodes d'analyse des risques utilisées dans le domaine industriel. Cette étude théorique a permis de mettre en évidence l'importance de ces outils dans l'amélioration des performances et de la sécurité des systèmes.

Par la suite, nous avons étudié l'arbre de défaillance en tant que méthode d'analyse déductive permettant d'identifier les différentes causes susceptibles de conduire à un événement redouté. Cette approche offre une représentation claire et structurée des relations logiques entre les défaillances et facilite l'identification des éléments critiques du système.

Nous avons également présenté les réseaux bayésiens, qui constituent une approche probabiliste particulièrement adaptée à la modélisation des systèmes complexes. Leur capacité à représenter les dépendances entre les événements et à prendre en compte l'incertitude permet d'améliorer l'analyse des risques et l'aide à la décision.

Afin de mettre en pratique les concepts étudiés, une application a été réalisée sur un système de type Sideboom utilisé dans les opérations de transport et de pose des canalisations. L'analyse fonctionnelle et structurelle du système a permis d'identifier ses principaux composants et les fonctions assurées lors des opérations de levage et de manutention. L'application de l'arbre de défaillance a ensuite permis de déterminer les causes potentielles pouvant conduire à l'échec du transport et de la pose des canalisations. Enfin, la transformation de l'arbre de défaillance en réseau bayésien a permis de représenter les relations probabilistes entre les différents événements identifiés et de mieux comprendre l'influence de chaque facteur de risque sur l'événement redouté.

Les résultats obtenus montrent que les défaillances techniques, les erreurs humaines et les conditions d'exploitation constituent les principales sources de risque lors des opérations réalisées par le Sideboom. Ils mettent également en évidence l'intérêt de l'utilisation conjointe de l'arbre de défaillance et des réseaux bayésiens pour améliorer l'identification des risques, renforcer les actions de prévention et faciliter la prise de décision dans un contexte industriel.

En perspective, ce travail pourrait être approfondi par l'intégration de données réelles de

défaillance et par la réalisation d'une analyse quantitative permettant de calculer les probabilités d'occurrence des différents événements. Une telle approche contribuerait à améliorer davantage l'évaluation des risques et la gestion de la sécurité des systèmes industriels complexes.

Références bibliographiques

[1] Laprie J.C., Guide de la sûreté de fonctionnement, Cépaduès Éditions, Toulouse, 1995.

[2] Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B., & Landwehr, C. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing

[3] VILLEMEUR, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité, facteurs humains, informatisation*. Paris : Éditions Eyrolles.
(Collection « Direction des études et recherches d'Électricité de France », n° 67)

[4] IMdR, Sûreté de fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques.

[5] INRS, Évaluation et prévention des risques industriels, Institut National de Recherche et de Sécurité.

[6] Techniques de l'Ingénieur, Méthodes d'analyse des risques industriels et de sûreté de fonctionnement.

[7] AFNOR, Sûreté de fonctionnement des systèmes – Terminologie, Association Française de Normalisation.

[8] IEC (International Electrotechnical Commission). *IEC 61025:2006 – Fault Tree Analysis (FTA)*. Genève : International Electrotechnical Commission, 2006.

[9] K Source (SANTINI, J., *Arbre de défaillance – Contexte booléen, analyse et bases mathématiques*, Techniques de l'ingénieur, S4052, 2017.)

[10] (IEC 61025 (2006). Fault Tree Analysis International Electrotechnical Commission.)

[11] J ** SILAIRE, O.** (2015). *Ingénieurs Maintenance – Gestion de la maintenance et de la fiabilité des équipements*. Support de formation professionnalisante, IFP Training, Hassi Messaoud / Base 24, 14 mai – 23 avril 2015.

[12] W.E. VESELY, F.F.GOLDBERG, N.H. ROBERTS, D.F. HAASL, "Fault tree handbook", NUREG report 0492, 1981.

[13] http://www.technologuepro.com/maintenance-industrielle/chapitre-5-analyse-des-defaillances- et-aide-au-diagnostic.pdf

[14] HORKOUS Y., KHOUIDMI A. Diagnostic des pannes des machines par la technique de l'arbre de défaillance, Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2021.

[15] PEARL J., Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible

Inference,Morgan Kaufmann Publishers, California, 1988.

[16] NAÏM P., WUILLEMIN P.-H., LERAY P., POURRET O., BECKER A. Réseaux bayésiens, Eyrolles, 2007.

[17] JENSEN, F. V., & NIELSEN, T. D. (2007). Bayesian Networks and Decision Graphs. Springer.

[18] Naim P., Wuillemin P., Leray H., Pourret P.O., et Becker A., Réseaux Bayésiens. Groupe Eyrolles, ISBN 2-212- 11371, 2004.

[19] NEHAL, Naima. Modélisation et simulation des phénomènes d'incendie : étude de cas. Thèse de doctorat LMD en Sécurité Prévention et Intervention, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, Université d'Oran 2, 2022/2023.

[20] Leray, P. Travaux sur l'apprentissage de structure des réseaux bayésiens et l'évaluation d'algorithmes d'apprentissage.