



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن احمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en génie industriel
MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie industriel
Spécialité : Maintenance des automatismes et de l'instrumentation industriel

Thème

**Modélisation et Analyse des Mécanismes de
Défaillance pour la Prévention des Risques
Industriels**

Présenté et soutenu publiquement par :

MEDDAH Rim et MOKHTAR Youcef Essedik

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Etablissement	Qualité
D NEKKROUF	IMSI	Président
A HADJ KADDOUR	IMSI	Encadreur
D CHAREF	IMSI	Examineur

Année 2023/2024

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier Dieu, notre créateur qui nous a donné la force pour accomplir ce modeste travail.

Ce présent mémoire de fin d'étude, n'aurait pu avoir le jour sans contribution de nombreuses personnes, dont nous faisons aujourd'hui un plaisir et un devoir de les remercier.

Avant tout, nous tenons à remercier messieurs les membres du jury pour leurs collaborations durant l'examen de ce travail et leurs participations à la soutenance. Nous adressons tout particulièrement notre reconnaissance à madame l'encadrante HADJ KADDOUR AMEL pour la direction de cette thèse, pour ses conseils et son aide. Sans oublier les enseignants de l'Institut de Maintenance et De Sécurité Industrielle.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce présent mémoire, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitude et respect

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :
À mes très chers parents
Source inépuisable de patience et de sacrifice.*

Quoique je puisse dire et écrire, je ne pourrais jamais exprimer ma grande affection et ma profonde reconnaissance. Le soutien et les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi au long de ce travail, je tiens à ce qu'ils sachent que leurs encouragements sont une part importante de la réussite de mes études. Aucune dédicace ne peut exprimer la profondeur des sentiments fraternels et d'amour, d'attachement que j'éprouve à votre égard.

À mes chères frères et sœurs.

Je vous souhaite tout le bonheur du monde. Un grand merci à eux, pour leur encouragement, leur compréhension et leur grand amour et m'ont permis de surmonter toutes les difficultés.

Je remercie mes collègues et mes amis tous particulièrement.

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et nous souhaitons dédier cette réalisation à toutes les personnes qui ont cru en nous ,nous ont encouragés et ont contribué à notre réussite .Merci du fond du cœur pour votre soutien indéfectible et votre confiance tout au long de ce parcours.

Modélisation et Analyse des Mécanismes de Défaillance pour la Prévention des Risques Industriels

Résumé :

La maintenance industrielle constitue un pilier essentiel pour assurer le bon fonctionnement des équipements et des systèmes dans les environnements industriels. Ce mémoire explore la maintenance industrielle à travers quatre chapitres clés. Ce projet présente les concepts fondamentaux liés à la maintenance, il examine les différents modes et mécanismes de défaillance et se concentre sur les méthodes d'analyse, le diagnostic et modélisation des défaillances. Il propose aussi une étude de cas sur un four électrique à induction, utilisant ces méthodes pour un diagnostic et une modélisation approfondie, validées par une simulation et aboutissant à un plan de maintenance préventive.

Mots clés : défaillance, analyse, mécanismes, modélisation.

Modeling and Analysis of Failure Mechanisms for the Prevention of Industrial Risks

Abstract:

Industrial maintenance is a key pillar to ensure the proper functioning of equipment and systems in industrial environments. This thesis explores industrial maintenance through four key chapters. This project introduces the fundamental concepts related to maintenance, examines the different failure modes and mechanisms and focuses on methods of analysis, diagnosis and modeling of failures. It also proposes a case study on an electric induction furnace, using these methods for a diagnosis and in-depth modeling, validated by a simulation and resulting in a preventive maintenance plan.

Key words: failure, analysis, mechanisms, modeling.

نمذجة وتحليل آليات الفشل للوقاية من المخاطر الصناعية

الملخص:

شكل الصيانة الصناعية ركيزة أساسية لضمان حسن سير المعدات والأنظمة في البيئات الصناعية. تستكشف هذه الأطروحة الصيانة الصناعية من خلال أربعة فصول رئيسية. يقدم هذا المشروع المفاهيم الأساسية المتعلقة بالصيانة، فهو يدرس أنماط وآليات الفشل المختلفة ويركز على طرق التحليل والتشخيص ونمذجة الأعطال. كما يقدم أيضاً دراسة حالة عن فرن الحث الكهربائي، باستخدام هذه الأساليب للتشخيص والنمذجة المتعمقة، والتي يتم التحقق من صحتها عن طريق المحاكاة وينتج عنها خطة صيانة وقائية.

كلمات مفتاحية: العطل، تحليل، آليات، النمذجة.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	ii
<i>Dédicaces</i>	iii
Sommaire.....	v
Liste des Figures.....	viii
Liste des Tableaux.....	xi
Introduction Générale.....	12
1 Chapitre 1 : Cadre Théorique et Concept de Base sur la Maintenance.....	14
1.1 Introduction.....	14
1.2 Notions générales sur la maintenance.....	14
1.2.1 La maintenance [1].....	14
1.2.2 Historique et Evolution [1].....	14
1.2.3 L'objectif de la maintenance [2].....	16
1.2.4 Différents types de maintenance [3].....	17
1.2.5 Opérations de la maintenance [4].....	22
1.2.6 Les niveaux de maintenance [3].....	24
1.2.7 Les échelons de maintenance [5].....	25
1.3 La sûreté de fonctionnement (SDF) [6].....	25
1.3.1 Définition.....	26
1.3.2 Composantes de la sûreté de fonctionnement.....	26
1.3.3 Métriques de la Sûreté de Fonctionnement [11].....	27
1.4 Le rôle et l'importance de la maintenance dans la sécurité industrielle [12, 13, 14] ...	28
1.5 Les approches actuelles de prévention des risques industrielle.....	28
1.6 Conclusion.....	29
2 Chapitre 2 : Modes et mécanismes de défaillances.....	30
2.1 Introduction.....	30
2.2 Défaillance.....	30
2.2.1 Définition de la défaillance [18].....	30
2.2.2 Caractéristique d'une défaillance NF X 06-501 [19].....	30
2.3 Définitions relatives aux DÉFAILLANCES [20].....	31
2.4 Classification et types de défaillances [21].....	32
2.4.1 En fonction de la vitesse d'apparition:.....	32
2.4.2 En fonction du degré d'importance:.....	32
2.4.3 En fonction de la vitesse d'apparition et de degré d'importance:.....	32
2.4.4 En fonction de l'instant d'apparition:.....	33
2.4.5 En fonction des causes:.....	33
2.4.6 En fonction de son origine:.....	33
2.4.7 En fonction des conséquences:.....	33
2.4.8 En fonction de leur caractère:.....	34
2.5 Mode de DÉFAILLANCE [22].....	34
2.5.1 Modes génériques de défaillance (NF X60-510) [22].....	34
2.6 LES CAUSES DE DEFAILLANCE:.....	38
2.6.1 Généralités [22].....	38
2.6.2 Causes de défaillance du système [3].....	39

2.7	EVOLUTION D'UNE DEFAILLANCE [22]	41
2.8	LES MECANISMES DE DEFAILLANCE [3]	41
2.8.1	Mécanismes de défaillance mécanique:	41
2.8.2	Défaillances mécaniques par déformation plastique [3]	48
2.8.3	Défaillances mécaniques par ruptures ductiles et fragile [3]	49
2.8.4	Défaillances mécaniques par corrosion:.....	51
2.8.5	Défaillances mécaniques des pièces plastiques et des composites[3].....	51
2.8.6	Défaillances mécaniques par vieillissement [21].....	51
2.9	Mécanismes de défaillance des parties « commande » (PC) [3]	52
2.9.1	Modes de défaillances relatifs à la logique câblée	52
2.9.2	Modes de défaillances relatifs à la logique programmée	53
2.9.3	Défaillances par incompatibilité électromagnétique	54
2.10	Conclusion.....	54
3	Chapitre 3 :Les Méthodes d'Analyse et de Modélisation de Diagnostic des Défaillances	55
3.1	Introduction	55
3.2	Analyse des défaillances [26].....	55
3.2.1	Analyse quantitative des défaillances[26].....	55
3.2.2	Analyse qualitative des défaillances	62
3.2.3	Analyse prévisionnelle de défaillances [27].....	95
3.3	Conclusion.....	100
4	Chapitre 4 :Diagnostic d'un Four à Induction par les Méthodes de l'Arbre de Défaillance et les Réseaux Bayésiens.	101
4.1	Introduction	101
4.2	Présentation de l'équipement étudié.....	101
4.2.1	Définition d'un four à induction [39].....	101
4.2.2	Principe de fonctionnement [40].....	102
4.2.3	Types de four à induction.....	103
4.2.4	Applications industrielles des fours à induction [43 ;44].....	104
4.2.5	Avantages et inconvénients des fours à induction [41].....	105
4.3	Four électrique à induction étudié à basse fréquence (installé au niveau de l'entreprise ALFET) [45]	105
4.3.1	Description	105
4.3.2	Modes de défaillances d'un four électrique à induction [45].....	107
4.4	Logiciel de simulation [46]	108
4.4.1	Netica application.....	108
4.4.2	Objectifs de l'application	109
4.5	Application : « Analyse et modélisation de défaillance du four électrique à induction (ALFET) par l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens »	110
4.5.1	Mise en œuvre	110
4.6	Plan de Maintenance pour la Prévention des Risques Industriels d'un four électrique à induction	122
4.7	Conclusion.....	123
	Conclusion générale.....	124
	Bibliographie	125
	Annexes	129
	Annexe A : Utilisation de l'abaque de NOIRET	129
	Annexe B : Tableau de coefficient	132

Annexe C : terminologie.....133

Liste des Figures

Figure I.1. Evolution de la maintenance depuis 1940.....	16
Figure I.2. Les objectifs de la maintenance.	17
Figure I.3. Intervention corrective.	18
Figure I.3. Maintenance palliative.	18
Figure I.4. Maintenance curative[3].	19
Figure I.3. Intervention de préventive[3].....	19
Figure I.5. Intervention préventive systématique[3].....	20
Figure I.6. Intervention préventive conditionnelle[3].....	20
Figure I.7. Maintenance améliorative[3].	21
Figure I.8. Types de Maintenance.	22
Figure I.9. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement[11].	28
Figure II.1. Courbe en baignoire d'un système[19].....	31
Figure II.2. Comparaison des Modèles de Défaillance par Dégradation et Cataléctique[21]	32
Figure II.3. Illustration des Modes Génériques de Défaillance[22].....	34
Figure II.4. Diagramme des Facteurs Influant sur les Modes de Défaillance [22]	36
Figure II.5. Schéma des Causes de Défaillance Systémique[22].....	39
.....	40
Figure II.6. Analyse des Causes Externes et Internes de Défaillance d'un Élément[22].	40
.....	41
Figure II.7. Flux Causal des Défaillances dans un Système[22]	41
.....	42
Figure II.8. Effet d'usure sur un engrenage[22]	42
.....	43
Figure II.9. Effet fretting corrosion [22].....	43
.....	43
Figure II.10. Ecaillage sévère sur une bague de roulement[22].	43
.....	44
Figure II.11. Grippage d'un talon de vis d'extrusion [22].....	44
.....	44
Figure II.12. Effet usure par abrasion [22].	44
.....	45
Figure II.13. Pompe centrifuge détruite par la cavitation [22].	45
.....	45
Figure II.14. Effet faiéçage d'une peinture[22].	45
Figure II.15. Effet de rayage [22].	46
.....	46

Figure II.16. Effet de la fatigue[22].	46
.....	47
Figure II.17. Courbe d'usure[21].	47
Figure II.18. Diagramme contrainte-déformation[23].	48
.....	49
Figure II.19. Courbe Rupture ductile[24].	49
.....	49
Figure II.20. Rupture ductile[24].	49
.....	50
Figure II.21. Courbe Rupture fragile[24].	50
.....	50
Figure II.22. Rupture fragile[24].	50
Figure III.1. Types d'analyse des défaillances[26].	55
Figure III.2. Analyse des temps[26].	56
.....	58
Figure III.3. La courbe ABC[26].	58
Figure III.4. Détermination des cibles d'action prioritaire[3].	59
.....	60
Figure III.5. Mise en évidence des éléments les moins fiables[26].	60
Figure III.6. Mise en évidence des éléments les moins disponibles[26].	60
.....	61
Figure III.7. Mise en évidence des éléments les moins maintenables[26].	61
Figure III.8. Diagramme des composants de la disponibilité[28].	63
.....	64
Figure III.9. La démarche de diagnostic de panne[1].	64
.....	67
Figure III.10. Méthodes inductives et déductives[1].	67
.....	67
Figure III.11. Classification des méthodes de diagnostic.	67
.....	69
Figure III.12. Architecture d'un système expert[28].	69
.....	71
Figure III.13. Forme générale des diagrammes Ishikawa[29].	71
.....	72
Figure III.14. Diagramme causes-effet (les 5M issus du diagramme d'Ishikawa) [27]	72
.....	73
Figure III.15. Tableau causes-effet d'une installation hydraulique[30].	73
Figure III.16. Organigramme de l'élaboration de l'arbre[29].	78
Figure III.17. Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillance[22].	79
Figure III.18. Arbre de défaillance d'un moteur a tendeuse[1]	81

.....	83
Figure III.19. Exemple d'un arbre de défaillance[29].	83
.....	85
Figure III.20. Arbre de défaillance réduit[29].	85
.....	86
Figure III.21. Porte logique ET.....	86
.....	86
Figure III.22. Porte logique OU.....	86
.....	90
Figure III.23. Réseau bayésien ou X est la cause de Y[34].	90
.....	91
Figure III.24. Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un AdD en RB [36].	91
Figure III.25. Exemple de Structure d'AdD [36].....	92
Figure III.26. Structure du réseau bayésien obtenu à partir de la Figure III 25 [36].	92
Figure III.27. Démarche de l'AMDEC [28].	98
Figure VI.1. Four électrique à induction[39].	101
Figure VI.2. Isolation de bobine de four à induction[40].	102
Figure VI.3. Corps d'un four à creuset[41].	103
Figure VI.4. Four à canal[42].	104
Figure VI.5. Schéma descriptif d'un four électrique à induction.	107
Figure VI.6. Fenêtre d'Information du Logiciel de Simulation Netica [46].	108
.....	113
Figure VI.7. AdD qualitative du Four à induction.....	113
Figure VI.8. AdD quantitative pour les défaillances du Four à induction.	115
.....	116
Figure VI.9. Modélisation de l'AdD en RB.....	116
Figure VI.10. TPC de l'évènement redouté sous Netica.	119
Figure VI.11. Probabilités de M, H, T, E sous Netica.	120
Figure VI.12. Inférence avec Netica, pour le four à induction.	120
Figure VI.13. Cas de défaillance total du système.	121

Liste des Tableaux

TABLEAU I.1. Niveaux de maintenance.....	24
TABLEAU II.1. Tableau Synoptique des Modes de Défaillance par Type de Technologie [22]	35
TABLEAU II.2. Liste Complète des Modes de Défaillance.....	36
TABLEAU III.1. Tableau en N, Nt et t [26].....	59
TABLEAU III.2. Symboles des événements dans l'AdD[31].....	75
TABLEAU III.3. Symboles des portes logiques dans l'AdD[31].	76
TABLEAU III.4. Symboles de transfert sous l'AdD[31].	77
TABLEAU III.5. Simplifications algèbre de BOOLE[29].....	82
TABLEAU III.6. TPC de la porte logique « Ou » [36]	93
TABLEAU III.7. TPC de la porte logique « et ».....	93
TABLEAU III.8. TPC de la porte logique «2 sur 3 ».....	94
Tableau VII.1. Dossier historique du four à induction [donné à ALFET].....	110
Tableau VII.2. Tableau des probabilités.....	114
Tableau VII.3. Probabilités à postériori.....	115
Tableau VII.4. Probabilité conditionnelle.....	117
Tableau VII.5. Probabilité des événements M, H, T, E.....	118

Introduction Générale

Dans le contexte actuel de l'industrie moderne, la prévention des risques et la maintenance des équipements jouent un rôle crucial tant pour la sécurité des travailleurs que pour la pérennité des activités économiques et la protection de l'environnement. Les risques industriels peuvent avoir des conséquences dramatiques, allant des accidents graves aux catastrophes environnementales, ce qui souligne l'importance vitale de mettre en œuvre des mesures efficaces de prévention. Parallèlement, l'accent croissant mis sur la maintenance vise non seulement à assurer une production continue et efficiente, mais également à garantir la sécurité et la fiabilité des opérations industrielles.

En intégrant les connaissances théoriques acquises durant notre formation universitaire en maintenance des automatismes et de l'instrumentation industrielle, Ce mémoire de fin d'études intitulé « Modélisation et Analyse des Mécanismes de Défaillance pour la Prévention des Risques Industriels » s'inscrit dans ce cadre essentiel de la maintenance industrielle, explorant divers aspects allant de l'analyse des défaillances à la modélisation et au diagnostic avancé. Il se propose ainsi d'approfondir la compréhension des mécanismes de défaillance des équipements industriels, traitant leur durée de vie comme une variable aléatoire complexe. Cette approche permet de mieux appréhender les défis et les opportunités associés à la transition d'approches réactives vers des stratégies préventives, souvent plus économiquement justifiables mais nécessitant une justification rigoureuse.

Ce travail s'articulera autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre pose les bases théoriques en définissant les concepts fondamentaux de la maintenance et la sûreté de fonctionnement, types de maintenance, offrant ainsi un cadre conceptuel essentiel pour comprendre les enjeux et les stratégies de maintenance industrielle.

Le deuxième chapitre est consacré aux modes et mécanismes de défaillance. Il définit la défaillance, en explore les causes et les caractéristiques, et détaille les divers modes et mécanismes par lesquels les défaillances peuvent se manifester. Cette section permet de comprendre les origines et les manifestations des problèmes qui peuvent affecter les systèmes industriels.

Le Chapitre 3 explore l'analyse et la modélisation des défaillances à travers des approches qualitatives, quantitatives et prévisionnelles et ces méthodes. Il introduit les concepts de diagnostic et d'expertise technique et comment ces approches visent à évaluer et à améliorer la fiabilité des systèmes industriels en identifiant les risques potentiels et en proposant des solutions adaptées.

Le quatrième chapitre, constitue la contribution majeure de ce PFE, Il est entièrement consacré à une analyse et la modélisation d'un four électrique à induction utilisant l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens et une simulation l'aide d'un logiciel de simulation avancé.

Enfinement Nous proposons un plan de maintenance pour la prévention des risques industriels associés à ce type d'équipement

1 Chapitre 1 : Cadre Théorique et Concept de Base sur la Maintenance

1.1 INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, la perception de la maintenance a évolué pour devenir un ensemble d'activités gérées par le service maintenance, visant à maintenir la productivité conformément aux plans de production, et n'est plus simplement considérée comme une contrainte. Autrefois marginalisée et perçue comme coûteuse, la maintenance est désormais reconnue comme une fonction essentielle de l'entreprise. Elle est désormais perçue comme un élément clé de la compétitivité, garantissant la disponibilité, la sécurité et la qualité des équipements.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie des concepts fondamentaux liés à la maintenance, ainsi que de son rôle crucial dans la sécurité industrielle et la prévention des risques.

1.2 NOTIONS GENERALES SUR LA MAINTENANCE

1.2.1 La maintenance [1]

1.2.1.1.1 Définition

Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise (norme NF EN 13306).

1.2.2 Historique et Evolution [1]

Dans un cadre de compétition économique mondiale, la gestion de la maintenance reste instable dans un contexte où l'automatisation et les procédés de production se complexifient de plus en plus, Depuis les années 1940, L'évolution de la maintenance s'est faite, grosso modo, selon la chronologie suivante (Figure .I.1) :

- Jusqu'à la fin du XIXe siècle, l'entretien des équipements se limitait principalement au nettoyage, au graissage et à la lubrification, ainsi qu'à des interventions après panne pour des réparations. On croyait alors, à tort, que les pannes étaient improbables si la conception était correcte et que seul un entretien de base était nécessaire. Cependant, les pannes survenues ont démontré que la conception n'était pas parfaite et que les équipements nécessitaient des améliorations.

- Au début du XXe siècle, les accidents matériels et humains causés par les pannes d'équipements dangereux comme les chaudières et les réservoirs de gaz ont incité les organismes nationaux et internationaux à exiger des inspections et des contrôles réglementaires systématiques.
- Vers la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'entretien classique était toujours en vigueur, avec des améliorations apportées aux équipements lorsque nécessaire. Cependant, la maintenance préventive systématique, basée sur des remplacements et des révisions régulières, a commencé à être pratiquée. Ces interventions n'étaient pas optimisées et entraînaient souvent le remplacement de pièces encore fonctionnelles. Cette approche rendait la maintenance coûteuse et était perçue comme un gouffre financier. La maintenance était alors souvent improvisée.
- Les années 1960-1970 ont marqué l'émergence de trois mouvements significatifs dans le domaine de la maintenance :
 - L'intégration de la fiabilité et de la maintenabilité : Cette période a vu la naissance de la maintenance centrée sur la fiabilité (Reliability Centred Maintenance), où la périodicité des interventions était déterminée par des modèles statistiques (Weibull, exponentiel, etc.) et l'analyse des résultats d'essais ou des historiques de pannes. La conception des équipements commençait à intégrer ces aspects dès le départ, rendant la maintenance plus orientée vers la fiabilité.
 - La prise en compte de l'aspect économique : Face aux impératifs croissants de compétitivité, les entreprises ont dû chercher constamment à économiser et rationaliser. Le coût de la maintenance est devenu un enjeu majeur, avec une comptabilité dédiée distincte des frais de production, affirmant ainsi son identité et son autonomie. La maintenance évoluait vers une activité économiquement justifiable, générant des économies par la prévention des coûts liés à la non-efficacité des équipements.
 - L'avènement de la maintenance conditionnelle : La réalisation que les remplacements systématiques ne garantissaient pas la fiabilité, surtout que les démontages et remontages pouvaient eux-mêmes introduire des défaillances, a mené à la préférence pour la surveillance en fonctionnement plutôt que l'intervention préventive intrusive. Des techniques de contrôle non destructives (ultrasons, radiographies X et γ , ressuage, courants de Foucault, magnétoscopie, contrôle vibratoire, analyse d'huile) ont commencé à se répandre dans l'industrie. La maintenance devenait ainsi plus scientifique et objective.

- Depuis les années soixante-dix, deux approches majeures ont transformé la maintenance:
 - Le Coût Global ou Life Cycle Cost (LCC) : Ce concept prend en compte non seulement l'investissement initial mais aussi les coûts cumulés de maintenance et d'exploitation sur le long terme, rendant les décisions plus économiques et fondées.
 - La maintenance productive totale (TPM) : Lancée dans les années 1970, cette méthode favorise une participation active des opérateurs dans les tâches de maintenance de base et implique tout le personnel dans l'amélioration continue de la maintenance, rendant le processus plus participatif et efficace.
- Depuis le début des années 2000, la maintenance a été révolutionnée par l'informatisation généralisée. Cela inclut la gestion de la maintenance assistée par ordinateurs (GMAO), la maintenance elle-même assistée par ordinateurs (MAO), et des innovations telles que la télémaintenance, l'utilisation de capteurs pour la détection précoce de problèmes, les diagnostics automatisés, l'emploi de robots pour les interventions, et l'utilisation de systèmes experts. L'ère de la maintenance 4.0 ou cognitive est née, intégrant la GMAO et la MAO avec les technologies de l'information et de la communication (TIC) et les outils d'intelligence artificielle pour optimiser les processus de maintenance.

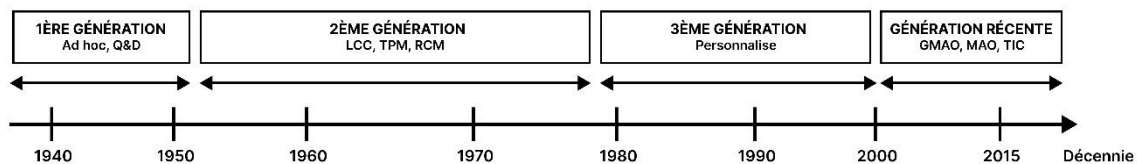


Figure I.1. Evolution de la maintenance depuis 1940

1.2.3 L'objectif de la maintenance [2]

La maintenance industrielle a pour vocation d'assurer un ensemble d'objectifs présentés dans la Figure.I.2:

- Maintenir l'opérabilité du système avec l'objectif de réaliser les buts de production tout en assurant la disponibilité et le fonctionnement optimal des équipements.
- Conserver les appareils dans un état optimal pour qu'ils remplissent leurs rôles assignés afin de prolonger leur durée de vie.
- Promouvoir le bien-être des individus malgré les considérations techniques et financières.

- Garantir la sécurité et la protection des installations de production et de l'ensemble des biens en maintenant un niveau de danger au-dessous d'un seuil acceptable.

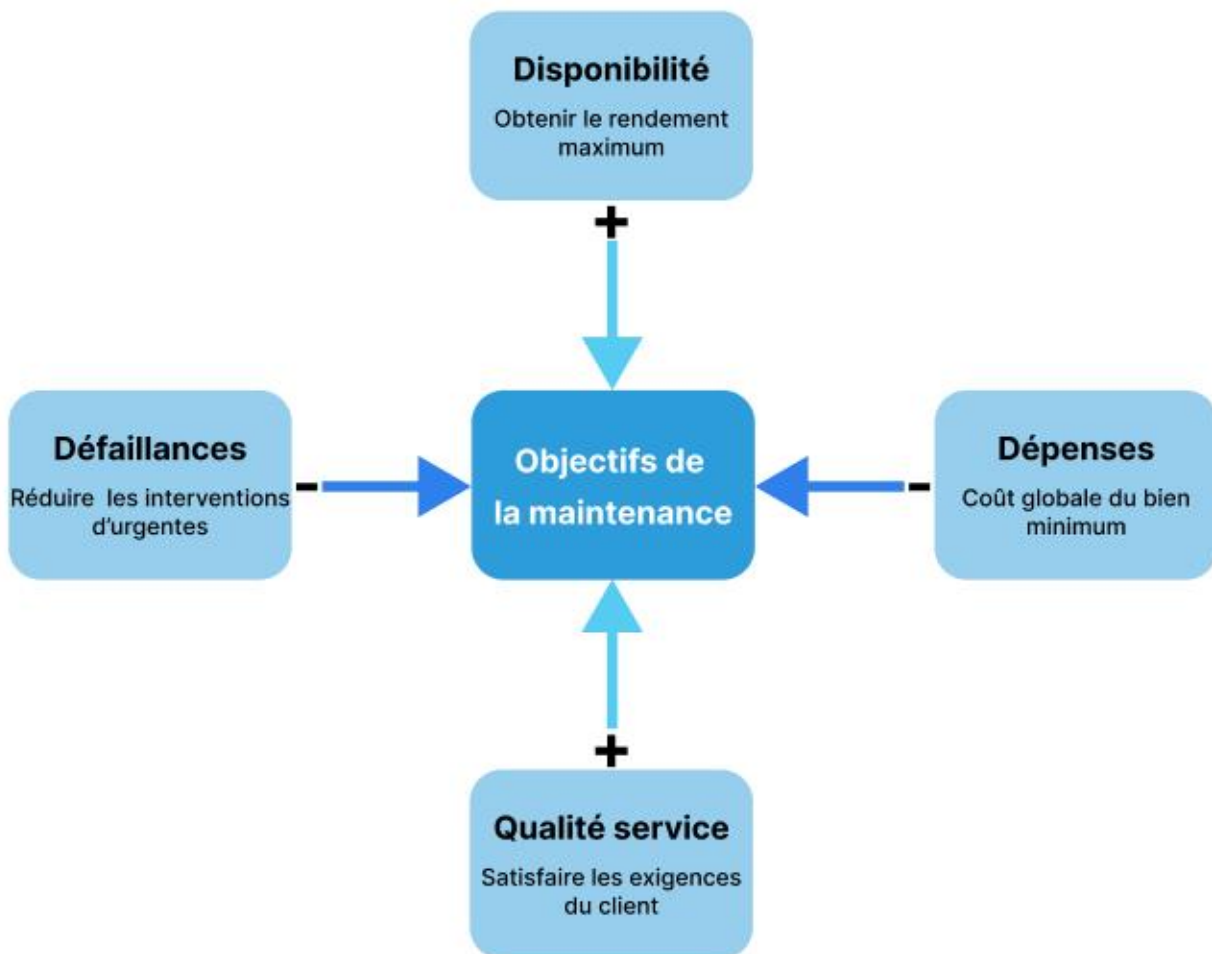


Figure I.2. Les objectifs de la maintenance.

1.2.4 Différents types de maintenance [3]

Les stratégies de maintenance peuvent être répertoriées en deux grandes catégories: la maintenance corrective et la maintenance préventive.

1.2.4.1 Maintenance Corrective

1.2.4.1.1 Définition

La maintenance corrective est définie ainsi : « maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ». Elle peut être « différée » si « elle n'est pas exécutée immédiatement après la détection d'une panne, mais est retardée en accord avec des règles de maintenance données ». Elle peut être « d'urgence » si « elle est exécutée sans délai après détection d'une panne afin d'éviter des conséquences inacceptables ».

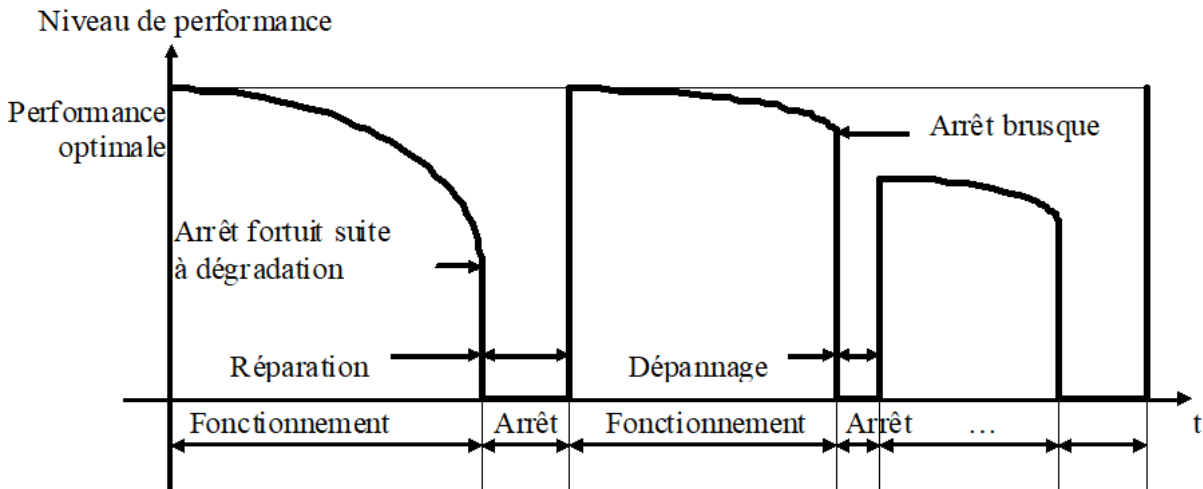


Figure I.3. Intervention corrective.

On distingue deux types de maintenance corrective :

1.2.4.1.2 Maintenance palliative:

La maintenance corrective palliative regroupe les activités de maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Ces activités du type dépannage qui présentent un caractère provisoire devront être suivies d'activités curatives.

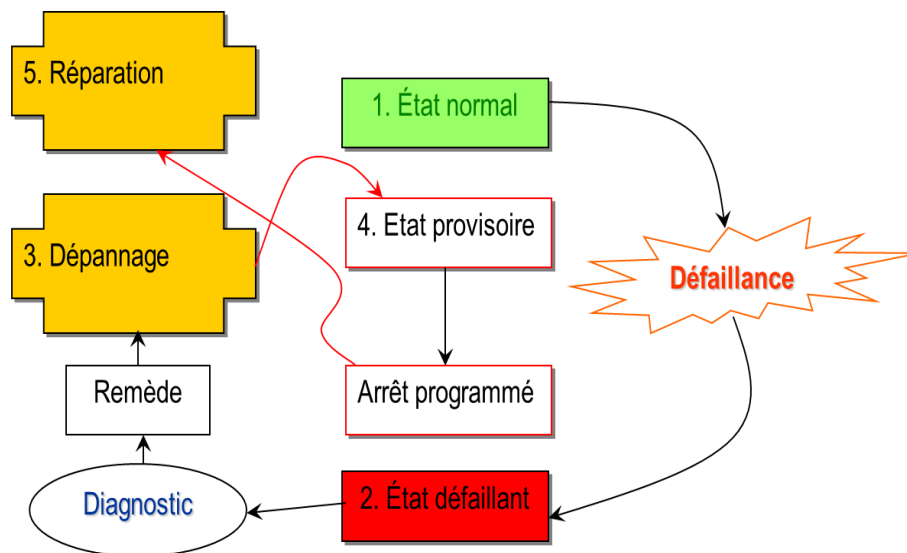


Figure I.3. Maintenance palliative.

1.2.4.1.3 Maintenance curative:

La maintenance corrective curative regroupe les activités de maintenance corrective ayant pour objet de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise.

Ces activités du type réparation, modification ou amélioration doivent présenter un caractère permanent.

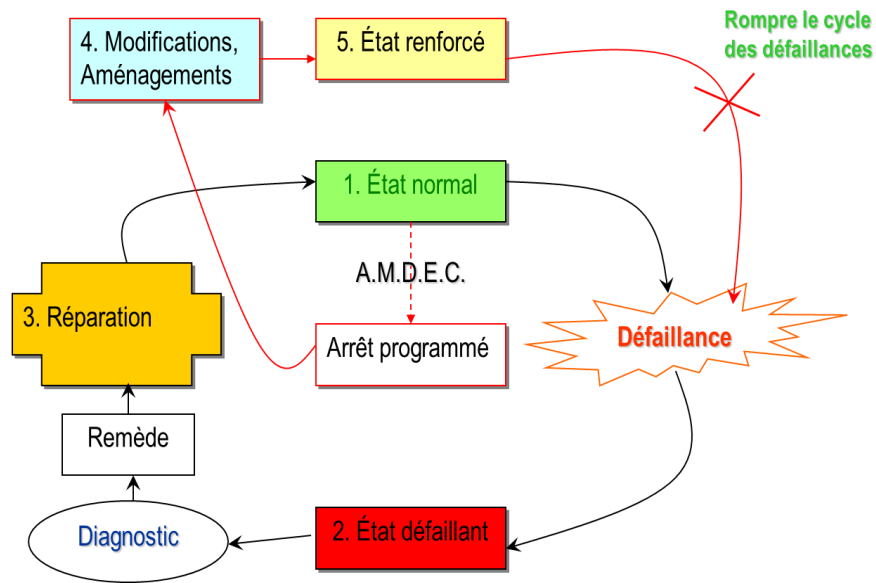


Figure I.4. Maintenance curative[3].

1.2.4.2 Maintenance préventive

La norme FD X 60-000 décrit la maintenance préventive ainsi Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinés à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien

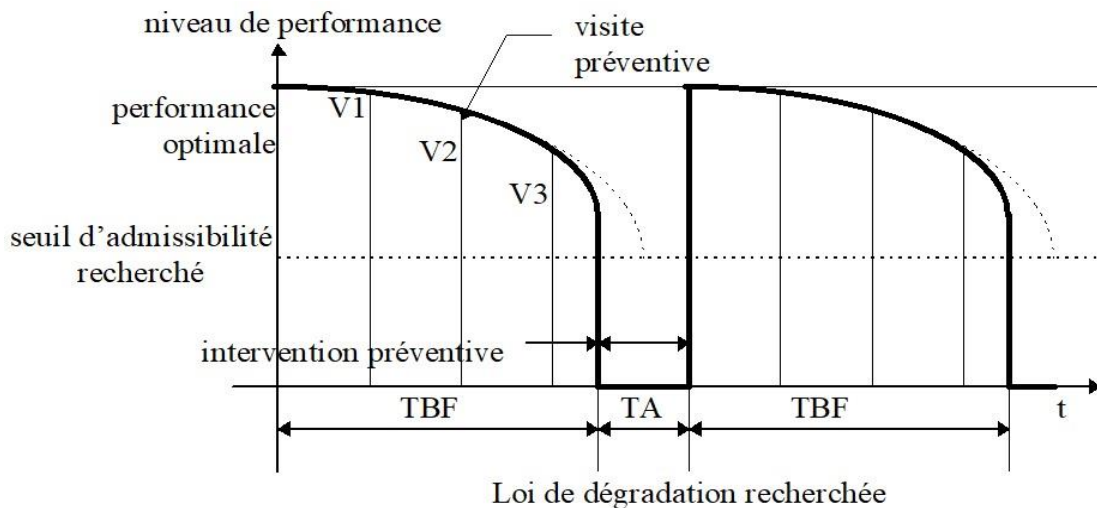


Figure I.3. Intervention de préventive[3].

On distingue là trois types de maintenance :

1.2.4.2.1 Maintenance préventive systématique

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien.

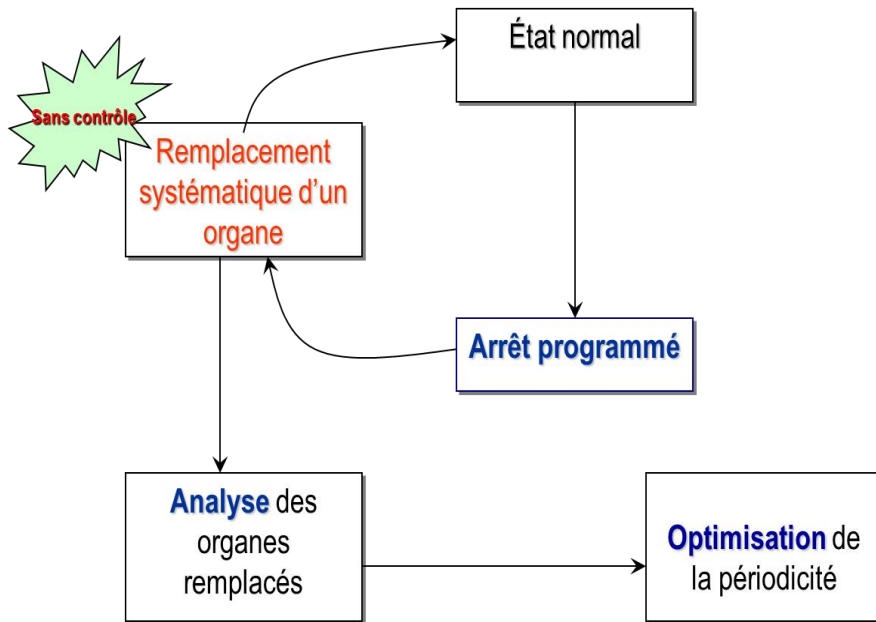


Figure I.5. Intervention préventive systématique[3].

1.2.4.2.2 Maintenance préventive conditionnelle

Les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchées suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service.

Maintenance préventive conditionnelle : « Les remplacements ou les mises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise d'effectuer les remplacements ou les mises en état nécessaires. »

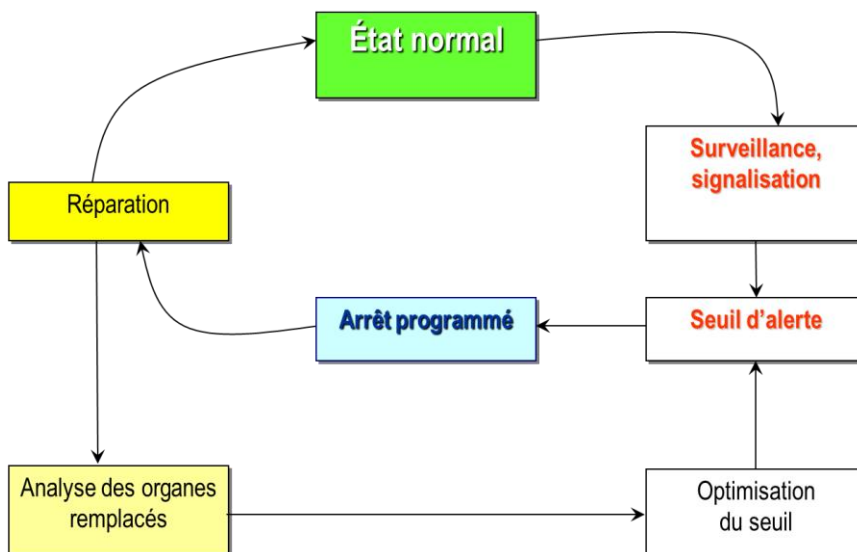


Figure I.6. Intervention préventive conditionnelle[3].

1.2.4.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle

Maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

1.2.4.3 Autre approche de la maintenance

1.2.4.3.1 Maintenance améliorative

La maintenance Améliorative est un ensemble des activités et actions visant à améliorer la fiabilité et la maintenabilité du système ou à modifier un équipement ou un sous-ensemble de façon à augmenter sa sécurité, sa fiabilité, sa maintenabilité et sa disponibilité.

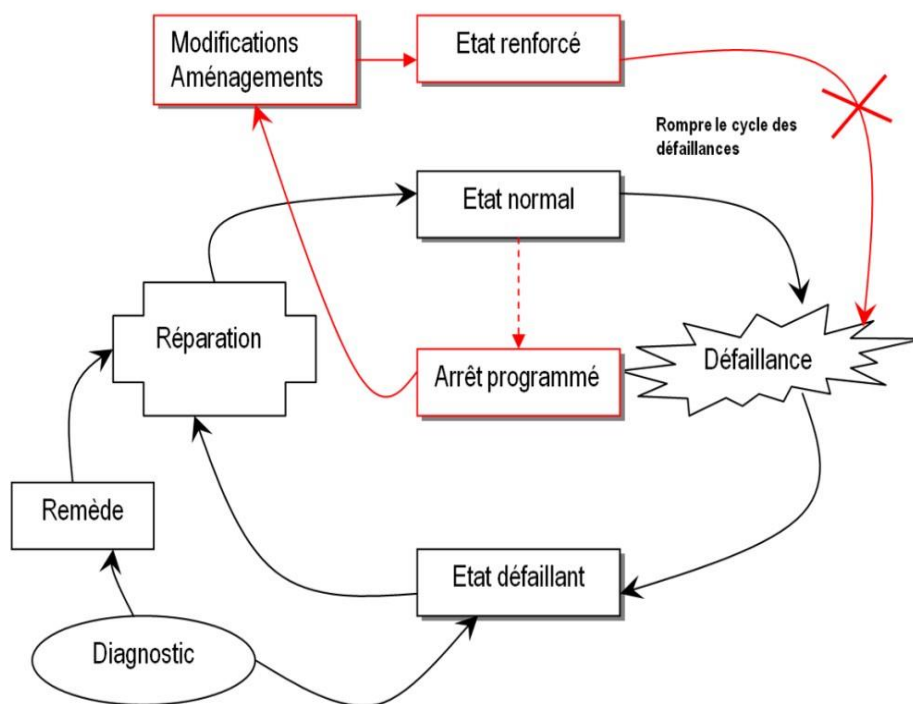


Figure I.7. Maintenance améliorative[3].

Le schéma ci-dessous (figure I.3) résume les types de maintenance :

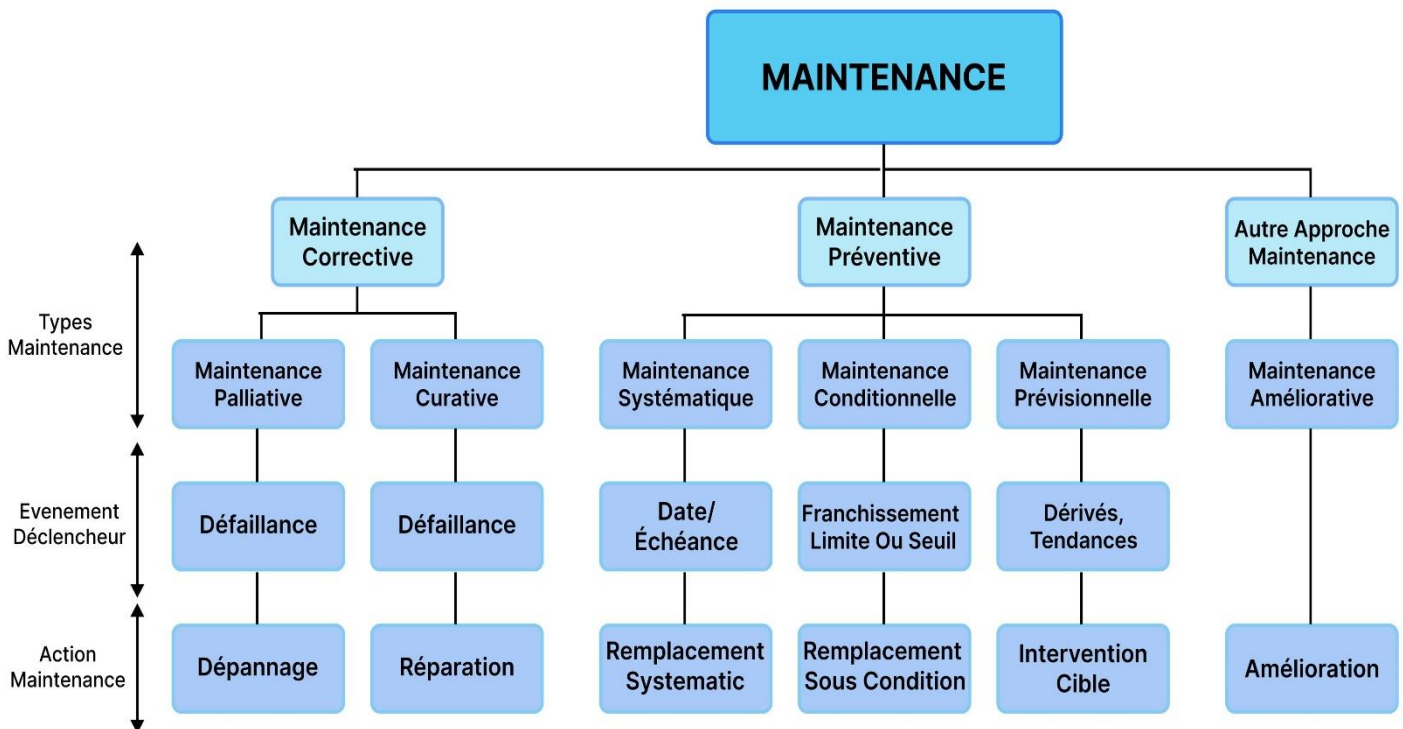


Figure I.8. Types de Maintenance.

1.2.5 Opérations de la maintenance [4]

Il existe des définitions normatives des différentes opérations de maintenance.

1.2.5.1 Opérations de la maintenance corrective

LE DEPANNAGE: Actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée (EN 13306: Avril 2001).

Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance (pour en mesurer son efficacité) prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

LA REPARATION: Actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien en panne (EN 13306: avril 2001).

L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

Remarque:

La réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu. Tous les équipements sont concernés

1.2.5.2 Opérations de la maintenance préventive

Elles peuvent être regroupées en 3 familles : les inspections, les contrôles, les visites. Elles permettent de maîtriser l'évolution de l'état réel du matériel. Elles peuvent être effectuées de manière continue ou à des intervalles, prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

L'inspection: Contrôles de conformités réalisés en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien. En général, l'inspection peut être réalisée avant, pendant ou après d'autres activités de maintenance (norme NF EN 13306).

La visite: opération de maintenance préventive qui se traduit par un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie du bien. Ex : visite périodique des ascenseurs, des équipements électriques et mécaniques d'un engin de levage. Ces activités peuvent entraîner des démontages partiels des éléments à visiter (et donc d'entraîner une immobilisation du matériel) ainsi que des opérations de maintenance corrective.

Le contrôle: vérifications de conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'un jugement. Ex : contrôle du niveau d'isolement d'une installation BT, contrôle du jeu fonctionnel dans un mécanisme. Le contrôle peut comporter une activité d'information, inclure une décision (acceptation, rejet, ajournement), déboucher sur des actions correctives. La périodicité du contrôle peut être constante (durant la phase de fonctionnement normal du matériel) ou variable (et de plus en plus courte dès que le matériel rentre dans sa phase d'usure).

La Révision: Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il faut distinguer suivant l'étendue des opérations à effectuer les révisions partielles et les révisions générales. Dans les 2 cas, cette opération nécessite la dépose de différents sous-ensembles. Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes

visites, contrôles, inspections. Les 2 types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4ème niveau de maintenance.

Les échanges standard: Reprise d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce ou d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur, moyennement le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état. Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage, compense l'inégalité de valeur des lits ou des biens échangés.

1.2.6 Les niveaux de maintenance [3]

La maintenance est caractérisée par une très grande variabilité des tâches, en natures comme en durées. D'où l'utilité de jeter les bases de son organisation à partir d'une mise en familles à cinq niveaux (tableau I.1), suivant la norme AFNOR X 60-000. La tendance actuelle est de se ramener à trois niveaux seulement, dans une logique de TPM. À savoir : I = 1 + 2 : c'est la maintenance « de première ligne » transférée progressivement aux opérateurs de production, assistés si nécessaire par les techniciens de maintenance de l'antenne sectorisée ; II = 3 + 4 : domaine d'action privilégié des équipes polyvalentes de techniciens de maintenance. Diagnostics, interventions techniquement évoluées, mise en œuvre d'améliorations, etc. ; III = 5 : travaux spécialisés souvent sous-traités pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire (le niveau II).

TABLEAU I.1. Niveaux de maintenance.

Niveau	Personnel d'intervention	Nature de l'intervention	Moyens requis
1	Exploitant sur place.	Réglage simple d'organes accessibles sans aucun démontage, ou échanges d'éléments accessibles en dans les consignes de toute sécurité conduite.	Outillage léger défini dans les consignes de conduite.
2	Technicien habilité (dépanneur) sur place.	Dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou opérations mineures de maintenance préventive.	Outillage standard et rechanges situés à proximité.
3	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance.	Identification et diagnostics de pannes, réparations par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	Outillage prévu plus appareils de mesure, banc d'essai, de contrôle.

4	Équipe encadrée par un technicien spécialisé en atelier central.	Travaux importants de maintenance corrective ou préventive. Révisions.	Outillage général et spécialisé.
5	Équipe complète polyvalente en atelier central.	Travaux de rénovation, de reconstruction, réparations importantes confiées à un atelier central Souvent externalisés.	Moyens proches de ceux de la fabrication par le constructeur.

1.2.7 Les échelons de maintenance [5]

Il est important de ne pas confondre les niveaux de maintenance avec la notion d'échelon de maintenance qui spécifie l'endroit où les interventions sont effectuées. On définit généralement trois échelons qui sont:

- **La maintenance sur site:** l'intervention est directement réalisée sur le matériel en place (exemple: échanges, graissage, nettoyage, contrôles, alignement d'arbre);
- **La maintenance en atelier:** le matériel à réparer est transporté dans un endroit, sur site, approprié à l'intervention (exemple: réparation de moteur électriques, fabrication de pièces de rechanges, contrôles spéciaux);
- **La maintenance chez le constructeur ou une société spécialisée:** le matériel est alors transporté pour que soient effectuées les opérations nécessitant des moyens spécifiques (exemple: reconditionnement de grandes pièces, analyses d'huile, fabrication de pièces spéciales).

Bien que les deux concepts de niveau et d'échelon de maintenance soient bien distincts, il existe souvent une corrélation entre le niveau et l'échelon. Les opérations de niveaux 1 à 3, par exemple, s'effectuant sur site, celles de niveau 4 en atelier, et celles de niveau 5 chez un spécialiste hors site (constructeur ou société spécialisée). Si cela se vérifie fréquemment (dans le domaine militaire par exemple), il convient cependant de ne pas en faire une généralité. On peut rencontrer en milieu industriel des tâches de niveau 5 effectuées directement sur site.

1.3 LA SURETE DE FONCTIONNEMENT (SDF) [6]

L'importance croissante accordée à la sûreté de fonctionnement dans le secteur industriel est notable. Cette branche, ayant évolué sous son appellation et sa structure actuelles principalement dans la seconde moitié du siècle dernier, notamment dans les domaines de la défense, de l'aéronautique,

spatial, nucléaire, ainsi que dans les télécommunications et les transports, se révèle maintenant cruciale, voire essentielle, pour l'ensemble des branches industrielles et au-delà.

1.3.1 Définition

La sûreté de fonctionnement d'un système désigne sa capacité à remplir sa fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps prévu. Elle englobe la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité, et la sécurité du système.

1.3.2 Composantes de la sûreté de fonctionnement

Anticiper les défaillances d'un système nécessite l'utilisation de principes probabilistes, basés sur les éléments clés de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité) pour établir les performances souhaitées d'un système et apprécier son niveau de service prévu, dans le but d'identifier et d'améliorer les aspects critiques.

1.3.2.1 Fiabilité R (*Reliability*) [7]

Définition: La fiabilité est la probabilité qu'un système remplisse sa fonction requise sous des conditions données pendant un temps donné sans défaillance. Elle est essentielle pour évaluer la performance et la sécurité des systèmes.

Mathématiquement la fiabilité est définie comme étant la probabilité de fonctionnement sans défaillance du matériel pendant un temps t :

$$R(t) = \text{Probabilité } (T > t)$$

Le complément de fiabilité est la défiabilité $F(t)$ (la fonction de répartition) qui est définie comme étant la probabilité de défaillance d'un système et s'exprime comme suit :

$$F(t) = 1 - R(t) = \text{Probabilité } (T < t)$$

1.3.2.2 Maintenabilité [8]

Définition: La maintenabilité mesure la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en état de marche après une panne ou un dysfonctionnement. C'est un facteur clé pour minimiser le temps d'arrêt et optimiser la disponibilité du système.

La maintenabilité d'une entité réparable est caractérisée par une probabilité $M(t)$ donnée comme suit :

$$M(t) = \text{Probabilité [la maintenance d'un système est achevée au temps } t] = 1 - \text{Probabilité [Système non réparée sur l'intervalle } [0, t]$$

1.3.2.3 Disponibilité [9]

Définition: La disponibilité d'un système est la probabilité que celui-ci soit en état de fonctionnement et disponible pour l'utilisation au moment désiré. Elle est influencée par la fiabilité et la maintenabilité du système.

Cette disponibilité peut être exprimée comme la probabilité exprimée comme suit :

$$A(t) = \text{Probabilité (E non défaillant à l'instant t)}$$

Le complément de cette probabilité, appelé indisponibilité est exprimé comme suit :

$$A(t) = 1 - A(t)$$

1.3.2.4 Sécurité [10]

Définition: La sécurité d'un système se réfère à l'absence de risques inacceptables de dommages pour les personnes ou l'environnement. Elle implique la mise en place de mesures et de systèmes de contrôle pour prévenir les accidents et protéger les utilisateurs.

1.3.3 Métriques de la Sûreté de Fonctionnement [11]

Les grandeurs présentées ci-après caractérisent des durées moyennes associées à la sûreté de fonctionnement :

- **MTTF:** durée moyenne de fonctionnement avant la première défaillance (Mean Time To Failure).

$$MTTF = \int R(t) dt \infty 0$$

- **MTTR:** durée moyenne de réparation (Mean Time To Repair).

$$MTTR = \int (1 - M(t)) dt$$

- **MUT:** durée moyenne de fonctionnement après réparation (Mean Up Time).
- **MDT:** durée moyenne d'indisponibilité (Mean Dawn Time). Cette durée comptabilise le temps de détection de la panne, le temps de réparation et la remise en service.
- **MTBF:** durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée. (Mean Time Between Failure).

$$MTBF = MDT + MUT$$

Ces grandeurs sont représentées sur le diagramme de la Figure I.9

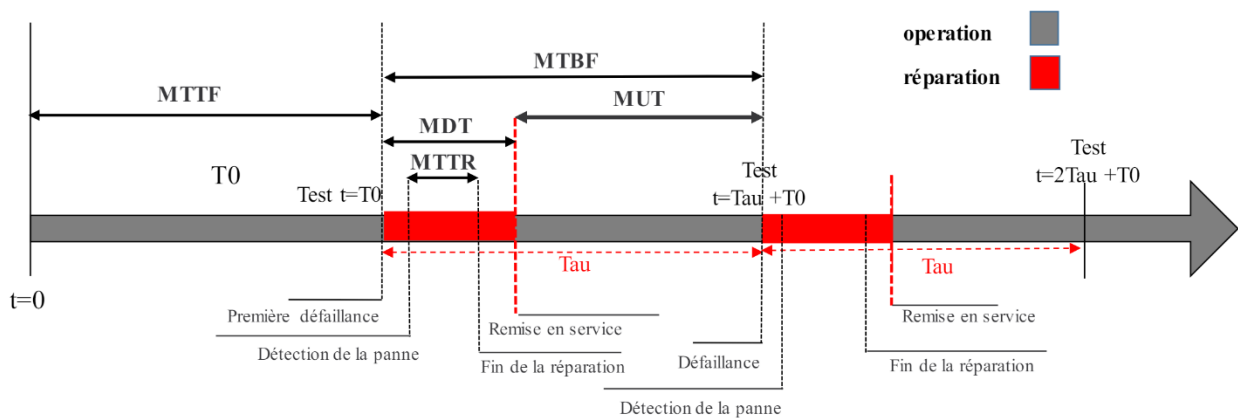


Figure I.9. Métriques de la Sûreté de Fonctionnement[11].

1.4 LE ROLE ET L'IMPORTANCE DE LA MAINTENANCE DANS LA SECURITE INDUSTRIELLE [12, 13, 14]

La maintenance industrielle joue un rôle crucial dans la sécurité des installations industrielles. Elle assure que les équipements fonctionnent correctement et en toute sécurité, prévenant ainsi les accidents et les défaillances qui pourraient entraîner des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs et de l'environnement.

- Prévention des défaillances: La maintenance régulière permet de détecter et de corriger les problèmes avant qu'ils ne deviennent critiques, réduisant ainsi le risque d'accidents graves.
- Augmentation de la fiabilité des équipements: Un entretien adéquat garantit que les machines et les équipements sont fiables et opérationnels, ce qui est essentiel pour maintenir la continuité des opérations et la sécurité au travail.
- Réduction des coûts: En évitant les pannes majeures et en prolongeant la durée de vie des machines, la maintenance efficace aide également à réduire les coûts associés aux réparations d'urgence et aux arrêts de production.

1.5 LES APPROCHES ACTUELLES DE PREVENTION DES RISQUES INDUSTRIELLE

Les approches actuelles de prévention des risques industriels comprennent plusieurs stratégies

1. Intégration des Risques Multiples:

Cette méthode prend en compte divers types de risques affectant une zone industrielle. Des modèles analytiques sont utilisés pour prévoir les interactions entre ces risques et préparer des

réponses efficaces pour les situations de crise. L'objectif est d'améliorer la capacité des industries à se rétablir rapidement après un incident, renforçant leur résilience.

2. Approche Basée sur la Raison Pratique:

Cette stratégie privilégie le bon sens et la logique pratique dans la gestion de la sécurité, en s'appuyant sur l'expérience et le jugement des personnes sur le terrain. Elle encourage une prise de décision flexible et adaptative, ce qui rend la gestion de la sécurité plus réactive et capable de s'adapter à des conditions changeantes.

3. Analyse et Gouvernance Adaptative:

Cette approche consiste à évaluer comment les politiques publiques influencent la gestion des risques industriels et à ajuster ces politiques en fonction des besoins. Elle implique des révisions régulières des régulations, utilisant les enseignements tirés des incidents passés pour améliorer continuellement les standards de sécurité.

Ces approches sont toutes conçues pour protéger les personnes, les installations industrielles et l'environnement contre les risques industriels. [15, 16, 17]

1.6 CONCLUSION

En conclusion, ce chapitre a fourni un aperçu approfondi du cadre théorique et des concepts fondamentaux liés à la maintenance industrielle. Nous avons exploré les différentes notions générales de maintenance, notamment ses objectifs, ses types et ses niveaux. Nous avons également examiné l'importance cruciale de la sûreté de fonctionnement dans les environnements industriels. Enfin, nous avons souligné le rôle essentiel de la maintenance dans la sécurité industrielle, ainsi que les approches actuelles de prévention des risques

2 Chapitre 2 : Modes et mécanismes de défaillances

2.1 INTRODUCTION

La compréhension des mécanismes de défaillance qui sont susceptibles d'apparaître sur les éléments constitutifs d'un matériel est une démarche primordiale car il est utile de démystifier les mécanismes de défaillance les plus fréquents dans nos ateliers (usure, fatigue, corrosion, vieillissement, etc...) pour établir les tâches de maintenance préventive dans le cadre d'une politique de maintenance basée sur la fiabilité.

Dans ce chapitre, on va présenter la notion de défaillance avec leurs caractéristiques et classification, modes, causes et leur différent type de mécanismes de défaillance en détails.

2.2 DEFAILLANCE

2.2.1 Définition de la défaillance [18]

Selon la norme CEI-271-1974 c'est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. Cette cessation peut être complète (l'entité ne remplit plus sa fonction) ou partielle (la fonction est assurée dans certaines limites, on parle alors de mode dégradé). Les défaillances peuvent être momentanées (indisponibilité du composant à remplir sa fonction pendant un temps donné. Le composant redevient disponible sans répartition) ou permanentes (la défaillance du composant est irréversible, une maintenance est nécessaire pour remettre le composant en service).

2.2.2 Caractéristique d'une défaillance NF X 06-501 [19]

Une défaillance se caractérise également par le moment où elle se manifeste par rapport au cycle de vie de produit. Elle peut être :

- **Précoce en se manifestant au début:** dans ce cas elle se rapporte à la période de déverminage ou rodage
- **Aléatoire:** quand le taux de défaillance est sensiblement constant durant le cycle de vie utile.
- **D'usure:** en fin de cycle de vie du produit, avec un taux de défaillance rapidement croissant en fonction du processus de détérioration par usure, par corrosion, par échauffement...

C'est ce que montre le graphique ci-dessous.

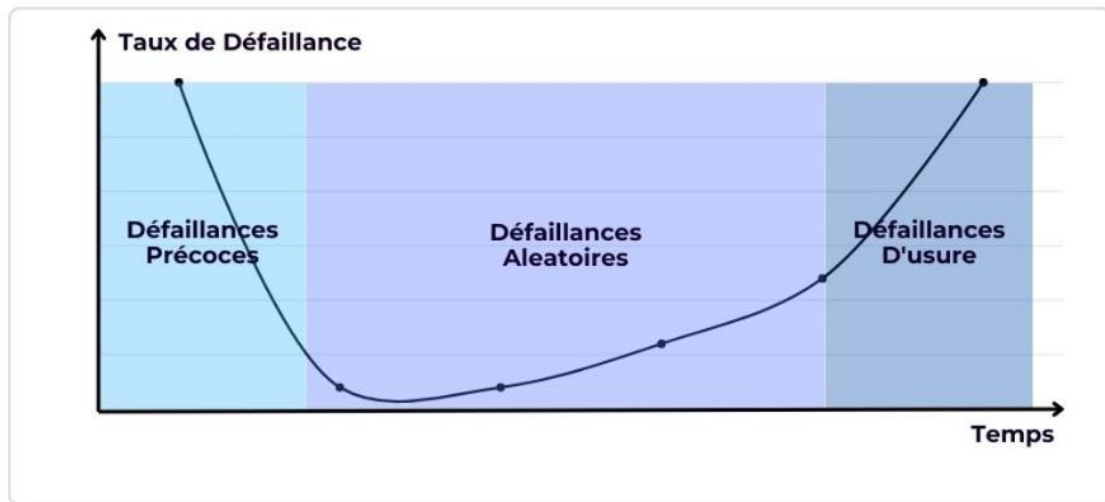


Figure II.1. Courbe en baignoire d'un système[19]

2.3 DÉFINITIONS RELATIVES AUX DÉFAILLANCES [20]

Cause de défaillance: circonstances liées à la conception, à la fabrication, à l'installation, à l'utilisation et à la maintenance qui ont conduit à la défaillance.

Mécanisme de défaillance: processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance.

Mode de défaillance: effet par lequel une défaillance se manifeste.

Panne: état d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures.

Remarque:

après défaillance, le bien est en état de panne, totale ou partielle. La défaillance est un évènement distinguer d'une panne qui est un état.

Dégradation: évolution irréversible des caractéristiques d'un bien liée au temps ou à la durée d'utilisation.

Remarque:

une dégradation peut conduire à la défaillance.

État dégradé: état d'un bien par lequel ce bien continue à accomplir une fonction avec des performances inférieures aux valeurs nominales ou continue à accomplir une partie seulement de ces fonctions requises.

2.4 CLASSIFICATION ET TYPES DE DEFAILLANCES [21]

La norme AFNOR X 60-011 propose plusieurs mises en famille des défaillances, Parmi lesquelles nous retiendrons :

2.4.1 En fonction de la vitesse d'apparition:

- **Défaillance progressive:** défaillance qui aurait pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.
- **Défaillance soudaine:** défaillance qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.

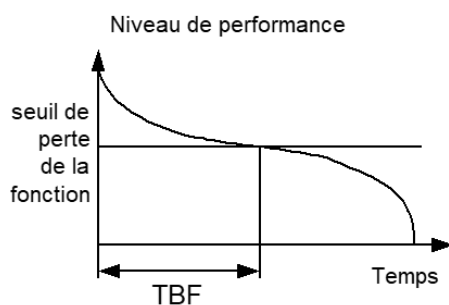
2.4.2 En fonction du degré d'importance:

- **Défaillance partielle:** défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.
- **Défaillance complète:** défaillance résultant de déviations d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.
- **Défaillance intermittente:** défaillance d'un dispositif pour une période de temps limité, après laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir la fonction requise sans avoir été soumis à une action corrective extérieure. De telles défaillances sont souvent répétitives.

2.4.3 En fonction de la vitesse d'apparition et de degré d'importance:

- **Défaillance catalectique:** défaillance à la fois soudaine et complète.
- **Défaillance par dégradation:** défaillance à la fois progressive et partielle. A la longue, de telles défaillances peuvent devenir de défaillances complètes.

Modèle de dégradation



Modèle catalectique :

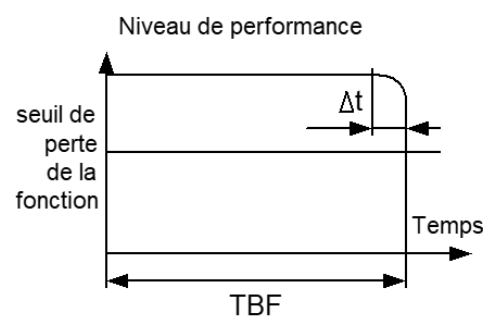


Figure II.2. Comparaison des Modèles de Défaillance par Dégradation et Cataléctique[21]

2.4.4 En fonction de l'instant d'apparition:

- **Défaillance en fonctionnement:** Elle se produit sur l'entité alors que la fonction requise est utilisée.
- **Défaillance à l'arrêt:** Elle se produit sur l'entité alors que la fonction requise n'est pas utilisée.
- **Défaillance à la sollicitation:** Elle se produit au moment où la fonction requise est sollicitée.

2.4.5 En fonction des causes:

- **Défaillance due à une faiblesse inhérente:** défaillance attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données du dispositif (faiblesse due à la conception ou à la réalisation du dispositif).
- **Défaillance due à un mauvais emploi:** défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du dispositif.
- **Défaillance première:** défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif.
- **Défaillance seconde:** défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte est la défaillance d'un autre dispositif.

2.4.6 En fonction de son origine:

- **Défaillance intrinsèque:** c'est le système lui-même qui est à l'origine de la défaillance.
- **Défaillance extrinsèque:** les défaillances sont dues à des causes extérieures (maintenance, exploitation). Le système n'est pas responsable de la défaillance.

2.4.7 En fonction des conséquences:

- **Défaillance critique:** défaillance qui empêche l'accomplissement de la mission et fait encourir des risques de blessures graves à des personnes ou des dégâts très importants au matériel. Ce type de défaillance est pris en compte dans les études de sécurité.
- **Défaillance majeure:** défaillance autre que critique, qui risque de réduire l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir la fonction requise
- **Défaillance mineure:** défaillance autre que critique, qui ne réduit pas l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir la fonction requise.

2.4.8 En fonction de leur caractère:

- **Défaillance reproductible:** la cause peut reproduire la défaillance.
- **Défaillance non reproductible:** la cause ne reproduit jamais la défaillance.
- **Défaillance systématique:** Liée d'une manière certaine à une cause.

2.5 MODE DE DÉFAILLANCE [22]

Il est défini par la manière selon laquelle une défaillance se produit ; une défaillance fonctionnelle se manifeste dans la majorité des cas par plusieurs modes de défaillance.

De façon très générale, un mode de défaillance à un des 4 effets suivants sur un système:

1. Fonctionnement prématuré.
2. Ne fonctionne pas au moment prévu.
3. Ne s'arrête pas au moment prévu.
4. Défaillance en fonctionnement.

2.5.1 Modes génériques de défaillance (NF X60-510) [22]

Il existe 5 modes génériques de défaillance:

- Perte de la fonction
- Fonctionnement intempestif
- Refus de s'arrêter
- Refus de démarrer
- Fonctionnement dégradé

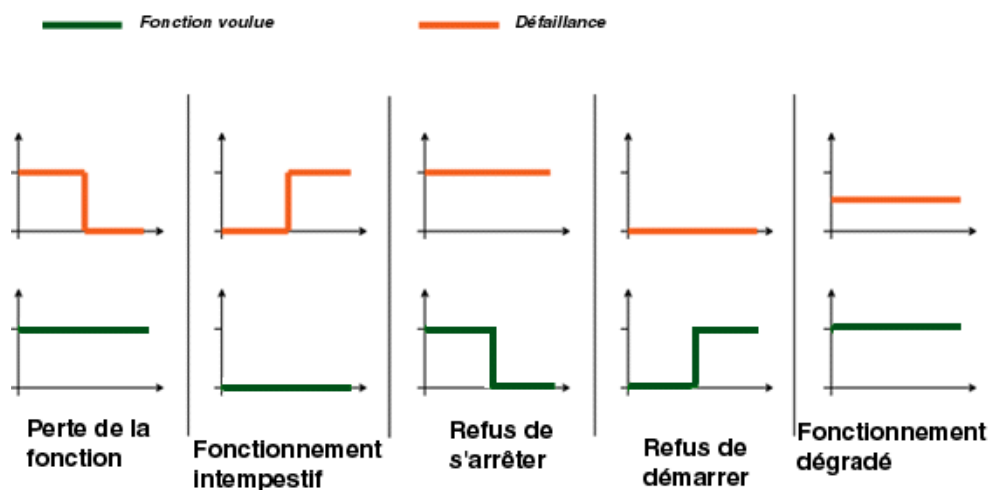


Figure II.3. Illustration des Modes Génériques de Défaillance[22]

Exemples de modes de défaillance:

TABLEAU II.1. Tableau Synoptique des Modes de Défaillance par Type de Technologie [22]

	ELECTRONIQUE ELECTROMECHANIQUE	HYDRAULIQUE	MECANIQUE
PAS DE FONCTION	Circuit ouvert, court-circuit, pas de réponse à la sollicitation, connexions / fils desserrés	Fuite, circuit bouché	Absence de jeu
PERTE DE FONCTION	Coupure ou court-circuit, composant défectueux	Obstruction ou coupure circuit, composant défectueux	Rupture, blocage / grippage
FONCTION DEGRADEE	Dérive des caractéristiques, perturbations, parasites	Mauvaise étanchéité, usure Perturbations, coup de bélier	Mauvaise portée, désolidarisation, jeu
FONCTION INTEMPESTIVE	Déclenchement intempestif	Coup de bélier	

Chaque type de défaillance survient dans des conditions spécifiques et est souvent le résultat de multiples causes.

Cependant, en évaluant l'importance, les conséquences et la rapidité de manifestation de ces défaillances, il est possible de construire un diagnostic précis.

Pour cela, une norme générale a été établie, recensant 33 modes de défaillance génériques décrivant de manière détaillée les défaillances potentielles de tout élément.

Ces modes de défaillance sont couramment utilisés dans les analyses AMDEC. Il est essentiel de reconnaître que les modes de défaillance résultent d'interactions entre sept paramètres d'influence : Matière, Milieu, Conception, Réalisation, Montage, Exploitation et Maintenance.

Par conséquent, il est crucial de prendre en considération ces interactions lors de l'analyse d'une défaillance afin de proposer des solutions efficaces pour empêcher sa récurrence.

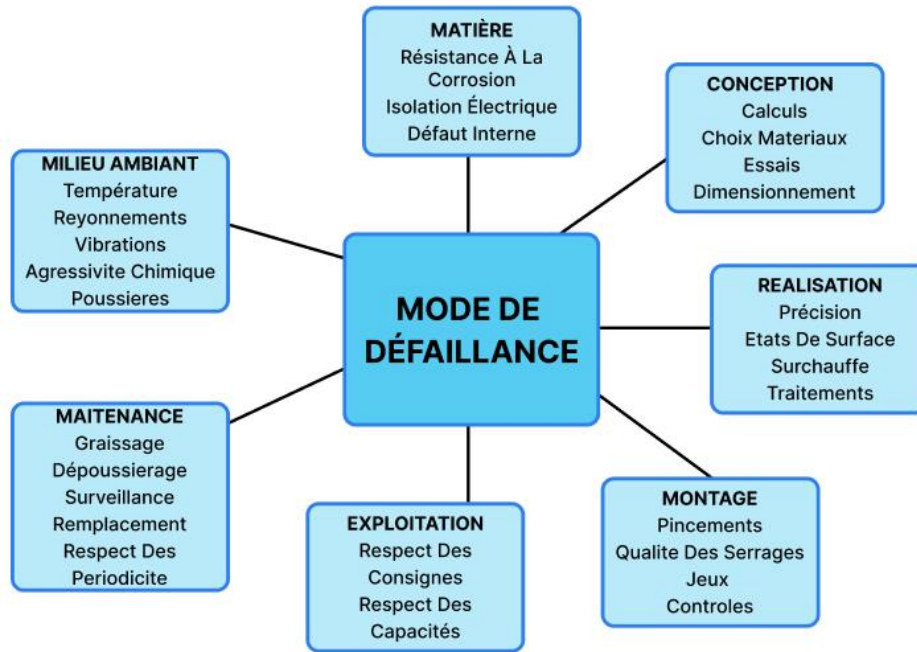


Figure II.4. Diagramme des Facteurs Influant sur les Modes de Défaillance [22]

La norme retient une liste de 33 modes de défaillance. (NF X60-510) [22]

TABLEAU II.2. Liste Complète des Modes de Défaillance.

Rep	MODES DE DEFAILLANCE
1	Défaillance structurelle ou rupture
2	Blocage physique ou coincement
3	Vibrations
4	Ne reste pas en position
5	Ne s'ouvre pas
6	Ne se ferme pas
7	Défaillance en position ouverte
8	Défaillance en position fermée

9	Fuite interne
10	Fuite externe
11	Dépasse la limite supérieure tolérée
12	Est en dessous de la limite inférieure tolérée
13	Fonctionnement intempestif
14	Fonctionnement intermittent
15	Fonctionnement irrégulier
16	Indication erronée
17	Ecoulement réduit
18	Mise en marche erronée
19	Ne s'arrête pas
20	Ne démarre pas
21	Ne commute pas
22	Fonctionnement prématuré
23	Fonctionnement après le délai prévu (retard)
24	Entrée erronée (augmentation)
25	Entrée erronée (diminution)
26	Sortie erronée (augmentation)

27	Sortie erronée (diminution)
28	Perte de l'entrée
29	Perte de la sortie
30	Court circuit (électrique)
31	Circuit ouvert (électrique)
32	Fuite (électrique)
33	Autres conditions de défaillance exceptionnelles suivant les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles

2.6 LES CAUSES DE DEFAILLANCE:

2.6.1 Généralités [22]

La cause de la défaillance une anomalie initiale susceptible de conduire au MODE DE DEFAILLANCE. Elle s'exprime en termes d'écart par rapport à la norme (sous dimensionnement, absence de joint d'écrou, manque de lubrifiant, etc.).

Le changement d'état du système suit un processus initié par la cause de défaillance.

Le système en état de fonctionnement contribue à l'obtention de la valeur ajoutée à partir d'une matière d'œuvre entrante et de données de contrôle (énergies, conditions d'exploitation, de conduite et de réglages, maintenance).

L'état de dysfonctionnement du système se manifeste par une erreur sur la valeur ajoutée, une augmentation des déchets et un affichage de messages de défauts.

Effet de la défaillance sur le système : panne, non qualité, cadence réduite, accident, etc. [22]

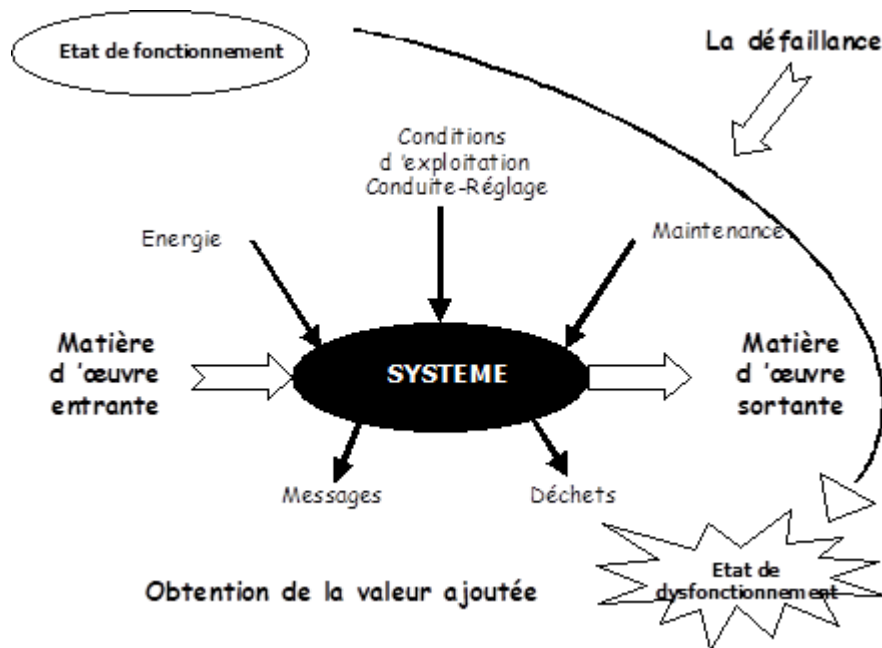


Figure II.5. Schéma des Causes de Défaillance Systémique[22].

2.6.2 Causes de défaillance du système [3]

Les causes de défaillance peuvent être externes ou internes au système.

1. Défaillances de causes intrinsèques ou inhérentes (définitions CEN)

« Intrinsèques » signifie qu'elles sont générées par le système lui-même, en condition Normale de fonctionnement. Parmi les causes intrinsèques, la norme CEN distingue :

« Défaillance due à une conception inadéquate du bien ».

« Défaillance due à une fabrication du bien non conforme à sa conception ou à des procédés de fabrication spécifiés ».

« Défaillance due à une installation incorrectement réalisée ».

2. Défaillances de causes extrinsèques (définitions CEN):

La norme CEN permet de distinguer :

« Défaillance de mauvais emploi, due à l'application de contraintes qui excèdent les capacités spécifiées du bien ».

« Défaillance par fausse manœuvre, due à une manipulation incorrecte du bien ou un manque de précaution ».

« Défaillance due à la maintenance, résultant d'une action inadaptée ou exécutée de façon incorrecte ».

« Défaillance secondaire », conséquence d'une autre défaillance en amont (en cascade).

D'une manière générale les causes de défaillance d'un élément (entité isolée) sont:

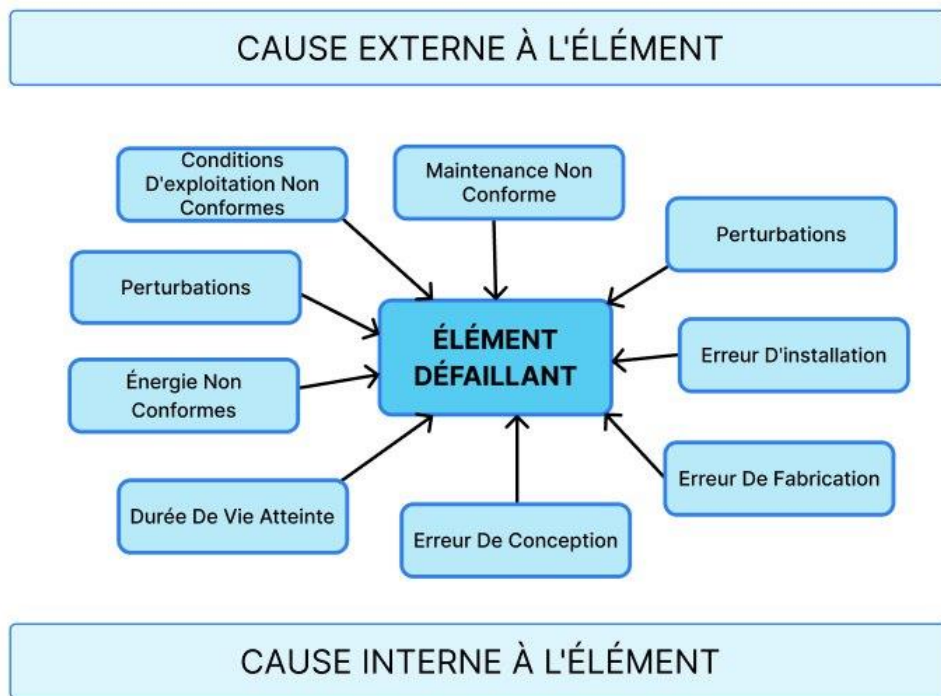


Figure II.6. Analyse des Causes Externes et Internes de Défaillance d'un Élément[22].

L'origine de la défaillance (cause de défaillance) agira sur un élément qui engendrera la défaillance d'une chaîne fonctionnelle puis du système. La défaillance provoque sur le système un effet. Le passage de la cause à l'effet est défini par le mécanisme de défaillance.

Dans la démarche de diagnostic, on part de l'effet de la défaillance sur le système puis on recherche les causes de défaillance.

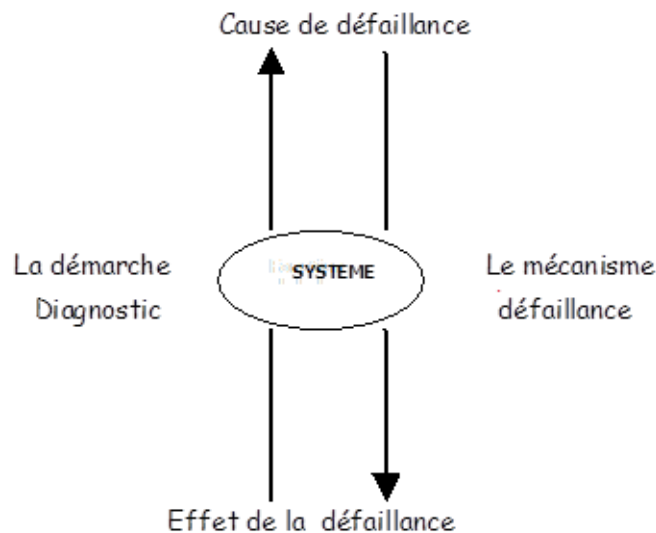


Figure II.7. Flux Causal des Défaillances dans un Système[22]

2.7 EVOLUTION D'UNE DEFAILLANCE [22]

INITIATION → PROPAGATION → RUPTURE

- **Initiation:** A l'initiation, se trouvent souvent un défaut « santé matière », un défaut de conception, de fabrication et / ou une cause extrinsèque (choc, surcharge fugitive).
- **La propagation:** s'opère par des modes de défaillance en fonctionnement, tels que la fatigue, l'usure, etc.
- **Rupture:** intervient généralement de façon accélérée ; consécutive à la propagation dans le temps ou de façon soudaine.

2.8 LES MECANISMES DE DEFAILLANCE [3]

Processus physiques, chimiques ou autres qui conduisent ou ont conduit à une défaillance.

2.8.1 Mécanismes de défaillance mécanique:

2.8.1.1 Défaillances mécaniques dues à la santé matière :

Il s'agit de défauts préexistants dans les pièces en service, et à l'origine d'initiations de défaillances lorsqu'ils ne sont pas détectés lors des contrôles de qualité. Les défauts apparaissent lors

de l'élaboration de la pièce (forgeage, fonderie, etc.), lors de la mise en forme de la pièce (usinage, soudures, traitements thermiques, etc.) et lors du montage (ex: choc sur roulement).

2.8.1.2 Défaillances mécaniques par détérioration de surfaces : fatigue et usure

- **L'usure:** est l'enlèvement progressif de matière à la surface des pièces d'un couple cinématique en glissement relatif.

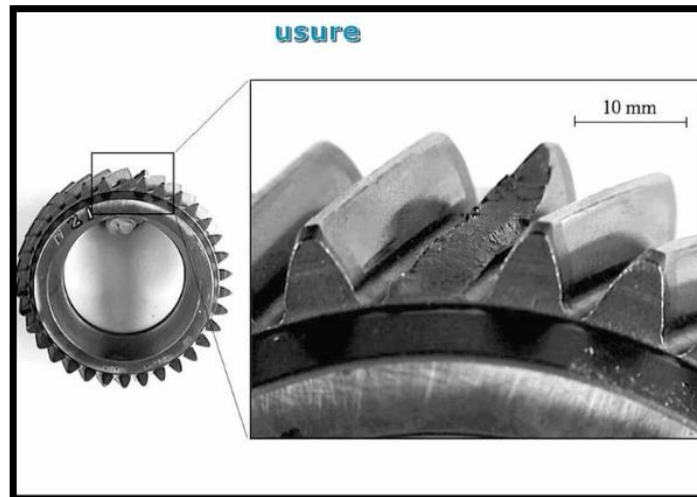


Figure II.8. Effet d'usure sur un engrenage[22]

- **Le fretting-corrosion:** ou usure par microdébattements, est une usure particulière apparaissant au contact de deux pièces statiques, mais soumises à de petits mouvements oscillants (vibrations, par exemple). C'est le cas de pièces frettées, des clavetages ou de roulements longuement à l'arrêt.



Figure II.9. Effet fretting corrosion [22]

- **L'écaillage:** est l'enlèvement d'assez grosses « écailles » de matière par fatigue de Contact.



Figure II.10. Ecaillage sévère sur une bague de roulement[22].

- **Le grippage:** est la soudure de larges zones de surface de contact, avec arrachement massif de matière.



Figure II.11. Grippage d'un talon de vis d'extrusion [22].

- **L'abrasion:** est l'action d'impuretés ou de déchets (poussières, sable, particules métalliques émises).

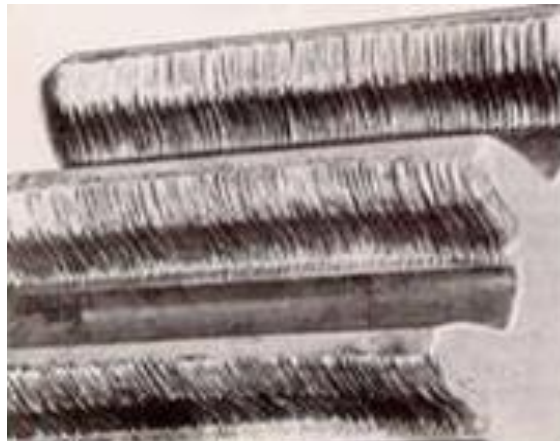


Figure II.12. Effet usure par abrasion [22].

- **La cavitation:** l'implosion de microbulles de gaz incondensables sous l'action d'une brutale chute de pression (accélération de la vitesse d'écoulement en régime turbulent) au sein d'un liquide. L'onde de choc génère du bruit et des « cratères » dans la zone de cavitation (sur hélices, rouets de pompes, etc.).



Figure II.13. Pompe centrifuge détruite par la cavitation [22].

- **L'érosion:** est l'enlèvement de matière par l'impact d'un fluide ou de particules solides en suspension, ou de phénomènes électriques (arcs).
- **Le faïençage:** est un réseau de craquelures superficielles dû à la fatigue thermique.

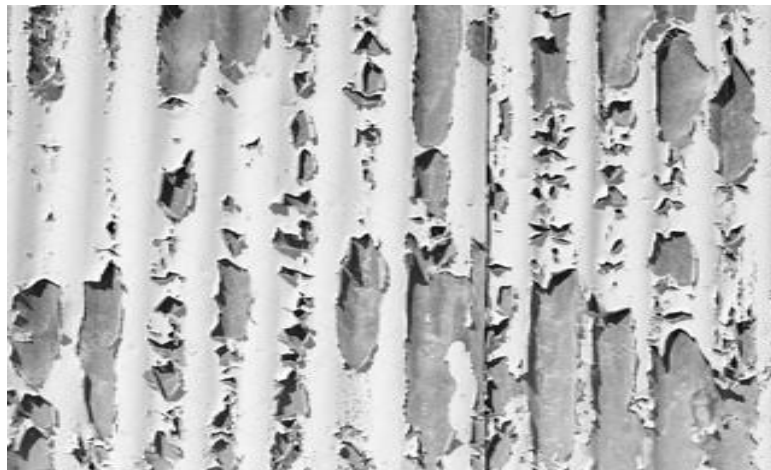


Figure II.14. Effet faïençage d'une peinture[22].

- **Le marquage:** est un enfoncement localisé dû à une charge ponctuelle.

- **Le rayage:** est la trace laissée par le passage d'un corps dur.



Figure II.15. Effet de rayage [22].

- **Fatigue:** c'est quand une pièce a atteint sa limite d'endurance. Il s'agit d'efforts (vibrations) alternés et répétés entraînant une rupture, même en dessous de la limite élastique du matériau.

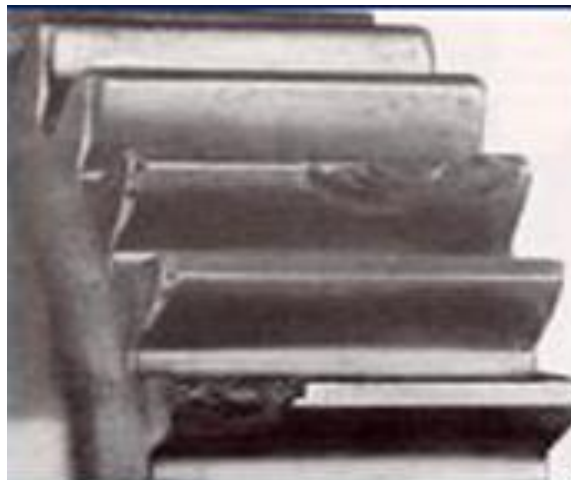


Figure II.16. Effet de la fatigue [22].

- **Fatigue thermique:** c'est une fatigue engendrée par des contraintes thermiques. Elle entraîne dilatations, déformations plastiques, brûlures ou fusion.

- **Frottement et usure:** Ce mode de défaillance est inexorable dès que deux surfaces en contact (couple tribologique) ont un mouvement relatif (plan/plan ou cylindre/cylindre). La tribologie est la science expérimentale qui étudie ces phénomènes.

Mécanisme de l'usure [21]

L'usure est un phénomène physique qui conduit à une perte de matière ou à une déformation du bien. L'usure est le résultat de deux pièces en mouvement qui provoque un échauffement qui se traduit par un arrachement de particules métalliques sur les deux surfaces en contact.

L'usure est un mode de **dégradation progressif** dont une des conséquences est l'augmentation des jeux de fonctionnement. C'est une **dégradation irréversible**.

Dans le temps, la loi d'usure peut se traduire par une courbe qui comprend trois phases:

- **Phase 1:** période de **rodage** qui se traduit par l'arasage des aspérités résultant de la nature des opérations de finition en fabrication,
- **Phase 2:** l'usure est **stabilisée**, elle est normale, le jeu de fonctionnement est pratiquement constant,
- **Phase 3:** période de **vieillessement** rapide avec augmentation du jeu de fonctionnement, échauffement et grippage éventuel.

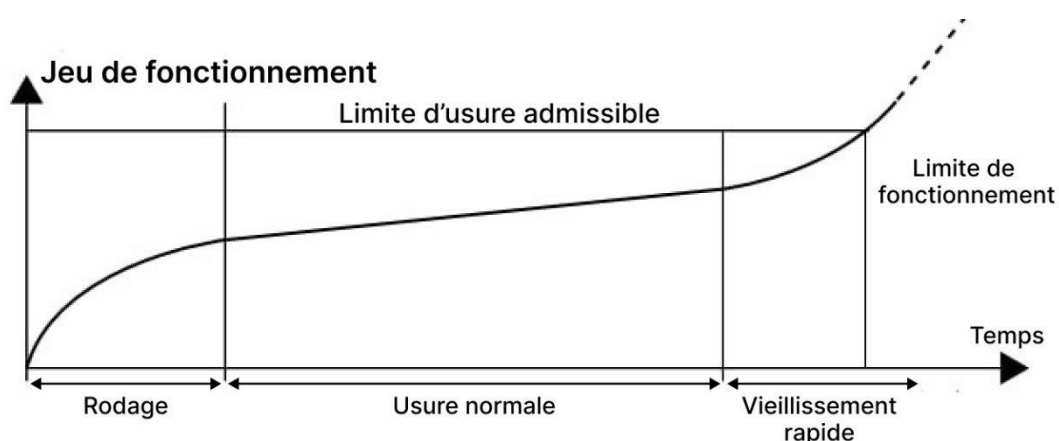


Figure II.17. Courbe d'usure[21]

2.8.2 Défaillances mécaniques par déformation plastique [3]

- **Déformation plastique sous contrainte mécanique:** Ces déformations dues à un dépassement de la limite élastique R_e (choc, surcharge) peuvent être locales (marquage, empreintes sur engrenage) ou étendues à un profil ou une section. Une inspection à ce stade d'apparition d'une striction (zone de diminution de la section) peut prévenir le risque d'une prochaine rupture.

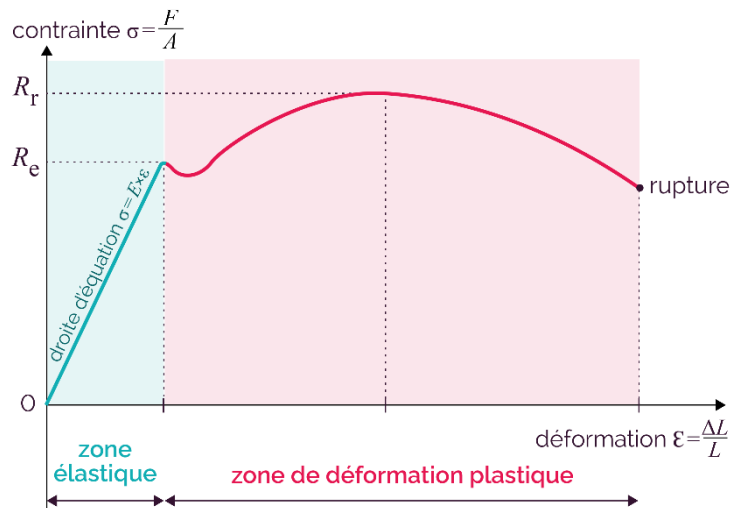


Figure II.18. Diagramme contrainte-déformation[23].

Sur le visuel ci-dessus:

- **La limite à la rupture R_r** correspond à la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai ;
- **La limite élastique R_e** marque la fin du domaine élastique. Au-delà de cette valeur, la pièce se déforme plastiquement.

- **Déformation plastique sous contrainte thermique et dans le temps:** fluage et relaxation

Fluage: est une déformation apparaissant sous contrainte mécanique associée à une température de service supérieure à $0,4 T_f$ (température de fusion), soit à partir de 450 °C pour les aciers. La vitesse de fluage peut être rapide (contrainte forte à température faible) ou lente (contrainte faible sous forte température).

Relaxation: est un détensionnement, par diminution lente de contrainte, postfluage, post-traitement thermique ou post-soudage.

2.8.3 Défaillances mécaniques par ruptures ductiles et fragile [3]

Les ruptures sont des phases finales d'évolution, de nature catalectique. Nommées **défaillances structurelles**, la maintenance doit les prévenir en phase de propagation. L'observation des faciès de rupture est un élément intéressant pour la compréhension du mécanisme de défaillance, donc pour le diagnostic et l'expertise.

Les deux modes principaux de rupture des matériaux à usage industrie, lors d'un changement statique, sont la rupture **ductile** et la rupture **fragile**.

- **Rupture ductile:** Elle survient après une phase de déformation plastique appréciable, allongement du matériau et striction au niveau de la rupture. Une inclusion est souvent à l'initiation de la défaillance.

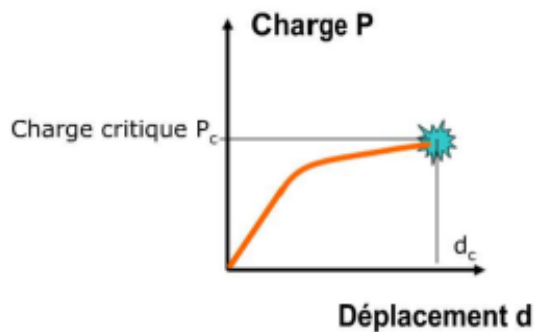


Figure II.19. Courbe Rupture ductile[24].

Une rupture ductile présente un aspect mat et terne avec texture fibreuse.

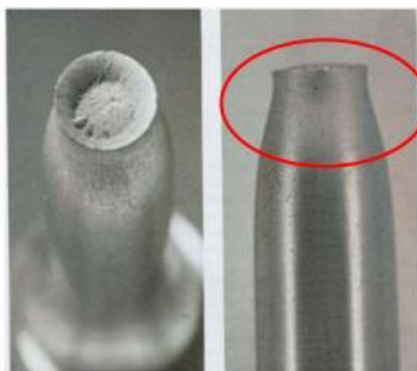


Figure II.20. Rupture ductile[24].

- **Rupture fragile:** Par opposition à la précédente, la rupture fragile survient après une très faible déformation plastique. Elle est souvent l'effet d'une surcontrainte brutale ou d'un choc, et elle est favorisée par un effet d'entaille ou par la fragilité intrinsèque du matériau. À l'échelle microscopique, la déchirure fragile peut être transcristalline (par décohésion suivant des plans de clivage perpendiculaires aux plans réticulaires) ou intercristalline (plans de clivage parallèles aux plans réticulaires).

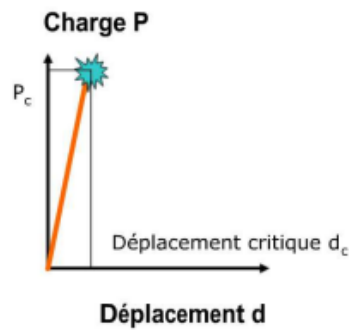


Figure II.21. Courbe Rupture fragile[24].

Une rupture fragile présente un aspect brillant à grain.

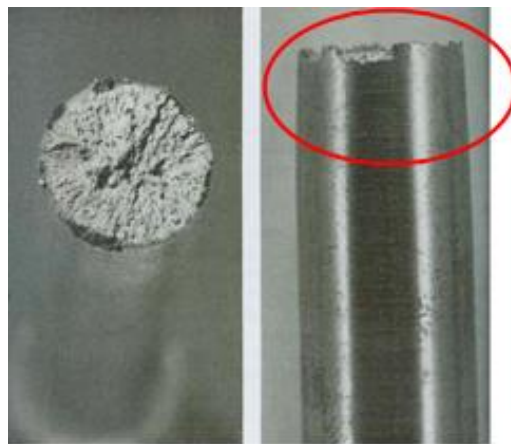


Figure II.22. Rupture fragile[24].

2.8.4 Défaillances mécaniques par corrosion:

Définition corrosion [25]

Interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs.

2.8.4.1 Les formes de corrosion[3]

- La corrosion électrochimique.
- La corrosion caverneuse.
- La corrosion par piqures.
- La corrosion galvanique.
- La corrosion bactérienne.
- La corrosion par aération différentielle.
- La corrosion inter cristalline.
- La corrosion sous tension.

2.8.5 Défaillances mécaniques des pièces plastiques et des composites[3]

Les pièces à base de polymères, généralement associées au sein des systèmes à des Pièces métalliques, ont des modes de défaillance semblables : usure, fatigue, rupture statique, fluage, etc. par contre, elles sont plus sensibles à l'influence du milieu ambiant : température, rayons ultraviolet, atmosphère, solvant, etc.

2.8.6 Défaillances mécaniques par vieillissement [21]

Mécanismes de vieillissement

Un mécanisme de vieillissement est le processus qui conduit progressivement à des changements des caractéristiques des systèmes, des composants et des éléments de structure et qui par ses effets conduit à leur vieillissement. Les processus physiques peuvent être d'ordre mécanique, chimique, microbiologique, radiologique, etc. Ces principaux mécanismes ont déjà été évoqués dans les paragraphes précédents.

2.8.6.1 Effets du vieillissement

L'effet du vieillissement se caractérise par la manifestation, au cours du temps, de changements globaux des propriétés physiques des systèmes, des composants et des éléments de structures (fragilisation par irradiation de l'acier d'une cuve d'une centrale nucléaire).

Pendant la durée de vie de l'entité, les facteurs influençant le vieillissement sont liés aux modes normaux de fonctionnement et aux erreurs commises pendant toutes les phases de sa durée de vie. Ces facteurs entraînent des dégradations ayant une évolution lente ou au contraire très rapide. La vitesse de l'évolution rend alors possible la classification des dégradations : dégradations, imputables ou non, au vieillissement. Les erreurs humaines rentrent dans la catégorie des erreurs commises.

2.9 MECANISMES DE DEFAILLANCE DES PARTIES « COMMANDE » (PC) [3]

2.9.1 Modes de défaillances relatifs à la logique câblée

2.9.1.1 Relais électromagnétiques

Leurs modes de défaillance les plus fréquents sont:

- Bobine de commande coupée, ou en court-circuit.
- Contacts soudés, collés fermés, érodés, corrodés ou « rebondissants ».
- Armature mobile bloquée.
- Défaut d'isolement d'un contact avec la carcasse métallique.

2.9.1.2 Composants électroniques passifs

Les résistances ne s'usent pas, mais peuvent subir des surintensités qui créent des coupures ou des courts-circuits. Leur valeur nominale peut être affectée par des variations thermiques.

Les condensateurs s'usent sous tension et ils sèchent hors tension (gare à l'allumage après arrêts prolongés). Les surcharges provoquent la rupture du diélectrique.

2.9.1.3 Composants électroniques actifs

Ce sont les transistors et les circuits intégrés, mais aussi les thyristors et les triacs pour les circuits de puissance. De par l'intégration de plus en plus poussée des technologies SSI, MSI, LSI, VLSI contenant des milliers de portes, la fiabilité d'un circuit intégré est plus à considérer collectivement qu'au niveau du composant.

Des tests de détection permettent de dire si le circuit est correct ou non. La localisation permet de situer le défaut au sein du composant.

Les mécanismes de défaillance concernent surtout les jonctions électronique (semiconducteurs thermosensibles) et se manifestent par des « collages » à 0 ou à 1 (valeurs logiques). Causes potentielles de défaillances:

- Les surcharges provoquent des pannes catalectiques par rupture de la jonction ;
- Les décharges électrostatiques et certains rayonnements peuvent perturber le fonctionnement (parasites) ;
- Les chocs thermiques dus à la répétition des « marche-arrêt » fragilisent la jonction par fatigue thermique ;
- Le fonctionnement à basse température crée un « emballement » thermique du semi-conducteur.

2.9.1.4 Conducteurs et connexions

La connectique est la source de bien des défaillances intermittentes ou fugitives qu'il faut suspecter et vérifier avant de chercher à localiser des défauts internes. La fiabilité des connecteurs (cosses, wrapping, soudures) devrait être au moins de même valeur que celle des technologies associées, en logique câblée ou programmée. Ce n'est pas toujours le cas.

La fiabilité opérationnelle de la connectique est dépendante des conditions de l'environnement (corrosion et vibrations principalement).

2.9.2 Modes de défaillances relatifs à la logique programmée

La logique programmée est par nature sensible aux perturbations énergétiques (surtension d'entrée), thermiques et surtout électromagnétiques de l'environnement. Dans un système programmable se retrouvent les composants actifs et passifs précédents, mais également des composants électroniques programmables, de fonction paramétrable et modifiable.

2.9.2.1 Défaillances des automates programmables et des calculateurs industriels

Un automate est plus vulnérable par son intégration à son environnement et par son utilisation que par ses faiblesses intrinsèques. L'unité centrale d'un automate (alimentation + UC + bus + mémoire) est particulièrement fiable (seulement 10 % des défauts) ; les problèmes viendront pour 90 % des coupleurs et des cartes d'entrée et de sortie (logique électronique câblée). La cause majoritaire de défaillance des cartes d'entrée vient de surtensions. Notons la maîtrise possible de l'effet d'une défaillance (interne, alimentation coupée, etc.) sur les sorties:

- Remise à zéro de toutes les sorties.
- Passage à un état prédéfini.

- Gel des sorties à leur dernier état « normal ».

Dans le cas des calculateurs, les claviers et les écrans cathodiques sont soumis à l'usure, et peuvent être blindés pour un usage à l'atelier.

2.9.2.2 Défaillances logicielles

Ce sont des défaillances humaines ayant pour cause un manque de rigueur (syntaxe), de logique ou d'attention (oublis).

2.9.3 Défaillances par incompatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un équipement à bien fonctionner dans son environnement électromagnétique, et sans produire lui-même de perturbations dans cet environnement (pollution électromagnétique).

Les perturbations se matérialisent sous forme de pannes fugitives ou de pertes de mémoire. Exemples d'appareils perturbateurs : les téléphones cellulaires, les détecteurs de métaux, les radars, etc.

2.10 CONCLUSION

En conclusion, ce chapitre donne une étude détaillée sur les mécanismes spécifiques des défaillances mécaniques, des pièces plastiques, des composites, et des parties "commande". Les mécanismes comme l'usure, la fatigue, la corrosion, et le vieillissement sont analysés en détail pour mieux comprendre les processus qui conduisent à la défaillance et proposer des solutions efficaces.

Il est essentiel de sensibiliser les techniciens de maintenance au fait qu'une défaillance n'est jamais une fatalité mais le fruit d'un mécanisme rationnel et explicable.

3 Chapitre 3 :Les Méthodes d'Analyse et de Modélisation de Diagnostic des Défaillances

3.1 INTRODUCTION

Parmi les facteurs qui contribuent au maintien et l'amélioration de la disponibilité et à la sûreté de fonctionnement des installations complexes, les méthodes d'analyse et diagnostic de défaillances qui représentent des leviers significatifs. Ces méthodes utilisées dans différents secteurs industriels sont très variées et tiennent compte de la spécificité des matériels qui constituent leurs procédés industriels.

Ce chapitre présente une exploration approfondie des diverses méthodes d'analyse et diagnostic des défaillances utilisées pour évaluer et améliorer les systèmes industriels.

3.2 ANALYSE DES DÉFAILLANCES [26]

L'analyse des défaillances dans le contexte industriel se divise en trois catégories principales qualitative, quantitative et prévisionnelle.

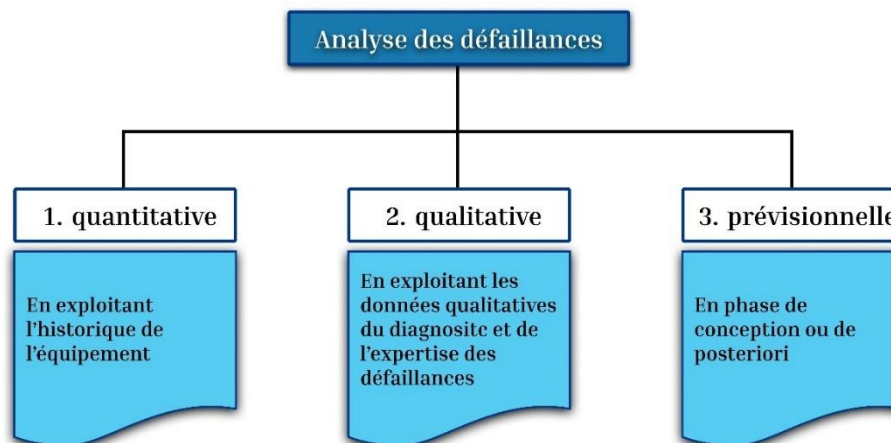


Figure III.1. Types d'analyse des défaillances[26].

3.2.1 Analyse quantitative des défaillances[26]

L'analyse quantitative des données historiques permet d'identifier des actions d'amélioration en détectant et en approfondissant les défaillances afin de les corriger et de les prévenir. En examinant

quantitativement les résultats des diagnostics, on ouvre ainsi la voie à des progrès significatifs. Les données chiffrées à saisir doivent être les suivantes: [23]

- **Dates des interventions correctives (jours, heures) et nombre N de défaillances:** ces éléments permettront de calculer les périodes de bon fonctionnement ($UT = \text{Up Time}$), les intervalles de temps entre deux défaillances consécutives ($TBF = \text{Time Between Failures}$) et leur moyenne ($MTBF$) ; ces données permettront de caractériser la fiabilité des équipements.
- **Temps d'arrêt de production: ($DT = \text{Down Time}$)** Les temps d'arrêt de production ($DT = \text{Down Time}$) consécutifs à des défaillances, y compris les "micro-défaillances", sont systématiquement consignés, même les plus anodins. Il est en effet plus facile de se rappeler d'une grosse panne que des micro-défaillances répétitives, qui peuvent à terme provoquer une défaillance grave. L'expérience montre que l'oubli de ces petites pannes fausse complètement une étude de fiabilité ultérieure. De plus, les micro-défaillances, bien que routinières et facilement oubliées, génèrent des pertes de disponibilité, une productivité moindre et une qualité réduite. Ces données permettront donc de caractériser la disponibilité des équipements.
- **Durées d'intervention de maintenance: ($TTR = \text{Time To Repair}$)** et leur moyenne ($MTTR$) sont consignées pour caractériser la maintenabilité des équipements.

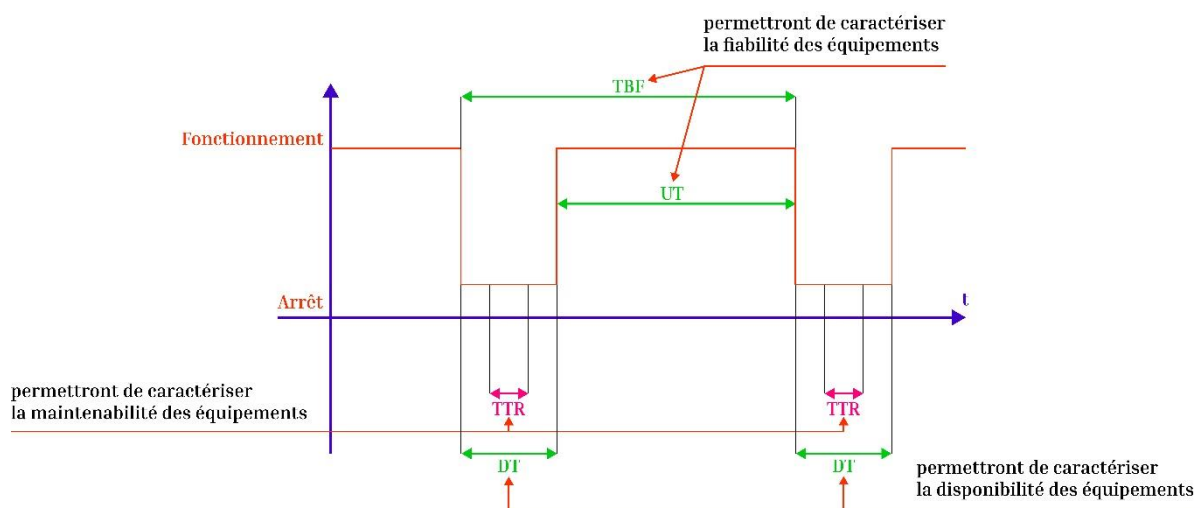


Figure III.2. Analyse des temps[26].

3.2.1.1 Loi de PARETO [27]

PARETO (1848-1923) était un socio-économiste italien qui étudia la répartition des impôts fonciers aux Etats-Unis. Il constata que 15% des contribuables payaient 85% des impôts fonciers. Il en tira une règle, celle des 85-15, et plutôt celle des 80-20 qui peut s'appliquer partout:

- 20% des routes ou des voies ferrées assurent 80% du trafic ;
- 20% des conducteurs provoquent 80% des accidents ;
- 20% des articles vendus représentent 80% du chiffre d'affaires.

En d'autres termes: « **une minorité des causes est responsable de la majorité des effets** ». On appelle loi de PARETO ou « loi des 80-20 » la règle de concordance que l'on trouve souvent entre:

- Le faible pourcentage d'éléments d'une population ou d'un échantillon donné,
- Le fort pourcentage que ces éléments représentent si l'on considère un de leurs caractères parti- culiers ou un critère donné.

3.2.1.2 Méthode ABC (Diagramme Pareto) [26]

Parmi les nombreuses préoccupations d'un responsable maintenance, il est essentiel de déterminer quelles défaillances doivent être étudiées et améliorées en priorité. Pour ce faire, il est nécessaire d'identifier celles qui sont les plus critiques et dont la résolution ou l'amélioration serait la plus rentable, notamment en termes de coûts d'indisponibilité. La difficulté réside dans le fait que ce qui est "important" et ce qui l'est "moins" ne se distinguent pas toujours de manière évidente.

La méthode ABC offre une solution efficace pour identifier les éléments les plus importants d'un problème, facilitant ainsi les choix et les priorités. Cette méthode consiste à classer les événements (comme les pannes) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêt, coût financier, nombre, etc.), chaque événement étant associé à une entité spécifique. Ensuite, un graphique est établi pour représenter les pourcentages de coûts cumulés en regard des pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Comme illustré dans la courbe figure III.3., on distingue trois zones. [23]

- Zone A: 20% des pannes occasionnent 80% des coûts.
- Zone B: les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires.
- Zone C: les 50% de pannes restantes ne concernent que 5% du coût global.

Conclusion: Il est évident que la préparation des travaux de maintenance doit se concentrer sur les pannes de la zone A.

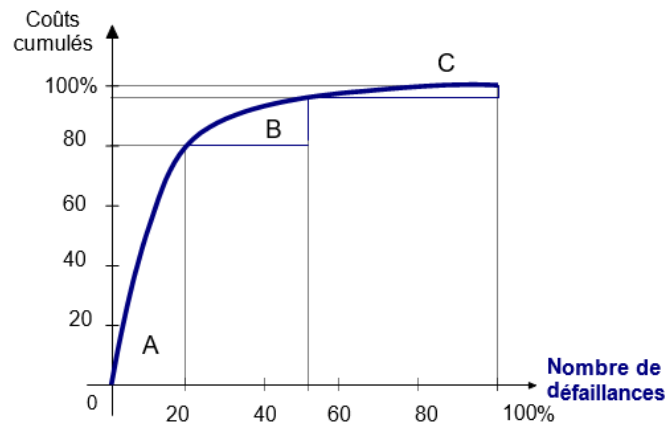


Figure III.3. La courbe ABC[26].

En maintenance, cette méthode est particulièrement utile pour déterminer les urgences ou les tâches les plus rentables, par exemple:

- Porter une attention particulière à la préparation des interventions sur les défaillances les plus fréquentes et/ou les plus coûteuses (documentation, procédures opératoires, contrats, ordonnancement, etc.).
- Identifier les causes et rechercher les améliorations possibles pour ces mêmes défaillances.
- Organiser le stock en fonction des fréquences de sortie des pièces (quantité de pièces et emplacement).
- Définir la politique de maintenance à appliquer à certains équipements en fonction des heures de maintenance et des coûts associés.

Remarque: cette méthode ne résout pas les problèmes, mais elle attire l'attention du technicien sur les groupes d'éléments à étudier en priorité.

1. Le diagramme de Pareto simple [3]

Le diagramme de Pareto simple (en bâton), dont la lisibilité facile en fait un bon outil de communication. Ce graphe montre la parenté existant avec la courbe ABC, qui fournit la même cible d'action prioritaire, mais de façon moins « visuelle ».

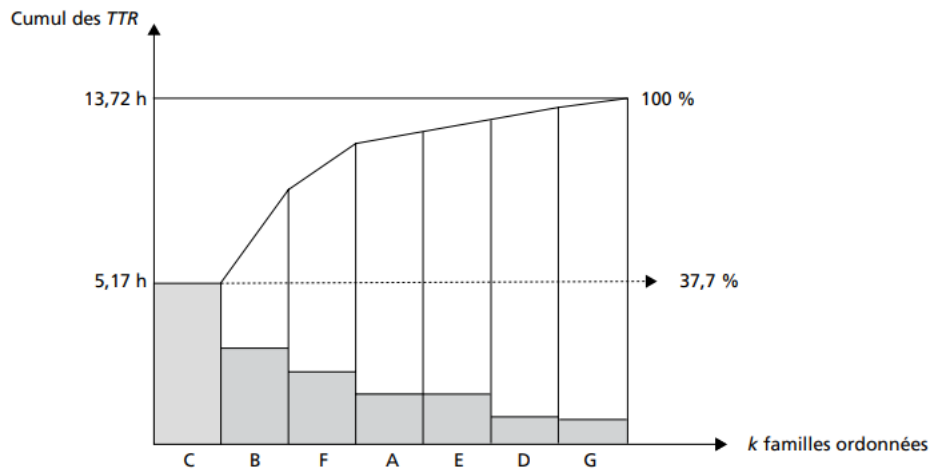


Figure III.4. Détermination des cibles d'action prioritaire[3].

2. Diagrammes de Pareto en N, Nt et \bar{t} [26]

Le service maintenance peut exploiter cette méthode en allant beaucoup plus loin:

- On dresse un tableau regroupant les sous-ensembles, le nombre de défaillances N, les temps d'arrêt par sous-ensemble Nt et la moyenne des temps d'arrêt \bar{t} TABLEAU III.1.
- On élabore les diagrammes en bâtons N, Nt et \bar{t} , ils permettront de déterminer la priorité de prise en charge des sous-ensembles par le service maintenance.
- Le graphe en N est un indicateur de non fiabilité.
- Le graphe en Nt est un indicateur de non disponibilité.
- le graphe en \bar{t} est un indicateur de non maintenabilité.

TABLEAU III.1. Tableau en N, Nt et \bar{t} [26].

Sous-ensembles	N	Nt	\bar{t}
A	4	26,5	6,625
B	15	11	0,73
C	4	1	0,25
D	4	57	14,25
E	3	56,5	21,83
F	8	1	0,125
G	12	17	1,42
H	2	1,5	0,75
I	3	9,5	3,17
J	2	1	0,5

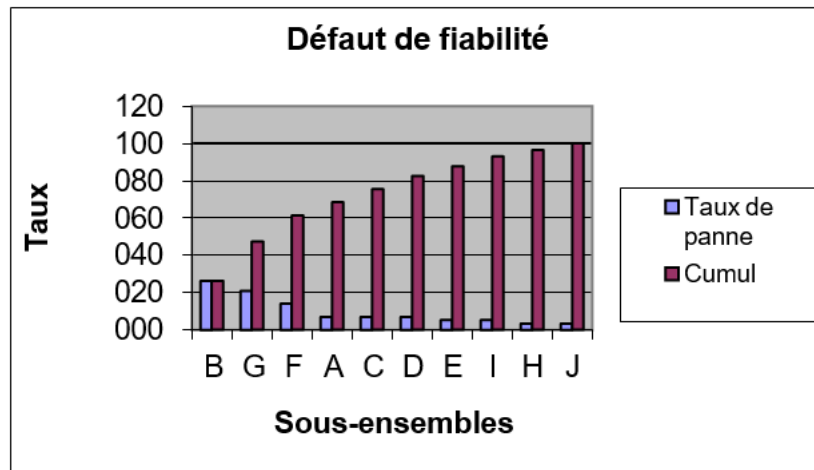


Figure III.5. Mise en évidence des éléments les moins fiables[26].

Le graphe en N (Figure III.5) indique des orientations pour améliorer la fiabilité : on constate ici que les sous-ensembles B et G nécessitent des actions prioritaires. Plusieurs mesures peuvent être envisagées : modifications techniques (amélioration de la qualité des composants), consignes de conduite, surveillance accrue (maintenance de ronde), actions préventives systématiques dans un premier temps, puis conditionnelles par la suite.

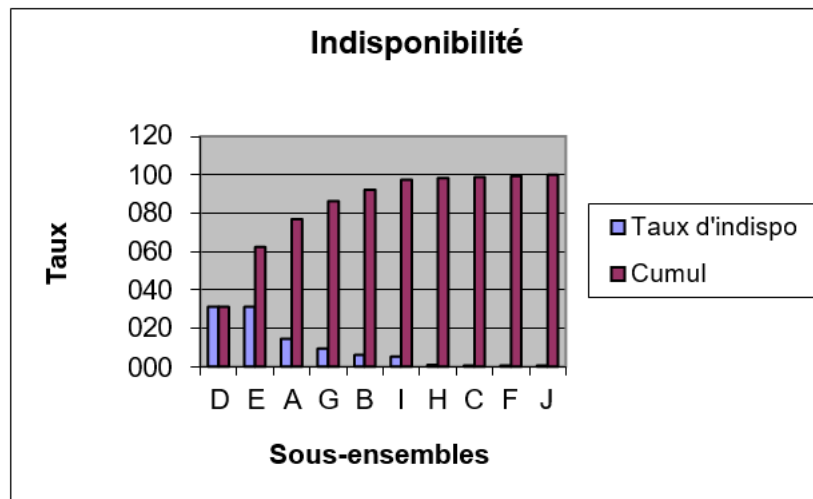


Figure III.6. Mise en évidence des éléments les moins disponibles[26].

Le graphe en Nt (Figure III.6) estime la perte de disponibilité de chaque sous-ensemble. Il permet ainsi de déterminer l'ordre de prise en charge des types de défaillances en fonction de leur criticité, en mettant ici l'accent sur les sous-ensembles D et E.

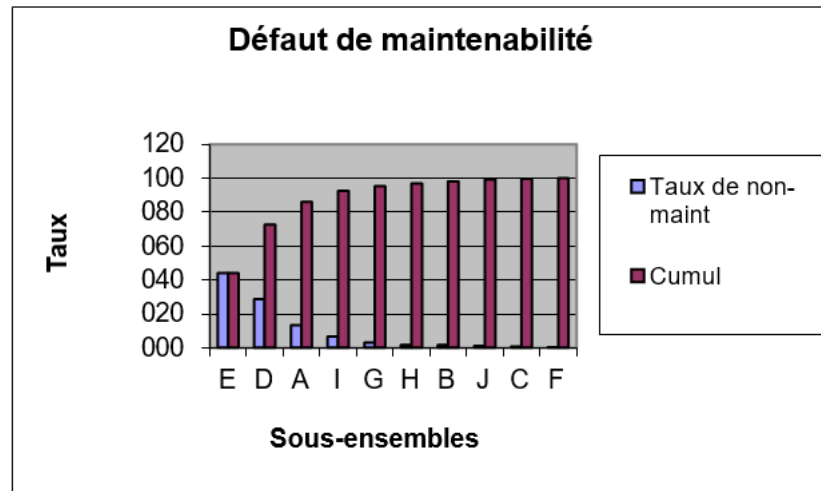


Figure III.7. Mise en évidence des éléments les moins maintenables[26].

Après analyse de t^- (Figure III.7) (attente maintenance, déplacements, temps de diagnostic, attente de pièce, etc..), il sera possible d'agir sur:

- La logistique (moyens de dépannage, de manutention, etc..) ;
- L'organisation de la maintenance (gammes d'intervention, formation du personnel, échanges standard, etc..) ;
- L'amélioration de la maintenabilité (accessibilité, conception modulaire, etc..).

3.2.1.3 Abaque de Noiret [27]

L'abaque de Noiret est un outil de calcul scientifique qui permet d'orienter le choix de la politique de maintenance en fonction:

- Des caractéristiques de l'équipement
- De son utilisation

Le résultat en est une recommandation offrant 3 options possibles:

- Préventif recommandé;
- Préventif possible;
- Préventif non nécessaire .

Cependant, ce résultat doit être complété par une analyse économique portant sur le coût des différentes maintenances et sur le retour sur investissement estimé que peut apporter une maintenance préventive.

Remarque:

Il ne s'agit que d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de décision.

L'abaque de Noiret est basé sur les critères suivants:

- L'âge de l'équipement;
- Son interdépendance : dans quelle mesure est-il vital pour la production ;
- Son coût;
- Sa complexité et son accessibilité ;
- Sa robustesse et sa précision ;
- Son origine;
- Son utilisation dans le temps ;
- Les conséquences de ses défaillances sur les produits ;
- Les délais de production qui lui sont liés .

Chaque critère se décline en plusieurs options qui chacune correspond à un certain nombre de points.

Les points ainsi obtenus sont additionnés. (Voir annexe)

3.2.1.4 Tableau à coefficient [26]

Basé sur les mêmes critères que l'abaque de Noiret, mais avec des coefficients de points, le total des points obtenus se situe dans trois zones distinctes:

- Première zone, en dessous de 500 points: le préventif n'est pas nécessaire.
- Deuxième zone, entre 500 et 540 points: le préventif est envisageable.
- Troisième zone, au-dessus de 540 points: le préventif est indispensable. (Voir annexe)

3.2.2 Analyse qualitative des défaillances

3.2.2.1 Diagnostic et expertise

3.2.2.1.1 Définition de diagnostic [28]

L'interprétation du mot diagnostic possède de nombreuses significations suivant les interlocuteurs auxquels on s'adresse : le diagnostic financier d'une entreprise, le diagnostic médical s'intéressera à déterminer une maladie pour en identifier les causes. Le diagnostic industriel, quant à lui pour objet de trouver la cause d'une défaillance.

Selon la norme AFNOR « Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. »

Le diagnostic est un des facteurs contribuant à la disponibilité de l'outil de production. La disponibilité est une des composants de la sûreté de fonctionnement qui peut se décliner en termes de **fiabilité**, **maintenabilité** et **sécurité** (Figure III.8).

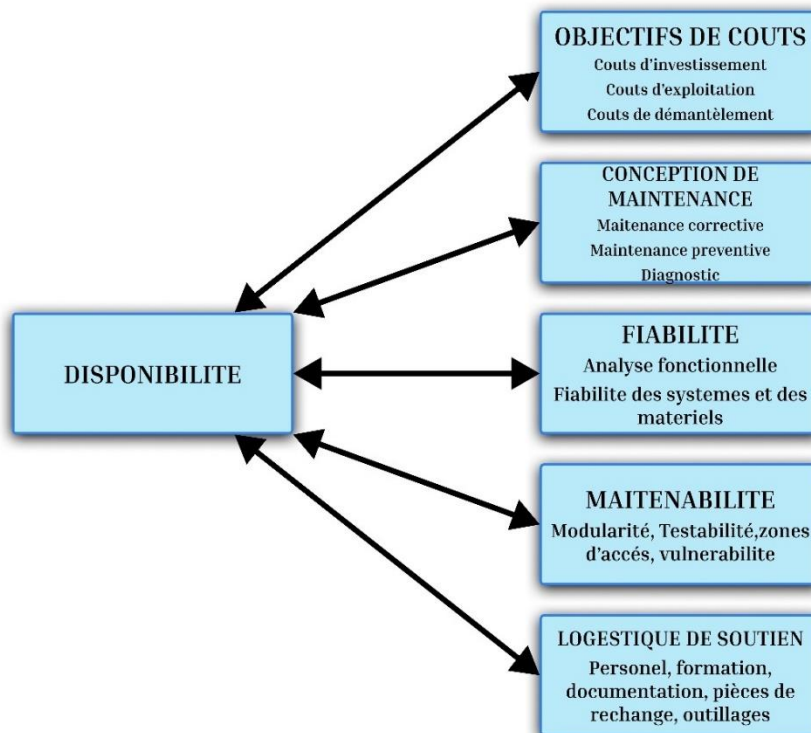


Figure III.8. Diagramme des composants de la disponibilité[28].

3.2.2.1.2 L'expertise [28]

L'expertise est une démarche plus approfondie qui permet de comprendre les mécanismes d'une défaillance intrinsèque, c'est-à-dire les processus chimiques, physiques, métallurgiques ou autres, qui sont en amont de l'arbre des causes.

L'expertise suppose la mise en œuvre de moyens d'investigation qui peuvent être lourds, donc centralisés dans des laboratoires spécialisés (CETIM pour la métallurgie, LCE pour l'électronique, laboratoires intégrés pour certains groupes industriels tels que EDF), associée à des compétences approfondies sur le champ des « phénomènes pathologiques ».

3.2.2.1.3 L'objectif du diagnostic [28]

L'objectif du diagnostic consiste à résoudre le problème inverse de la relation « cause à effet » en connaissant, au préalable, l'effet par ses symptômes observables. Le diagnostic est une phase cruciale de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépendent l'efficacité et la rapidité de l'intervention entreprise.

3.2.2.1.4 Diagnostic de panne [1]

Ensemble des actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause (norme NF EN 13306).

3.2.2.1.5 Démarche de diagnostic de panne [1]

La figure 9 représente la procédure de diagnostic de défaillance et de dégradation susceptibles d'affecter les différentes entités d'un processus industriel s'articule autour des étapes suivantes.



Figure III.9. La démarche de diagnostic de panne[1].

- 1) **Détecter la défaillance:** dans beaucoup de cas, la défaillance n'est pas totale et/ ou reste cachée. Il faut la détecter le plus précocement possible.
- 2) **Localiser la défaillance:** Il s'agit de déterminer l'élément maintenable défaillant. Cet élément peut être un ensemble ou un composant.
- 3) **Connaître ses effets:** connaître les effets sur la fonction principale, la sécurité, l'environnement, la qualité, le cout, etc...
- 4) **Connaitre sa nature:** déterminer la nature de défaillance (électrique, électronique, mécanique: usure, fissure, déformation, corrosion, rupture, etc. ...)
- 5) **Déterminer la cause racine:** déterminer la cause première de la défaillance parmi toutes celles identifiées.
- 6) **Identifier les solutions:** déterminer les solutions pour éliminer la défaillance partant de la connaissance de la cause première.
- 7) **Déterminer l'action efficiente:** déterminer parmi toutes les solutions celle qui est efficace et économique.
- 8) **Appliquer la solution:** appliquer la solution adoptée en utilisant des moyens techniques, organisationnels et méthodologiques
- 9) **Vérifier les résultats:** vérifier l'efficience de la solution selon plusieurs critères techniques et économiques.

3.2.2.2 Classification des méthodes de diagnostic [28]

Les méthodes de diagnostic de défaillance et de dégradation utilisées dans les différents secteurs industriels sont très variées et tiennent compte de la spécificité des matériels qui constituent leurs procédés industriels. Si la prise de décision conduit à déclarer le processus défaillant, il convient alors de sélectionner une méthode de diagnostic.

La taxinomie des méthodes de diagnostic permet une classification en deux grandes familles: **les méthodes internes et externes** et les **méthodes inductive et déductives**.

3.2.2.3 Les méthodes internes et externes [28]

❖ Les méthodes internes

Ce type de méthodes est principalement dérivée des techniques utilisées par les automaticiens. A partir de modèles physiques ou de comportement valides par les techniques d'identification de

paramètre, il devient possible de mettre en œuvre la méthode du problème inverse. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type « boîte noire ».

Elles impliquent une connaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement valides expérimentalement avant toute utilisation industrielle.

Les méthodes de diagnostic internes se regroupent en trois grandes familles :

- La méthode du modèle;
- Les méthodes d'identification de paramètres ;
- Les méthodes d'estimation du vecteur d'état.

❖ **Les Méthodes externes**

Au sens strict, ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience.

Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et/ou les approches probabilistes. Au sens large elle inclut:

- La reconnaissance des formes;
- Les systèmes experts;
- Les réseaux de neurones artificiels.

3.2.2.4 Les méthodes inductives et déductives [28]

La deuxième classification que l'on peut établir est basée sur le mode de raisonnement utilisée pour remonter à la cause de la défaillance.

❖ **Les méthodes inductives**

Ces méthodes correspondent à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable.

❖ **Les méthodes déductives**

Pour ces méthodes, la démarche est bien sûr inversée puisque l'on part de l'événement indésirable et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles.

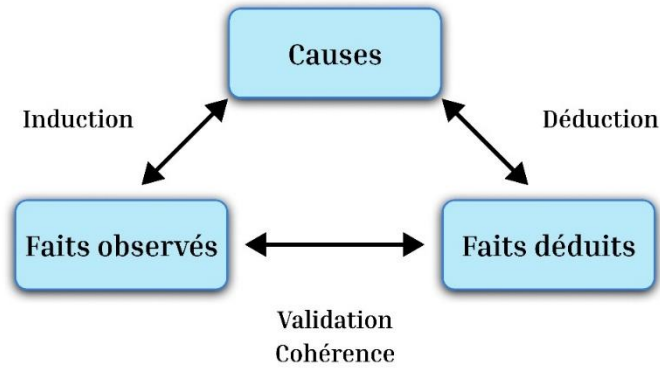


Figure III.10. Méthodes inductives et déductives[1].

Le diagramme ci-dessous résume les méthodes de diagnostic (Figure III.11).

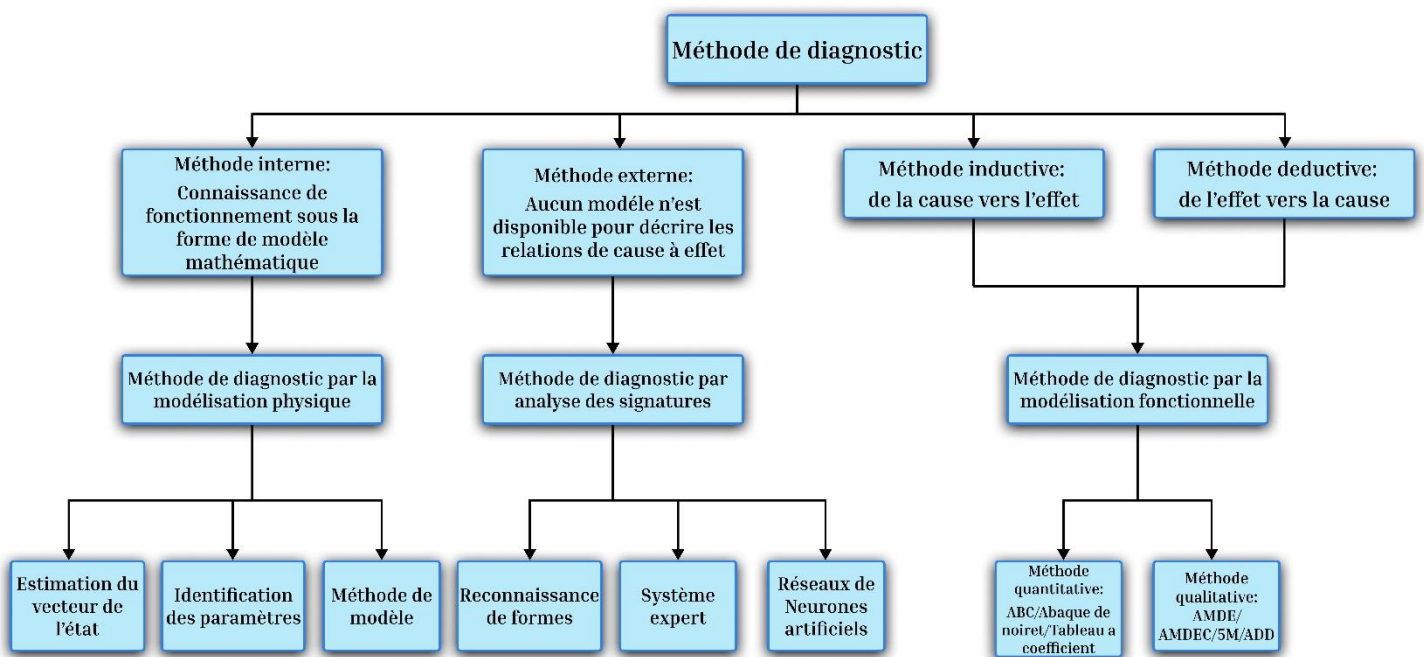


Figure III.11. Classification des méthodes de diagnostic.

3.2.2.5 Diagnostic et système expert [28]

3.2.2.5.1 Historique

L'intelligence artificielle est presque aussi vieille que l'informatique. L'I.A. a fait son entrée dans le domaine industriel dans les années 80, Elle comporte deux objectifs principaux de recherche : comprendre l'homme et simuler ses activités. Le premier objectif est certainement le plus ambitieux

et le plus délicat car il étudie les différents aspects de l'intelligence et fait appel à des compétences très multidisciplinaires telle que la logique, la linguistique, la physiologie, etc...

Le second objectif est d'ordre plus technique et consiste à étudier les moyens informatiques nécessaire à la simulation du comportement humain. C'est en particulier le domaine de prédilection du diagnostic industriel où il s'agit de reproduire des attitudes et des raisonnements jugés, intelligents dans un domaine donné.

3.2.2.5.2 Système expert

Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et du raisonnement d'un (ou plusieurs) spécialiste (s) de ce problème.

Les systèmes experts sont utilisés de façon privilégiée dans les domaines où l'homme manipule des informations factuelles, des données partielles et des stratégies de raisonnement.

Le système expert doit fournir des réponses associées à une situation donnée sachant que la complexité du domaine étudié ne permet pas d'établir à priori toutes les configurations possibles des situations.

3.2.2.5.3 Architecture d'un système expert

Un système expert est constitué de plusieurs éléments principaux qui sont :

- **La base de faits:** qui au départ contient les informations initiales relatives au domaine et qui s'enrichit progressivement de conclusions ou de nouveaux faits déduits par le moteur d'inférences.
- **La base de connaissances:** qui rassemble les connaissances nécessaires à la résolution des problèmes du domaine.
- **Le moteur d'inférences:** qui exploite de façon indépendante les informations contenues dans la base de faits et la base de connaissances pour fournir une solution au problème donné. Le moteur d'inférences produit lors de son mécanisme de raisonnement de nouveaux faits qui sont mémorisés dans la base de faits.
- **Les modules d'interface:** pour la consultation et la mise à jour du système expert. Le module de consultation est dédié à un dialogue homme machine proche du langage naturel. Le module de développement est réservé à l'introduction de nouvelles connaissances dans la base de connaissances.

L'architecture générale d'un système expert est représentée sur la figure III.12.

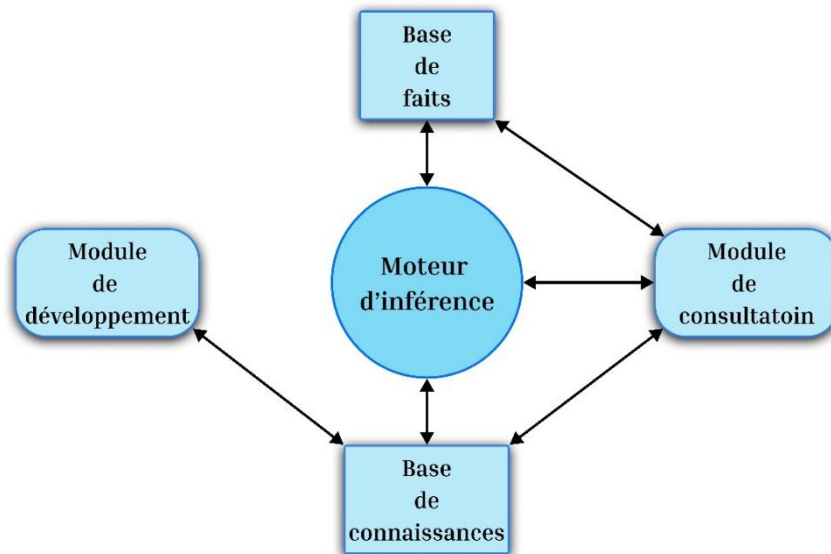


Figure III.12. Architecture d'un système expert[28].

3.2.2.6 Quand créer un système expert ? [27]

Il y a plusieurs raisons pour vouloir créer un système expert.

A. Raisons liées aux connaissances

- **Grande quantité de connaissances:** un tel système permet de stocker une quantité de connaissances qui demanderait, par un stockage traditionnel papier, un volume plus important. L'informatique permet également une consultation plus rapide des dites connaissances.
- **Connaissances évolutives:** il est plus aisé de modifier un fichier sur support informatique que sur support papier.

B. Raisons liées aux raisonnements

- Lorsque l'équipement devient trop complexe pour être diagnostiqué par un système algorithmique (durée de traitement trop importante).
- Lorsque la prévision par calcul ne permet plus d'obtenir le résultat voulu : il est nécessaire de prévoir en interprétant les informations dont on dispose.

- Lorsque pour comprendre et remédier définitivement à une cause de défaillance, il est intéressant de connaître les étapes du raisonnement pour bien mettre en évidence l'élément en cause.

C. Raisons liées à l'homme

- Le système expert est ciblé sur un équipement en particulier, il n'a pas de problème de confusion des connaissances due à une multiplicité des équipements à traiter.
- Il permet de concentrer en un seul point l'expérience de plusieurs personnes compétentes dans un domaine précis.
- Il facilite la rotation du personnel et donc l'expert n'est plus le seul détenteur du savoir et du savoir-faire. Toutes personnes peuvent utiliser le système expert et donc mettre à la portée des utilisateurs les connaissances de l'expert.

3.2.2.7 Avantages et inconvénients des systèmes experts [28].

Comme toutes les nouvelles technologies, les systèmes experts ont été l'objet d'une médiatisation qui les a mis au-devant de la scène pour tenter de résoudre tous types de problèmes. Avec le recul du temps et la confrontation à la réalité, les systèmes experts ont trouvé leur domaine d'équilibre en matière d'applications.

En particulier, dans le domaine du diagnostic industriel, l'apparition de générateurs de systèmes experts, couplés avec des modules conviviaux de dialogue, permet aisément de capitaliser la connaissance pour le diagnostic de matériels simples (dépannage automobile, électroménager...). Par contre, pour les systèmes industriels complexes, le cycle de vie d'un système expert implique la mise en place d'une équipe qui doit être capable d'exploiter et de maintenir sa pérennité. L'expérience montre que, dans ce cas, il est indispensable d'engager une étude technico économique pour passer du stage du concept du système expert à sa phase d'implantation opérationnelle réelle.

D'autre part, il faut être très vigilant aux freins psychologiques et sociologiques que l'on peut rencontrer lorsque l'on envisage de recueillir et d'exploiter les connaissances d'un expert possédant une vraie expertise.

Pour conclure sur l'aspect le plus important, soulignons encore une fois que la valeur d'un système expert dépend principalement de la richesse de sa base de connaissances.

3.2.2.8 Méthodes d'analyse qualitatives

3.2.2.8.1 Diagramme causes-effets (Ishikawa) [29]

C'est un outil permettant de visualiser et d'identifier de façon ordonnée les causes possibles d'un effet constaté que l'on cherche à analyser, et donc de déterminer les moyens pour y remédier. Le diagramme « causes / effet » est aussi appelé diagramme en arête de poisson, arbre des causes ou diagramme d'Ishikawa, du nom de son inventeur : le japonais Kaoru Ishikawa.

C'est la représentation graphique d'une méthode d'analyse dite méthode des « **5M** » (abréviation de Main d'œuvre, Matériel, Matière, Méthodes, Milieu ou Maintenance ou Management ou Mercatique) destinée à mettre en évidence les liens de causalité entre les éléments conduisant à un même effet. Il est utilisé pour la maîtrise de la qualité et est souvent employé par les cercles de qualité pour ordonner des idées émises lors d'une séance de remue-méninges (brainstorming). Il est utilisé également pour les études concernant la maintenance, la fiabilité et la sécurité (méthode AMDEC).

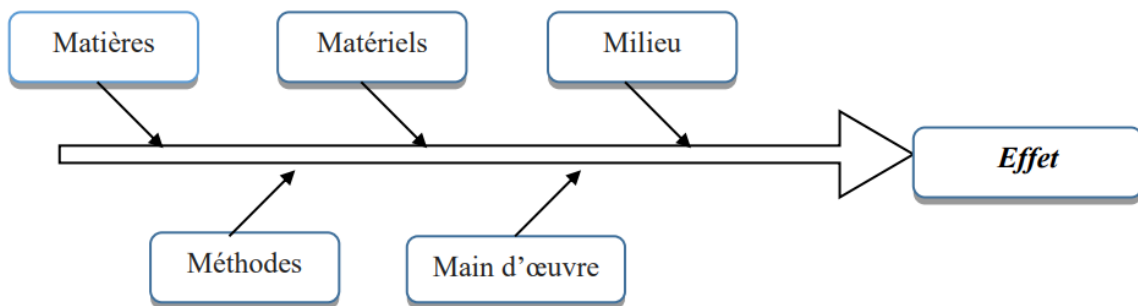


Figure III.13. Forme générale des diagrammes Ishikawa[29].

Pour favoriser la recherche, la méthode des 5M est couramment utilisée. Elle permet d'orienter la réflexion vers les 5 domaines, desquels sont généralement issues les causes. Toute autre organisation mieux adaptée au problème peut, bien entendu, être utilisée.

- **Machines:** c'est tout ce qui nécessite un investissement, du matériel, des locaux, du gros outillage.
- **Main d'œuvre:** c'est l'ensemble du personnel
- **Méthodes:** ce sont les gammes, les modes d'emploi, les notices, les instructions écrites ou non.
- **Matières:** c'est tout ce qui est consommable (les matières premières, les fluides, les énergies).

- **Milieu:** c'est l'environnement physique et humain. Les conditions de travail, l'ergonomie, les relations, les clients, problèmes de fournisseurs.

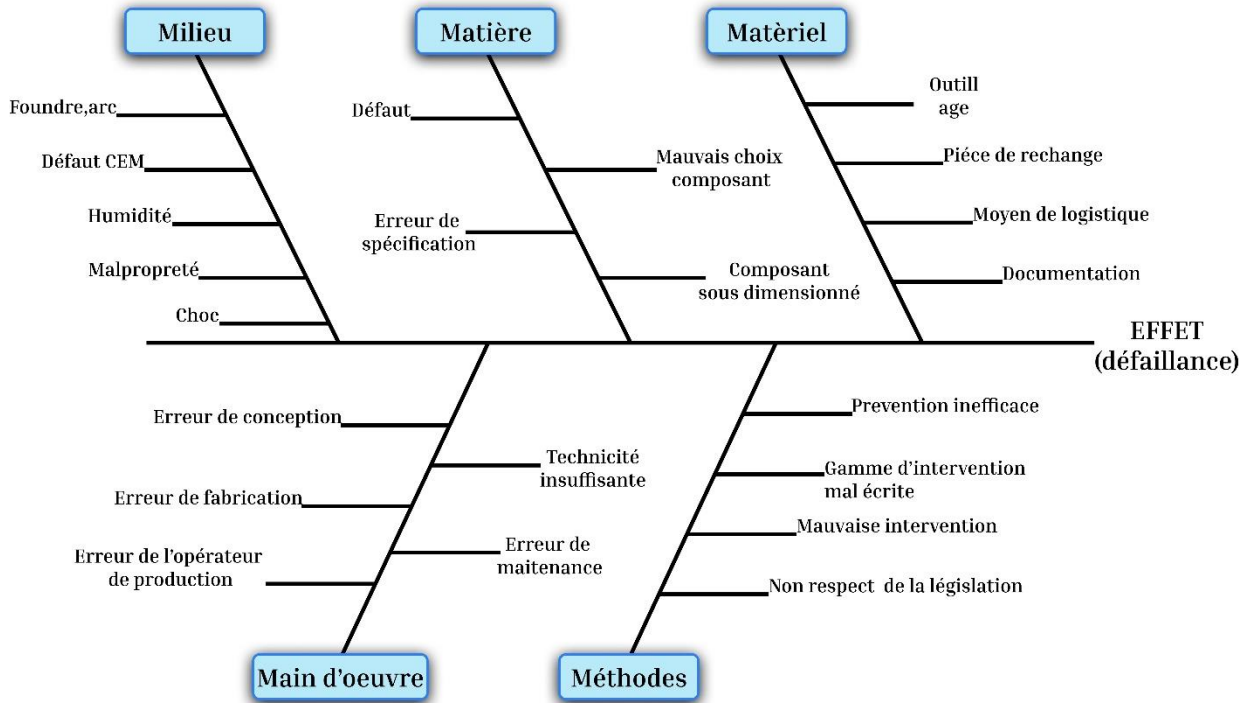


Figure III.14. Diagramme causes-effet (les 5M issus du diagramme d'Ishikawa) [27]

3.2.2.8.2 Tableau causes-effet [30]

Il se présente sous la forme d'un tableau à deux entrées : les effets sont des évènements constatables liés au fonctionnement et les causes les faits à partir desquels se produit où se manifeste l'effet. Il est préférable, en maintenance, d'agir sur la cause plutôt que sur l'effet.

La figure III.15 montre un exemple d'un mauvais fonctionnement d'une installation hydraulique (effet constate sur le récepteur).

	Causes	Effets
	La pompe ou le moteur sont endommagés ou usés.	La pompe n'aspire pas.
	Le moteur ne fonctionne pas.	Le moteur tourne dans le mauvais sens.
	L'accouplement pompe/moteur est défectueux.	Le distributeur est défectueux.
	Le limiteur de pression est déréglé.	La viscosité du fluide est trop élevée.
	La valve de réglage du débit est mal réglée.	Le récepteur est défectueux (vérin-moteur).
	Fuite externe dans le circuit.	Présence d'air dans le circuit.
	Fluide contaminé.	Mauvaise lubrification des effecteurs.
Pas de mouvement	●	●
Mouvement trop lent	●	●
Mouvement irrégulier	●	●
Mouvement trop rapide		●

Figure III.15. Tableau causes-effet d'une installation hydraulique[30].

3.2.2.9 Arbre de défaillances

1. Historique et domaine d'application [29]

L'analyse par arbre des défaillances fut historiquement la première méthode mise au point en vue de procéder à un examen systématique des risques. Elle a été élaborée au début des années 1960 par la compagnie américaine « Bell Téléphone » et fut expérimentée pour l'évaluation de la sécurité des systèmes de tir de missiles.

Visant à déterminer l'enchaînement et les combinaisons d'évènements pouvant conduire à un événement redouté pris comme référence, l'analyse par arbre des défaillances est maintenant appliquée dans de nombreux domaines tels que l'aéronautique, le nucléaire, l'industrie chimique, etc.

2. Principe [2]

L'analyse par arbre de défaillances est une méthode de type déductive (de l'effet vers ses causes) a pour objet la recherche de toutes les combinaisons de défaillances élémentaires pouvant aboutir à un événement redouté, parfois identifié par une AMDEC.

À partir de cet « événement sommet » (redouté), on construit une arborescence représentant l'enchaînement logique des « événements intermédiaires » jusqu'à la mise en cause des « événements élémentaires » (défaillance d'un composant). Cela par utilisation du symbolisme logique de l'algèbre de Boole.

3. Objectives de l'AdD [31]

L'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches.

L'analyse des arbres de défaillance a des objectifs dans la prise de décision, énumérés ci-dessous :

- Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur ;
- Empêcher l'événement le plus important car il s'agit d'un outil pro-actif ;
- Suivre les performances du système ;
- Minimiser et optimiser les ressources de danger ;
- Aider à la conception du système ;
- Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic.

4. Représentation graphique de l'AdD [31]


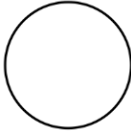
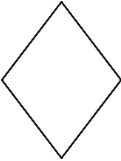

La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à l'aide de symbolisation graphique classée en:

- Evènements;
- Portes logiques;
- Symboles de transfert.

a) Evènements [32]

Le but de symbolisation graphique des évènements est de faciliter la désignation entre les différents types d'évènements.

TABLEAU III.2. Symboles des évènements dans l'AdD[31].

Symbole	Signification
	Evènement redouté ou évènement intermédiaire.
	Evènement élémentaire(limite de l'étude).
	Evènement non développé.
	Evènement de condition.

❖ **Évènement redouté**

L'évènement redouté est l'incident indésirable dont nous examinons toutes les causes conduisant à sa survenue. Cet évènement, unique pour un arbre de défaillances, se situe au "sommet" de l'arbre.

Avant de débiter la décomposition permettant d'explorer toutes les combinaisons d'évènements menant à l'évènement redouté, il est crucial de définir précisément cet évènement ainsi que le contexte de son occurrence. L'évènement redouté est représenté par un rectangle au sommet de l'arbre.

❖ **Évènements intermédiaires**

Les évènements intermédiaires, tout comme l'évènement redouté, doivent être définis précisément. Cependant, contrairement à l'évènement redouté, ils agissent en tant que causes pour d'autres évènements. Par exemple, ce sont les combinaisons d'évènements intermédiaires qui mènent à l'évènement redouté. Un évènement intermédiaire est également représenté par un rectangle, à l'instar de l'évènement redouté.

❖ **Évènements élémentaires**

Les évènements élémentaires correspondent au niveau le plus détaillé de l'analyse du système. Dans un arbre de défaillances, ils représentent les défaillances des composants constituant le système étudié. Pour déterminer le niveau de détail de notre étude, nous considérons généralement que les

événements élémentaires coïncident avec la défaillance des composants qui sont réparables ou interchangeables. Ces événements élémentaires sont représentés par des cercles.

❖ **Evènement non développé**

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.




Indépendamment de la nature des éléments de base identifiés, l'analyse par arbre des défaillances repose sur les principes suivants :



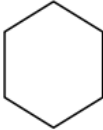
- Ces évènements sont indépendants;
- Ils ne seront pas décomposés en éléments plus simples faute de renseignements, d'intérêt ou bien parce que cela est impossible ;
- Leur fréquence ou leur probabilité d'occurrence peut être évaluée.

b) Portes logiques [31]

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différentes branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU.

TABLEAU III.3. Symboles des portes logiques dans l'AdD[31].

Symbole	Signification
	Porte ET : la défaillance de sortie se produira si toutes les défaillances d'entrée se produisent.
	Porte OU : la défaillance de sortie se produira si une des défaillances d'entrée se produit.
	Porte Combinaison : la défaillance de sortie se produira si n défaillances d'entrée se produisent.

	<p>Porte OU EXCLUSIF : un cas spécial de la porte logique OU, elle a généralement, deux entrées, la défaillance de sortie se produira seulement si une des entrées se produit et pas les deux en même temps.</p>
	<p>Porte Priorité ET : la défaillance de sortie se produira si toutes les défaillances d'entrée se produisent dans un ordre spécifique (l'ordre est représenté par un évènement de condition dessiné à droite de la porte).</p>
	<p>Porte INHIBER : la défaillance de sortie se produira si la défaillance unique d'entrée se produit à la présence d'une condition de d'autorisation (la condition d'autorisation est représentée par un évènement de condition dessiné à droite de la porte).</p>



c) Symboles de transfert [31]

Il existe pour les arbres de défaillances une symbolisation normalisée qui permet de faire référence à des parties de l'arbre qui se répètent :

- De manière identique : Même structure, mêmes événements ;
- De manière semblable : Même structure mais avec des événements différents.

L'objectif est de réduire la taille du graphique. Le tableau suivant présente les symboles ainsi que les significations qui sont utilisés.

TABLEAU III.4. Symboles de transfert sous l'AdD[31].

Symbole	Signification
	<p>Transfert in : indique que l'arbre est développé ultérieurement à l'occurrence de symbole de transfert out correspondant.</p>
	<p>Transfert out : indique que cette portion de l'arbre doit être attachée au transfert in correspondant.</p>

5. Elaboration de l'arbre [29]

La construction de l'arbre des défaillances vise à déterminer les enchaînements d'évènements pouvant conduire à l'évènement final retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles correspondent à des évènements élémentaires. L'élaboration de l'arbre des défaillances suit le déroulement ci-contre Figure III.16.

La recherche systématique des causes immédiates, nécessaires et suffisantes (CINS) est donc à la base de la construction de l'arbre. Il s'agit probablement de l'étape la plus délicate et il est souvent utile de procéder à cette construction au sein d'un groupe de travail pluridisciplinaire. De plus, la mise en œuvre préalable d'autres méthodes d'analyse des risques de type inductif facilite grandement la recherche des défaillances pour l'élaboration de l'arbre.

Afin de sélectionner les évènements intermédiaires, il est indispensable de procéder pas à pas en prenant garde à bien identifier les causes directes et immédiates de l'évènement considéré et se poser la question de savoir si ces causes sont bien nécessaires et suffisantes. Faute de quoi, l'arbre obtenu pourra être partiellement incomplet voire erroné.

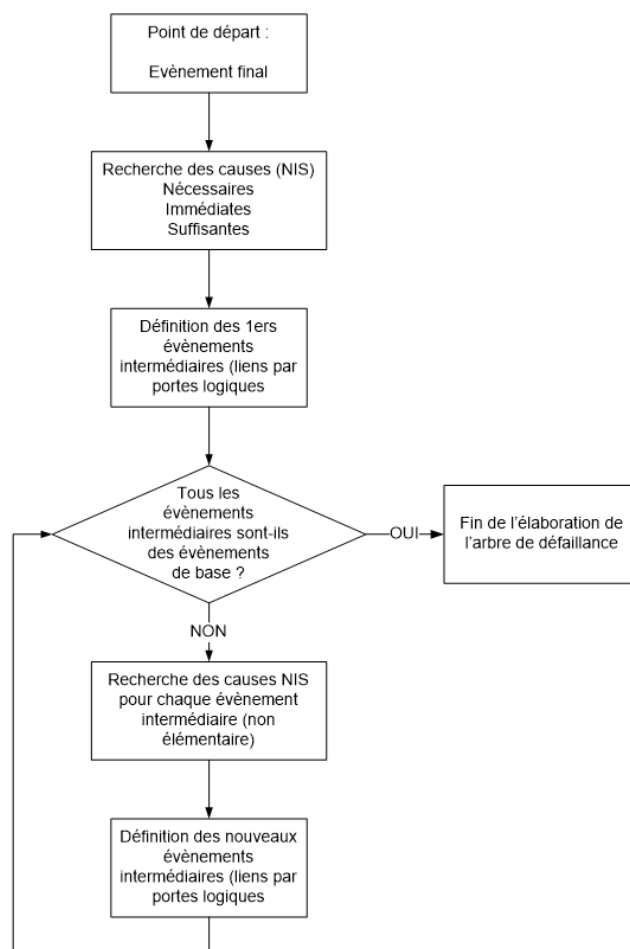


Figure III.16. Organigramme de l'élaboration de l'arbre[29].

6. Démarche et construction de l'AdD [22]

L'arbre de défaillance est une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un évènement unique intitulé évènement redouté. Marche ci-dessous montre les étapes essentielles de construction de l'AdD.

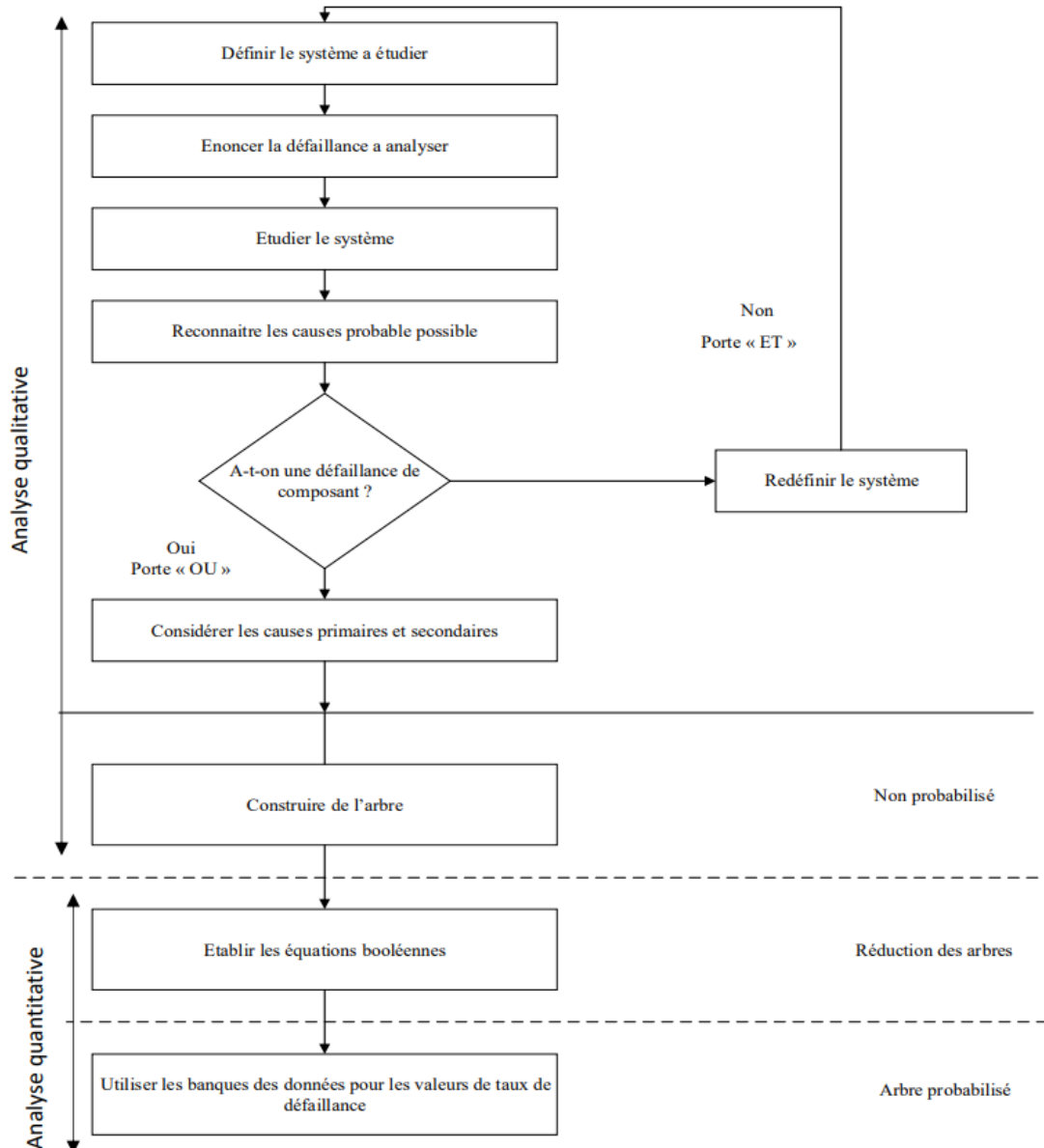


Figure III.17. Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillance[22].

1) Définir le système à étudier

- Définir le système et ses limites matérielles. Le système peut être une entité technique complète, mais il s'agit souvent d'un sous-ensemble présentant un risque spécifique. Toute la documentation technique pertinente doit être rassemblée;
- Décomposition du système il s'agit d'une décomposition physique du système. Les critères généralement utilisés sont les suivants:
 - ✓ Critère de technologie.
 - ✓ Critère de maintenance.
 - ✓ Critère de donnée sur l'étude réalisé
- Identification des composants il s'agit d'identifier tous les dispositifs représentés au dernier niveau de résolution du système. Dans le cadre de notre analyse, nous les appelons "composants".

2) **Énoncer la défaillance à analyser**

Définition des modes de défaillance des composants : pour chaque composant, les modes de défaillance possibles doivent être définis, c'est-à-dire les différentes manières manifestées par la défaillance.

3) **Etudier le système**

La reconstitution du système à travers les composants: il faut reconstituer le système en mode fonctionnel en remontant les niveaux de décomposition.

4) **Reconnaitre les causes probables possibles**

Rechercher les causes possibles de défaillance, pour chaque mode identifié. La recherche des causes peut être réalisée à l'aide de la méthode des 5 M et représentée sous forme de diagramme d'Ichikawa. Il faut collecter et organiser en familles les causes possibles.et considérer les causes primaires et secondaires.

5) **Construction de l'Add [29]**

Il est nécessaire de respecter certaines règles supplémentaires à observer durant la construction de l'arbre à savoir vérifier que le système est cohérent, c'est-à-dire que:

- La défaillance de tous ses composants entraîne la défaillance du système ;
- Le bon fonctionnement de tous ses composants entraîne le bon fonctionnement du système ;
- Lorsque le système est en panne, le fait de considérer une nouvelle défaillance ne rétablit pas le fonctionnement du système ;

- Lorsque le système fonctionne correctement, la suppression d'une défaillance ne provoque pas la défaillance du système. Il peut en effet arriver qu'une défaillance survenant sur un composant annule les effets d'une défaillance antérieure et permet ainsi le fonctionnement du système ;
- S'assurer que tous les événements d'entrée d'une porte logique ont bien été identifiés avant d'analyser leurs causes respectives et éviter de connecter directement deux portes logiques ;
- Ne sélectionner que les causes antérieures à l'existence de l'événement considéré.

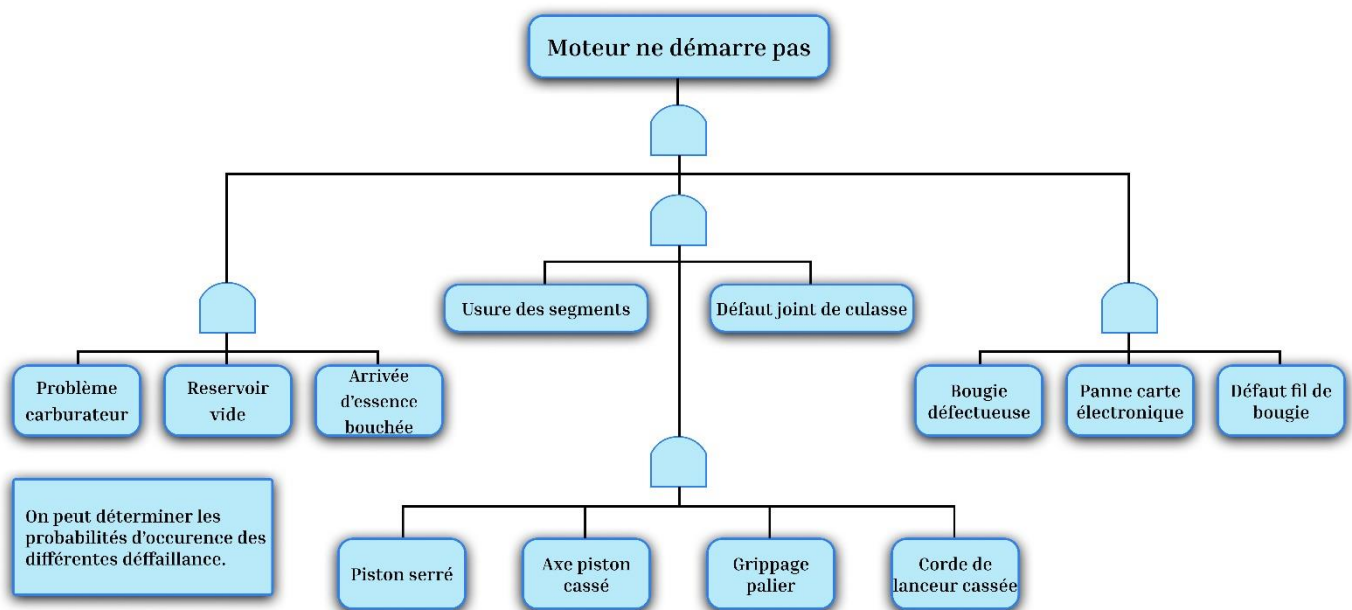


Figure III.18. Arbre de défaillance d'un moteur a tendeuse[1]

7. Exploitation de l'arbre de défaillance

a) Exploitation qualitative [29]

L'exploitation qualitative de l'arbre vise à examiner dans quelle proportion une défaillance correspondant à un événement de base peut se propager dans l'enchaînement des causes jusqu'à l'évènement final. Pour cela, tous les événements de base sont supposés équiprobables et on étudie le cheminement à travers les portes logiques d'évènement ou de combinaisons d'évènements jusqu'à

l'événement final. De manière intuitive, une défaillance se propageant à travers le système en ne rencontrant que des portes « OU » est susceptible de conduire très rapidement à l'événement final.

A l'inverse, un cheminement s'opérant exclusivement à travers des portes « ET » indique que l'occurrence de l'évènement final à partir de l'évènement ou la combinaison d'évènements de base est moins probable et démontre ainsi une meilleure prévention de l'évènement final.

❖ **Coupes et coupes minimales**

La définition des coupes minimales permet d'accéder directement aux évènements et combinaisons d'évènements les plus critiques pour le système considéré.

Une coupe minimale représente la plus petite combinaison d'évènements pouvant conduire à l'évènement indésirable ou redouté. Ainsi, plus l'ordre d'une coupe minimale est petit, plus l'occurrence de l'évènement final suivant ce chemin critique peut paraître probable. On parle parfois également de « chemin critique ». La recherche des coupes minimales est effectuée à partir des règles de l'algèbre de BOOLE en considérant que :

- À chaque évènement de base est associée une variable booléenne ;
- On associe à l'évènement de sortie d'une porte ET une variable booléenne égale au produit booléen des variables booléennes des évènements d'entrée ;
- On associe à l'évènement de sortie d'une porte OU une variable booléenne égale à la somme booléenne des variables booléennes des évènements d'entrée.

Quelques-unes des principales règles de l'algèbre de BOOLE sont résumées dans le tableau suivant:

TABLEAU III.5. Simplifications algèbre de BOOLE[29].

$a + \bar{a} = 1$	$\bar{\bar{a}} = a$
$a + a + a + \dots = a$	$a \cdot \bar{a} = 0$
$a + 0 = a$	$a \cdot a \cdot a \dots = a$
$a + 1 = 1$	$a \cdot 1 = 1$
$a + b = b + a$	$a \cdot b = b \cdot a$
$(a + b) + c = a + (b + c) = a + b + c$	$(a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c) = a \cdot b \cdot c$
$(a + b) \cdot c = (a \cdot c) + (b \cdot c)$	$(A \cdot b) + c = (a + c) \cdot (b + c)$
$a + (a \cdot c) = a$	$a \cdot (a + b) = a$
$a \cdot \bar{b} + b = a + b$	$(a + \bar{b}) \cdot b = a \cdot b$
$(a + \bar{b}) \cdot (a + b) = a$	$a \cdot \bar{b} + a \cdot b = a$

On obtient ainsi l'expression booléenne de l'évènement indésirable F sous la forme :

$$F = C1 + C2 + \dots + Cn = \sum_{i=1}^n C_i$$

Ou C_i est le produit de m_i événements de base:

$$C_i = B_i^1 * B_i^2 * \dots * B_i^{m_i} = \prod_{j=1}^{m_i} B_i^j$$

Si l'expression de F est réduite, alors les événements sont les coupes minimales. La coupe est dite d'ordre m_i . La recherche de l'expression réduite peut se faire selon divers algorithmes classiques (tableau de Karnaugh...).

Un moyen de prévenir les évènements indésirables ou redoutés vise à modifier l'arbre des défaillances en vue d'obtenir des coupes minimales d'ordre le plus élevé possible, par l'introduction de portes « ET » par exemple. Cette approche qualitative repose néanmoins sur l'hypothèse relativement forte que les évènements de base sont équiprobables. Il peut cependant arriver qu'une coupe minimale d'ordre 1 corresponde à un évènement extrêmement peu probable alors qu'une coupe minimale d'ordre supérieur peut correspondre à des combinaisons d'évènements très probables.

❖ **Exemple**

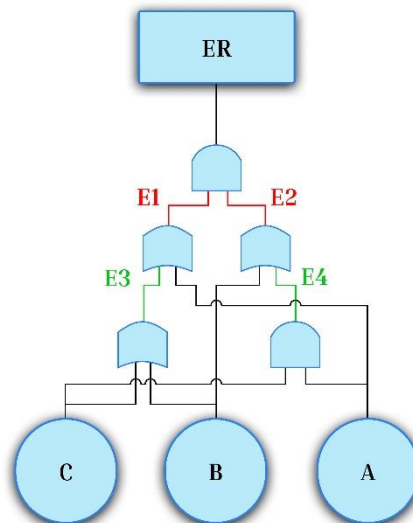


Figure III.19. Exemple d'un arbre de défaillance[29].

Ainsi, dans l'exemple précédent (Figure III.19), la recherche des coupes minimales peut s'effectuer comme suit :

- $ER = E1 \& E2$
- $E1 = A + E3$
- $E3 = B + C$
- $E2 = C + E4$
- $E4 = A \times B$

$$ER = (A+B+C) \& (C+ (A \& B))$$

$$ER = A \times C + A \times B + B \times C + A \times B + C + A \times B \times C$$

Or, $A \times C + C = C$ et $A \times B + A \times B \times C = A \times B$ (par absorption)

$$ER = C + A \times B + B \times C + A \times B$$

De plus, $A \times B + A \times B = A \times B$ (Idempotence)

$$C + B \times C = C \text{ (Absorption)}$$

$$\rightarrow ER = C + A \times B$$

Ainsi, l'événement C seul ou la combinaison des événements $A \times B$ conduisent à l'événement redouté. Il n'existe pas de combinaison plus petite conduisant à cet événement. L'arbre présenté en exemple admet donc deux coupes minimales : C ainsi que $A \times B$.

L'ordre d'une coupe est alors défini comme le nombre d'événements combinés qui figurent dans cette coupe.

Finalement, cet arbre comporte:

- Une coupe minimale d'ordre 1 : C,
- Une coupe minimale d'ordre 2 : A.B.

L'arbre représentant ces coupes minimales est appelé « arbre réduit ».

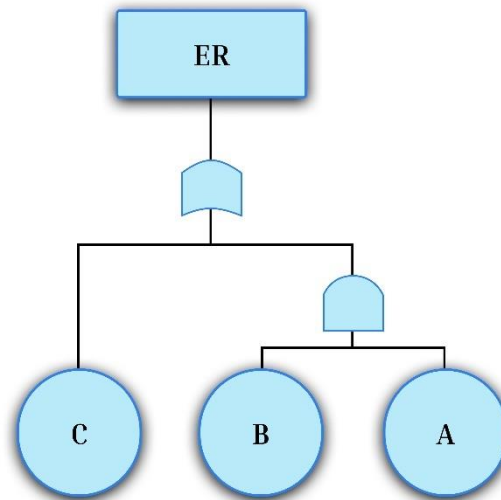


Figure III.20. Arbre de défaillance réduit[29].

b) Exploitation quantitative [33]

L'exploitation quantitative de l'arbre des défaillances vise à estimer, à partir des probabilités d'occurrence des événements de base, la probabilité d'occurrence de l'événement final ainsi que des événements intermédiaires. Il ne s'agit pas d'une démarche qui permet d'accéder avec exactitude à la probabilité de chaque événement. Elle doit être mise en œuvre dans l'optique de hiérarchiser les différentes causes possibles et de concentrer les efforts en matière de prévention sur les causes les plus vraisemblables.

En pratique, il est souvent difficile d'obtenir des valeurs précises de probabilités des événements de base. En vue de les estimer, il est possible de faire appel à :

- Des bases de données ;
- Des jugements d'experts ;
- Des essais lorsque cela est possible ;
- Au retour d'expérience sur l'installation ou des installations analogues.

❖ Porte ET

Soient A et B deux événements de base liés par une porte logique ET (Figure 21), et conduisant à un événement indésirable E. Si A et B sont indépendants, on obtient:

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

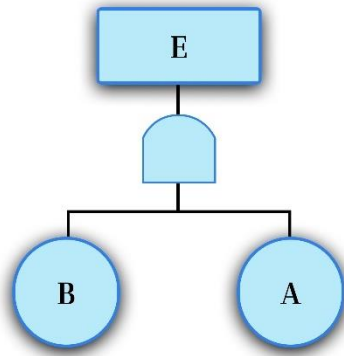


Figure III.21. Porte logique ET.

❖ **Porte OU**

Soient A et B deux évènements de base liés par une porte logique OU, et conduisant à un évènement indésirable E (Figure 22). Si A et B sont indépendants, on obtient:

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A) * P(B)$$

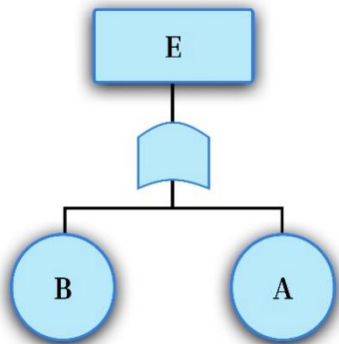


Figure III.22. Porte logique OU

Il existe deux approches principales pour calculer les probabilités dans les arbres de défaillance : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

➤ Méthodes directes [33]

La méthode directe consiste à calculer la probabilité de chaque événement dans l'arbre de défaillance en utilisant les probabilités conditionnelles, c'est-à-dire les probabilités qu'un événement se produise étant donné que tous les événements qui le précèdent se sont déjà produits. Ces probabilités conditionnelles sont déterminées en appliquant la formule de Bayes:

$$P(A|B) = P(B|A) * P(A) / P(B)$$

Où:

- $P(A|B)$ est la probabilité de l'événement A étant donné que l'événement B s'est produit.
- $P(B|A)$ est la probabilité de l'événement B étant donné que l'événement A s'est produit.
- $P(A)$ est la probabilité de l'événement A.
- $P(B)$ est la probabilité de l'événement B.

Une fois les probabilités conditionnelles de tous les événements déterminés, la probabilité de la défaillance totale du système peut être calculée en multipliant les probabilités de tous les événements conduisant à cette défaillance.

➤ Méthode indirecte [33]

Les méthodes indirectes de calcul de probabilité dans les arbres de défaillance sont souvent employées lorsque les données nécessaires pour calculer les probabilités directement sont insuffisantes ou indisponibles. Ces méthodes impliquent l'utilisation d'informations supplémentaires pour estimer les probabilités de défaillance des composants de l'arbre.

La probabilité de défaillance d'un système dans les méthodes indirectes peut être calculée à l'aide des équations suivantes :

- **Probabilité a priori:** $P(A)$ est la probabilité de l'événement A avant de prendre en compte toute autre information.
- **Probabilité a posteriori:** $P(A|B)$ est la probabilité de l'événement A sachant que l'événement B est vrai.
- **Théorème de Bayes:** Le théorème des hypothèses ou formule de Bayes, est un corollaire du théorème des probabilités totales et de la formule des probabilités totales conditionnelles.

$$P(H|E) = \frac{P(H_i) \cdot P(E|H_i)}{\sum_{i=1}^N [P(H_i) \cdot P(E|H_i)]}$$

8. Limites et avantages de l'AdD [29]

Le principal avantage de l'analyse par arbre des défaillances est qu'elle permet de considérer des combinaisons d'évènements pouvant conduire à un événement redouté.

Cette possibilité permet une bonne adéquation avec l'analyse d'accidents passés qui montre que les accidents majeurs observés résultent le plus souvent de la conjonction de plusieurs évènements qui seuls n'auraient pu entraîner de tels sinistres.

Par ailleurs, en visant à l'estimation des probabilités d'occurrence des évènements conduisant à l'événement final, elle permet de disposer de critères pour déterminer les priorités pour la prévention d'accidents potentiels.

L'analyse par arbre des défaillances porte sur un événement particulier et son application à tout un système peut s'avérer fastidieuse. En ce sens, il est conseillé de mettre en œuvre au préalable des méthodes inductives d'analyse des risques. Ces outils permettent d'une part d'identifier les évènements les plus graves qui pourront faire l'objet d'une analyse par arbre des défaillances et d'autre part, de faciliter la détermination des causes immédiates, nécessaires et suffisantes au niveau de l'élaboration de l'arbre.

Depuis une dizaine d'années, des logiciels informatiques sont commercialisés afin de rendre plus aisée l'application de l'arbre des défaillances. Ces outils se montrent très utiles pour la recherche des coupes minimales, la détermination des probabilités ainsi que pour la présentation graphique des résultats sous forme arborescente.

3.2.2.10 Interprétation de AdD en Réseaux bayésiens [34]

Plusieurs travaux de recherche ont démontré la similitude entre l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens afin d'établir des algorithmes capables de convertir l'arbre de défaillance issue des méthodes classique vers les réseaux bayésiens parmi les méthodes les plus efficaces et les plus utilisées dans le domaine d'intelligence artificiel. Afin de promouvoir un outil d'aide à la décision en temps réel pour des études de sûreté de fonctionnement plus approfondies. Ces travaux montrent comment un AdD peut être converti en un RB et que toutes les analyses et étapes dans le sens des coupes minimales effectuées sur un modèle AdD peuvent être présentées dans un RB.

1) Historique et théorème [34 ;35]

La représentation des connaissances et le raisonnement a donné naissance à de nombreux modèles. Les modèles graphiques probabilistes, et plus précisément les réseaux bayésiens, qui doivent leur nom aux travaux de Thomas Bayes au XVIIIe siècle sur la théorie des probabilités. les réseaux bayésiens sont initiés par Judea Pearl dans les années 1980[PEA86],

se sont révélés des outils très pratiques pour la représentation de connaissances incertaines, et le raisonnement à partir d'informations incomplètes.

Le théorème de Bayes permet de fusionner deux types d'information : la connaissance initiale, dite a priori, obtenu à partir du jugement d'experts ou le retour d'expérience, et la vraisemblance qui représente les observations du retour d'expérience pour obtenir une connaissance enrichie, dont l'incertitude est plus faible : La probabilité a posteriori représentant ainsi la nouvelle connaissance pour l'expert. Notons que le résultat a posteriori peut devenir l'information a priori si de nouvelles informations issues du retour d'expérience sont disponibles. Ceci représente le principe d'actualisation dynamique des connaissances utilisé particulièrement pour les bases de données.

Pour une Analyse Quantitative des risques, l'application du théorème bayésienne consiste en l'application de l'inférence bayésienne. Le passage de la distribution a priori à la distribution a posteriori des paramètres du modèle probabiliste est exprimé par la formule de Bayes afin d'établir une aide à la décision, qui peut être par la suite interprétée comme une mise à jour de la connaissance, sur le réseau bayésien.

Formule de Recomposition: $\forall A \in I, p(A) = \sum_i^n p(A|B_i) p(B_i)$

Formule de Bayes:
$$P(H \setminus E) = \frac{P(H_i) \cdot P(E \setminus H_i)}{\sum_{i=1}^N [P(H_i) \cdot P(E \setminus H_i)]}$$

La probabilité conditionnelle de réalisation d'un événement B sachant que l'événement A s'est produit, est proportionnelle à la probabilité (a priori) de B (probabilité avant que l'on observe A) multipliée par la probabilité d'observer A sachant B.

A: événement(s) observé(s),

B: événement étudié,

P (A): probabilité a priori de réalisation de l'événement B,

(A|B) : vraisemblance de l'occurrence de l'événement B sachant que A a été observé,

(B|A) : probabilité a posteriori de réalisation de l'événement B sachant que A a été observé.

2) Définition du Réseau Bayésien [34 ;35]

Un réseau bayésien est un graphe causal auquel on a associé une représentation probabiliste sous-jacente. Cette représentation permet de rendre quantitatifs les raisonnements sur les causalités que l'on peut faire à l'intérieur du graphe. Le graphe est appréhendé selon un aspect qualitatif et un aspect quantitatif.

L'aspect qualitatif du graphe indique les dépendances (ou indépendances) entre les variables et donne un outil visuel de représentation des connaissances, outil plus facilement appréhendable par ses utilisateurs. De plus, l'utilisation de probabilités permet de prendre en compte l'incertain, en quantifiant les dépendances entre les variables, c'est l'aspect quantitatif

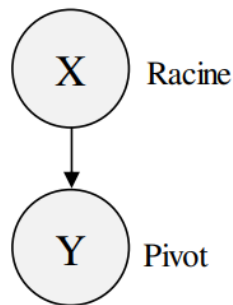


Figure III.23. Réseau bayésien ou X est la cause de Y[34].

3) Conversion de l'AdD en RB [36]

Un algorithme d'obtention d'un RB à partir d'un AdD est proposé ci-dessous avec une simplification présentée dans la (Figure 24) dans cet Algorithme il est supposé que le AdD n'aura que des portes logiques « ou », « et » et « k-sur-n », le RB résultant sera binaire et ces variables représenteront les états des composants d'un système et les deux valeurs qu'elles pourront prendre seront désignées par faux « F » pour l'état de fonctionnement et par vrai « V » pour l'état défaillant. Cependant, l'algorithme peut être généralisé à n'importe quel AdD.

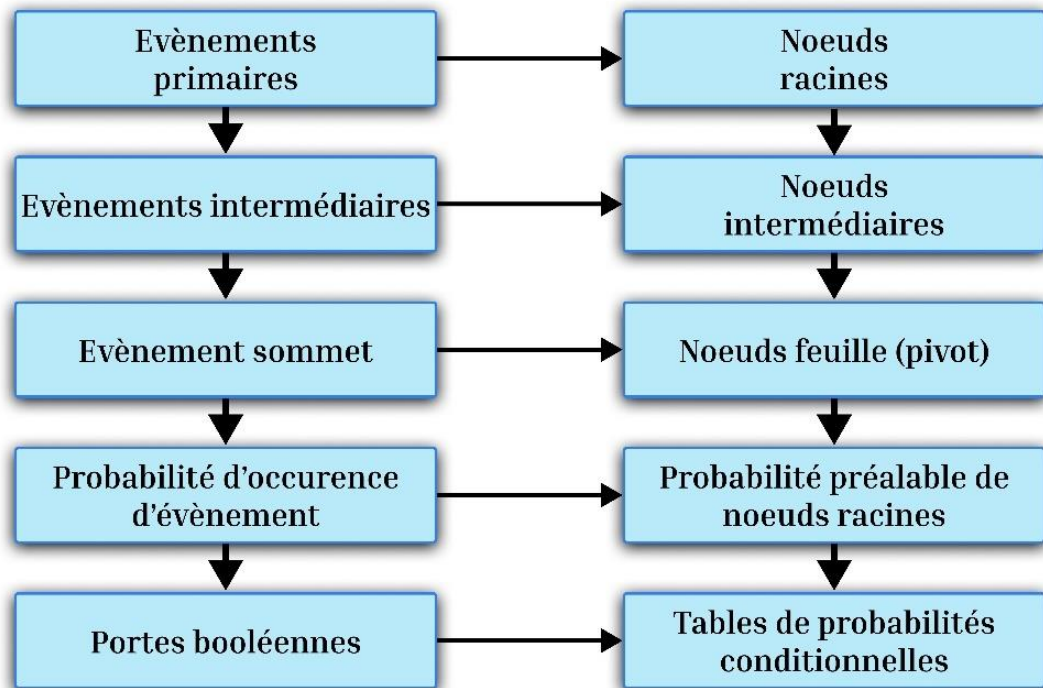


Figure III.24. Organigramme représentant un algorithme simplifié pour représenter un AdD en RB [36].

4) La partie qualitative du RB [36]

Chaque évènement de base de l'AdD est converti en un nœud racine (parent) dans le RB;

1. Pour chaque nœud pivot 'feuille' du RB correspondant à un évènement sommet ou intermédiaire désigné par la porte logique dans l'AdD selon l'emplacement, en particulier la dernière porte logique et l'évènement sommet finale de AdD sera étiquetée en tant que nœud de défaillance.
2. Les nœuds du RB doivent être connectés entre eux selon l'arrangement des portes logique de l'AdD.

Les Figures 24 et 25 montrent comment la structure d'un AdD simple est convertie RB.

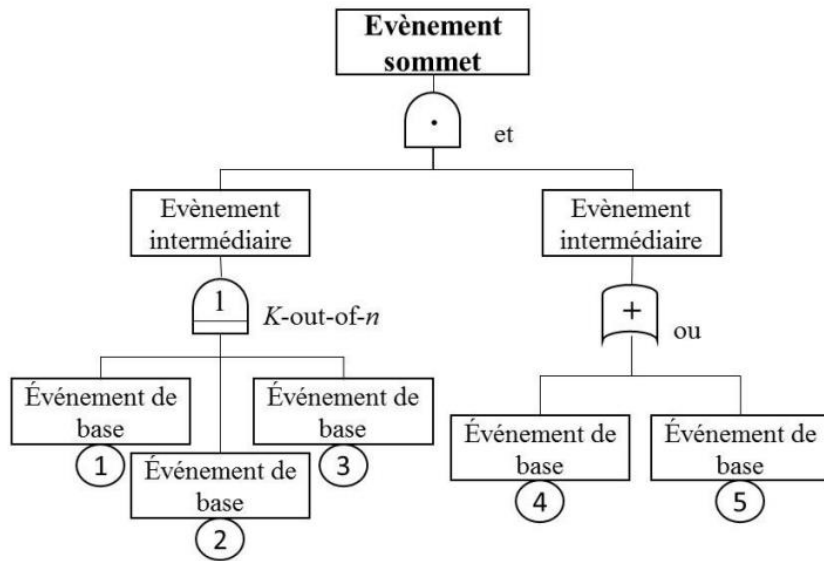


Figure III.25. Exemple de Structure d'Add [36].

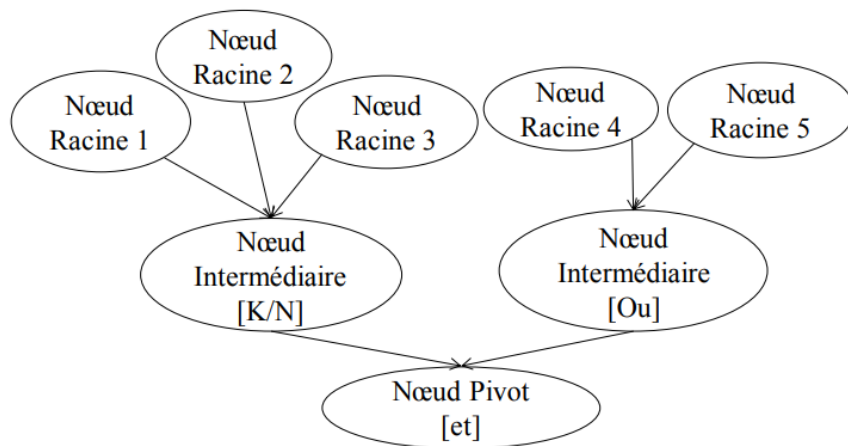


Figure III.26. Structure du réseau bayésien obtenu à partir de la Figure III 25 [36].

5) La partie quantitative (probabilité) du RB [36]

Pour chaque nœud racine du RB la même probabilité antérieure de l'évènement de base correspondant dans le Add est attribuée.

1. Chaque porte logique 'ou', 'et', 'k-sur-n', dans l'Add correspond à une table de probabilité conditionnelle équivalente dans le RB.
2. Les Tableaux 6, 7 et 8 présentent les tables de probabilité conditionnelles des portes logique 'ou', 'et', 'k-sur-n' respectivement.

3. La méthode de conversion peut être étendue aux AdD avec d'autres portes et les TPC des réseaux correspondants suivront les tables logiques des portes.

TABLEAU III.6. TPC de la porte logique « Ou » [36]

Nœud Racine 1	Nœud Racine 2	P(Nœud Intermédiaire [Ou]=0)	P(Nœud Intermédiaire [Ou]=1)
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1

TABLEAU III.7. TPC de la porte logique « et ».

Nœud Intermédiaire [K/N]	Nœud Intermédiaire [Ou]	P (Nœud Pivot [Et]=0)	P (Nœud Pivot [Et]=1)
0	0	1	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

TABLEAU III.8. TPC de la porte logique «2 sur 3 »

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

6) L'inférence sur le RB obtenue à partir de AdD [36]

Dans l'étude d'indisponibilité l'événement sommet dans l'AdD correspond à la probabilité a priori du nœud désigné nœud de défaillance dans le RB (la probabilité a posteriori est obtenue partir de l'inférence dans le réseau) et c'est la même procédure pour les évènements intermédiaire (sous système). Dans un AdD, les calculs d'indisponibilité sont obtenus à partir des coupes minimales, par contre dans les RB ils peuvent être obtenus par le concept d'inférence bayésienne. La règle de mise à jour des probabilités est donnée par la forme $P(A|B)$:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

P (A) : probabilité a priori,

P (B|A) : la probabilité que B se produise lorsque A est vraie,

A représente la défaillance (ou bien les variables du sous-système) et l'évidence est l'ensemble vide, **B = ∅**.

La probabilité à posteriori peut également être calculée dans un RB, en prenant en considération un seul composant, un sous-ensemble de composants (sous-système) ou pour tous les composants, à l'exception de ceux auxquels des évidences ont été attribuées.

Quand la défaillance est donnée comme évidence, la probabilité a posteriori de chaque composant est une information de la criticité de chacun des composants et la probabilité posteriori d'un sous-système et une information de la criticité du sous-système qui est l'origine de la défaillance du système.

3.2.3 Analyse prévisionnelle de défaillances [27]

Prévoir la possibilité d'une défaillance et corriger l'équipement avant qu'elle ne se produise devrait être le leitmotiv du constructeur. En fait, c'est rarement le cas, ne serait-ce qu'à cause du coût d'études supplémentaire qui pénaliserait certainement le coût de vente du produit.

L'analyse prévisionnelle des défaillances s'appuie sur l'expertise ou l'expérience acquise sur les équipements en fonctionnement. Dans ce cas, les analyses s'effectuent après défaillances. Le retour d'expérience est donc la base de l'analyse prévisionnelle : sans lui, toute gestion dans une logique de progrès est impossible. L'analyse prévisionnelle est d'autant plus efficace qu'elle est réalisée en fin de conception traditionnelle par un groupe mixte aux compétences croisées : par exemple concepteur, responsable production, responsable maintenance, responsable qualité.

3.2.3.1 AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances et de leur Criticité)

1) AMDE [36 ;37]

AMDE (Analyse des modes de défaillances, de leurs effets) Cette méthode [Failure mode and effect analysis (FMEA) en anglais] développée au début des années 60 en aéronautique a été depuis, généralisée à de nombreux domaines de l'industrie. Elle est inductive et permet l'étude systématique des causes et des effets des défaillances (modes de défaillance et effets) qui affectent les composants d'un système.

C'est une méthode précieuse qui permet à l'entreprise de valider, tout au long de la construction du produit, sa qualité et sa fiabilité :

- Elle identifie les modes de défaillance des composants, en évalue les effets sur l'ensemble des fonctions et en analyse les causes ;
- En phase de conception, elle est associée à l'**Analyse Fonctionnelle** pour la recherche des modes de défaillances spécifiques à chaque fonction ou contrainte des composants ;
- Dans le cas d'analyse sur des procédures ou chaînes de fabrication, elle permet de localiser les opérations pouvant conduire à élaborer un produit ne respectant pas le cahier des charges, ce qui permettra par la suite de limiter les rebuts ;
- Appliquée à un groupe de travail pluridisciplinaire, elle est recommandée pour la résolution de problèmes mineurs dont on veut identifier les causes et les effets ; elle contribue donc à la construction et à l'amélioration de la qualité ;

- Elle est qualifiée de démarche inductive au sens où elle s'appuie, pour l'analyse des défaillances, sur une logique de décomposition d'un système en sous-ensembles successifs pour aboutir aux composants.

2) AMDEC [37]

Cette méthode AMDEC est une extension de la méthode AMDE (Failure mode, effects and criticality analysis 3 FMECA en anglais) . Est une méthode ascendante qui, considère la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et la gravité des effets associés pour effectuer une classification suivant une échelle en criticité, ou elle permet d'évaluer les effets de chaque mode de défaillance des composants du système sur les différentes fonctions de celui-ci et d'identifier ceux influant les caractéristiques FMDS (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité, Sécurité) du système.

L'AMDEC reprend en effet les principales étapes de l'AMDE et ajoute une évaluation quantitative de la criticité.

3) Normes AMDEC

L'AMDEC est une méthode qualitative et inductive visant à identifier les risques de pannes potentielles contenues dans un avant-projet de produit ou de système, quelles que soient les technologies, de façon à les supprimer ou à les maîtriser. Elle est normalisée par l'AFNOR : norme X 60-510 de décembre 1986.

4) Les types d'AMDEC [27]

L'AMDEC peut être appliquée:

- En conception (prévisionnel, avant livraison), on parlera d'AMDEC Produit,
- En opérationnel, on parlera alors d'AMDEC Procédé ou d'AMDEC Moyen de production.

a) AMDEC produit

Elle est centrée sur l'amélioration, en conception, des performances du produit. Ses objectifs sont:

- L'assurance Sdf et la qualité d'un produit par rapport à la satisfaction de l'utilisateur ou des objectifs de sécurité ;
- L'aide à l'établissement de spécifications de capabilité du processus de fabrication et des caractéristiques matières ;
- L'aide à la définition du contrôle qualité produit.

b) AMDEC procédé

Elle s'intéresse au procédé de production (gammes de fabrication en particulier). Ses objectifs sont:

- L'assurance qualité du procédé par rapport à des objectifs de qualité et de productivité.
- L'assurance qualité du procédé par rapport à des objectifs de qualité et de productivité.
- L'aide à la définition du contrôle qualité produit.

c) AMDEC Moyen de production

Centrée sur les moyens de production (installations, lignes, machines), ses objectifs sont:

- L'assurance de la fiabilité et de la disponibilité du moyen de production.
- L'aide à la maintenance.
- Compléter la documentation opérationnelle maintenance et d'exploitation.
- Le respect des normes de sécurité et d'environnement à toutes les étapes de la production.

d) Lien entre les différentes familles

Le caractère méthodologique de l'AMDEC permet de l'adopter à tous les procédés ainsi qu'à toutes les technologies ; elle permet de décomposer l'ensemble d'un système en différentes opérations, étapes, équipements, sous-ensembles ou composants, selon le type d'étude réalisée : procédé de fabrication, moyens de production, produit. Les trois types d'AMDEC sont pourtant liés et agissent l'un sur l'autre. En effet, une défaillance d'un sous-ensemble du moyen de production, corrigée à temps, permet d'éviter une influence négative sur le procédé de fabrication. De même, un défaut corrigé à temps dans celui-ci n'aura pas ou peu d'influence sur le produit. Enfin, une défaillance corrigée sur un composant du produit, avant la diffusion de celui-ci, permettra la satisfaction du client.

5) Procédure de l'AMDEC [28]

La démarche générale de l'AMDEC se résume de l'organigramme en Figure 27.

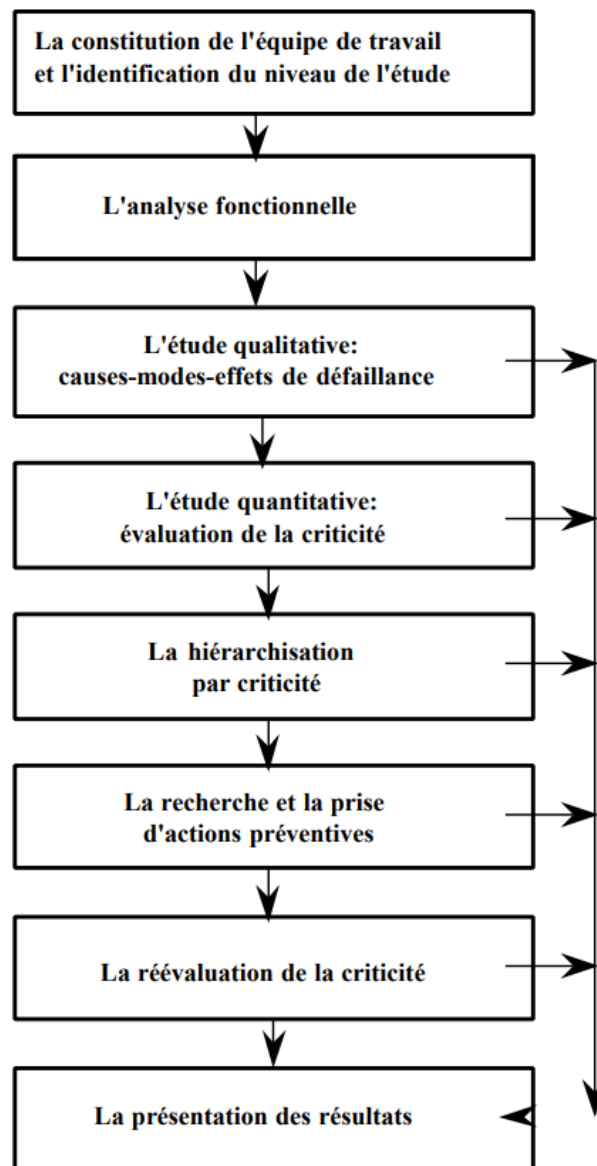


Figure III.27. Démarche de l'AMDEC [28].

3.2.3.2 Apports et limites de l'AMDEC [27]

a) Apport

➤ Les apports indirects

- Augmentation du rendement;
- Centralisation de la documentation technique ;
- Mise en place de fiches de suivi des visites de l'exploitant.

➤ Impact sur la maintenance

❖ **Optimisation des couples Causes/Conséquences:**

- Meilleure connaissance de l'équipement donc détection plus aisée des points faibles ;
- Suppression des causes de défaillances ou limitation de leurs effets ;
- Hiérarchisation des risques et des criticités.

❖ **Amélioration de la surveillance et des tests:**

- Optimisation des diagnostics de tests (identification et représentation des paramètres à tester, minimisation de leurs nombres).

❖ **Fiabilité et sécurité:**

- Prise en compte détaillée de l'architecture et des circuits au niveau des modes de défaillances ;
- Optimisation choix/compromis.

❖ **Optimisation de la maintenance:**

- Adaptation et choix de types de maintenance appropriée.

➤ **Impact sur la qualité**

- Meilleure adéquation matériel/fonctionnel.;
- Meilleure efficacité en développement/fabrication ;
- Meilleure efficacité en utilisation.

b) Limitations de la méthode AMDEC

Bien que d'un usage généralisé, il serait inexact de prétendre que l'AMDEC est un outil universel. Précisons les quelques limitations de la méthode:

- Elle est tributaire d'une bonne analyse fonctionnelle ;
- Elle impose des travaux et une méthodologie demandant une préparation, une rigueur et parfois des moyens importants pour l'entreprise. Toutes les entreprises ne sont pas encore en mesure d'y consacrer les efforts nécessaires (on privilégie encore trop les actions « pompiers ») ;
- Même si sa vocation est le traitement préventif des défaillances, elle doit s'appuyer sur un savoir- faire existant dans l'entreprise et à partir duquel le groupe de travail peut extrapoler ses recherches ;

- Elle s'adresse à des applications plutôt matérielles (mécanique, électricité, hydraulique, etc..).

3.3 CONCLUSION

Ce chapitre a souligné l'importance des analyses qualitatives et quantitatives dans l'évaluation des systèmes industriels, ainsi que le rôle essentiel du diagnostic et de l'expertise technique pour détecter et anticiper les défaillances. Nous avons également présenté diverses méthodes d'analyse pour optimiser la fiabilité et la performance des équipements. Dans le prochain chapitre, nous appliquerons ces concepts à une étude de cas, utilisant l'arbre de défaillance et la modélisation par réseaux bayésiens pour illustrer leur efficacité en pratique.

4 Chapitre 4 :Diagnostic d'un Four à Induction par les Méthodes de l'Arbre de Défaillance et les Réseaux Bayésiens.

4.1 INTRODUCTION

Le four à induction est essentiel pour de nombreuses applications industrielles, notamment la fusion et le traitement des métaux. Dans ce chapitre, nous procédons à une identification et une description technologique détaillée du four. Pour les besoins de l'étude, nous analyserons son historique de fonctionnement et de pannes sur une période déterminée. Ensuite, nous élaborerons un plan de maintenance préventive en utilisant des méthodes statistiques et probabilistes, telles que l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens, pour quantifier les probabilités de défaillance, minimiser les risques, et améliorer la fiabilité de l'équipement.

4.2 PRESENTATION DE L'EQUIPEMENT ETUDIE

4.2.1 Définition d'un four à induction [39]

Un four à induction est un four de fusion électrique dans lequel la chaleur nécessaire à la fusion est apportée par effet induction entre une bobine primaire et une bobine secondaire. Dans les fours dits « à canal » la bobine secondaire est constituée par un canal du métal à fondre en forme de boucle.



Figure VI.1. Four électrique à induction[39].

4.2.2 Principe de fonctionnement [40]

Ce type de four utilise le principe de l'induction électromagnétique. Selon ce principe physique, un champ magnétique produit dans le métal un courant électrique induit. Le métal se comporte alors telle une résistance et chauffe proportionnellement à la puissance du champ.

Les fours à induction utilisent des bobines dans lesquelles passe un courant électrique pour générer un champ magnétique intense. Il est orienté et concentré sur les charges métalliques, présentes dans le **creuset réfractaire**. La **bobine inductrice** placée autour du creuset est refroidie à l'eau afin d'éviter toute surchauffe et dégradation de cette dernière. Des **écrans magnétiques** sont disposés tout autour pour refermer le champ sur la zone de fusion.

Un effet intéressant pour la métallurgie est le brassage dû aux courants induits. Il permet d'homogénéiser le bain ce qui rend très intéressant ce type de moyen de fusion pour l'élaboration d'alliages complexes. Il existe une variante du four à induction plutôt réservée au maintien du métal en fusion dans un four à canal. Ce dernier est destiné au stockage du métal liquide, souvent directement sur le chantier de moulage. La température est maintenue par le passage du métal dans un canal où l'on applique un courant induit. Cela produit un courant dans le bain qui homogénéise l'ensemble. Les fours à induction sont utilisés pour la fusion et le maintien de tous les types d'alliages : acier, fonte, non ferreux.

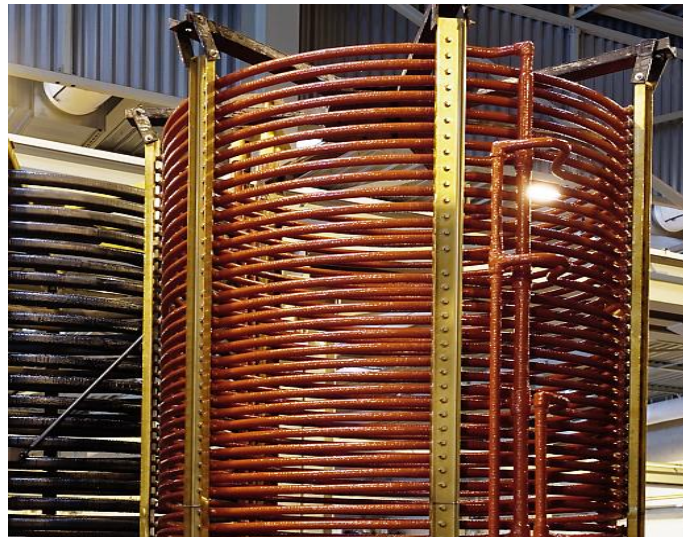


Figure VI.2. Isolation de bobine de four à induction[40].

4.2.3 Types de four à induction

Les fours à induction se classent en deux grandes catégories principales, qui se subdivisent elles-mêmes en fonction de leur alimentation électrique : les fours à canal et les fours à creuset.

4.2.3.1 Four à induction à creuset [41]

Ce type de four se compose d'une bobine qui entoure le creuset. Le creuset est un récipient dans lequel est placé le métal à fondre. Lorsqu'un courant alternatif passe dans la bobine, il génère un champ magnétique. Ce champ magnétique induit des courants de Foucault dans le métal à l'intérieur du creuset, ce qui génère de la chaleur et fait fondre le métal.

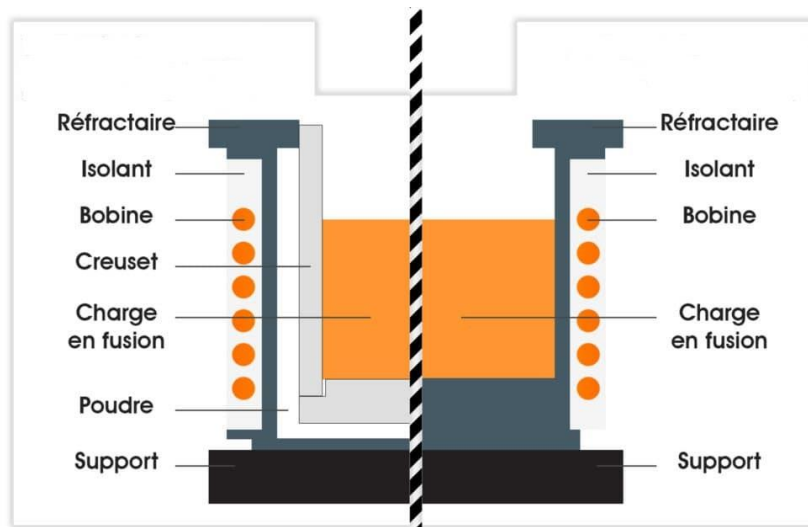


Figure VI.3. Corps d'un four à creuset[41].

4.2.3.2 Four à induction à canal [42]

Le four à canal est le premier type de four à induction qui existe. Il est principalement utilisé comme four de maintien. Il est constitué par un réservoir en matériaux de réfractaire à la partie inférieure duquel se raccorde le canal (voir figure 4). Le métal remplissant ce canal constitue ainsi une spire continue qui se trouve fermée par le métal du creuset. Le creuset est entièrement monté sur un mécanisme de basculement. Le couplage est bon. Le rôle du four n'est pas d'augmenter la température du métal, mais plutôt d'empêcher un refroidissement non souhaité.

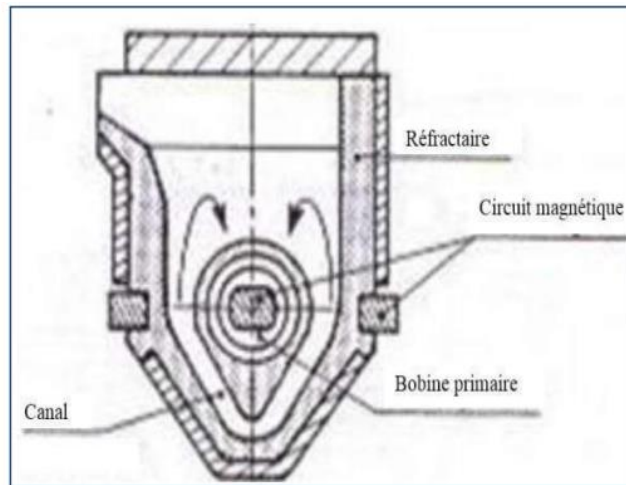


Figure VI.4. Four à canal[42].

4.2.4 Applications industrielles des fours à induction [43 ;44]

Les fours à induction trouvent de nombreuses applications industrielles, notamment:

- **Fusion des métaux:** Les fours à induction sont largement utilisés dans les fonderies pour fondre les métaux ferreux et non ferreux comme l'acier, l'aluminium, le cuivre, le laiton, etc. jusqu'à leur point de fusion. Ils permettent d'obtenir des aciers et alliages spéciaux sous vide ou atmosphères inertes de manière plus propre que les fours à réverbère ou cubilots
- **Traitement thermique:** Le chauffage par induction est utilisé pour des opérations de traitement thermique comme le durcissement, le recuit, la trempe de pièces métalliques. Le métal est chauffé rapidement et de manière localisée par induction avant d'être trempé pour modifier ses propriétés mécaniques.
- **Soudage et brasage:** Le soudage par induction permet de souder des plastiques dopés avec des céramiques ferromagnétiques ou des particules métalliques en chauffant localement les joints. Le brasage par induction est aussi utilisé pour assembler des pièces métalliques.
- **Fabrication additive:** L'impression rapide par induction est un procédé de fabrication additive métallique qui utilise le chauffage par induction pour créer des structures 3D en métal de manière plus efficace énergétiquement et matériellement que le frittage laser

- **Chauffage de surface:** Le chauffage par induction permet de chauffer de manière localisée et rapide la surface de pièces métalliques pour des opérations de soudage, de revêtement, de fusion de poudres, etc. sans affecter le cœur de la pièce.

4.2.5 Avantages et inconvénients des fours à induction [41]

4.2.5.1 Avantages

- La sécurité, l'efficacité et des processus de fusion contrôlés par rapport à d'autres types de fours ;
- Absence d'arc électrique et de combustion, assurant une température plus sûre ;
- Le brassage électromagnétique des fours à induction homogénéise les métaux liquides, éliminant ainsi le besoin d'échantillonner chaque barre ;
- Les fours à induction sont largement utilisés dans les fonderies, aciéries et l'industrie minière pour leur efficacité et leur fusion propre.

4.2.5.2 Inconvénients

- Manque de capacité d'affinage;
- Les matériaux de charge utilisés dans le four doivent être exempts d'oxydes et avoir une composition connue ;
- Certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation et doivent être ajoutés à la matière fondue qui peut entraîner des coûts supplémentaires ;
- La nécessité d'une surveillance et d'un contrôle minutieux de la composition de la matière fondue ;
- Les fours à induction peuvent être restreints en ce qui concerne la variété des matériaux traitables et la taille de la matière fondue .

4.3 FOUR ELECTRIQUE A INDUCTION ETUDIE A BASSE FREQUENCE (INSTALLE AU NIVEAU DE L'ENTREPRISE ALFET) [45]

4.3.1 Description

Le four installé au niveau de l'entreprise ALFET dans la chaîne d'élaboration de la fonte est un four à creuset à basse fréquence, dont on peut les classer en deux grandes parties:

a) La partie mécanique

Elle est composée des éléments suivants:

- **Un bâti:** se compose du châssis de montage avec les deux colonnes à basculer sur lesquelles sont montés, en haut, les coussinets de pivotement pour le châssis basculant.
- **Le châssis basculant:** sert à recevoir l'ensemble de fusion et, est pivoté au moyen de deux dispositifs de levage hydrauliques (vérins, pupitre).
- **L'ensemble de fusion:** comprend la bobine d'induction refroidie à l'eau, les culasses de fer disposées en forme d'étoile autour de la bobine pour blinder le champ magnétique, leurs supports et dispositif de serrage ainsi que le creuset damé en pisé spécial nécessaire à l'exploitation du four.
- **Le couvercle:** est une stable construction soudée. Il est de béton réfractaire damé comme isolation thermique. La mise en mouvement du couvercle s'effectue par voie hydraulique.

b) La partie électrique

Comprend les ensembles suivants:

- Interrupteur à haute tension;
- Charpente d'interrupteurs, interrupteur principal et installation auxiliaire d'alimentation ;
- Armoire de manœuvre;
- Pupitre de commande pour système hydraulique ;
- Armoire à contrôler l'eau;
- Charpente de commutateurs –étoile/triangle. ;
- Transformateur de puissance ;
- Self –inducteur ;
- Charpente de condensateurs de compensation ;
- Charpente de condensateurs d'équilibrage.

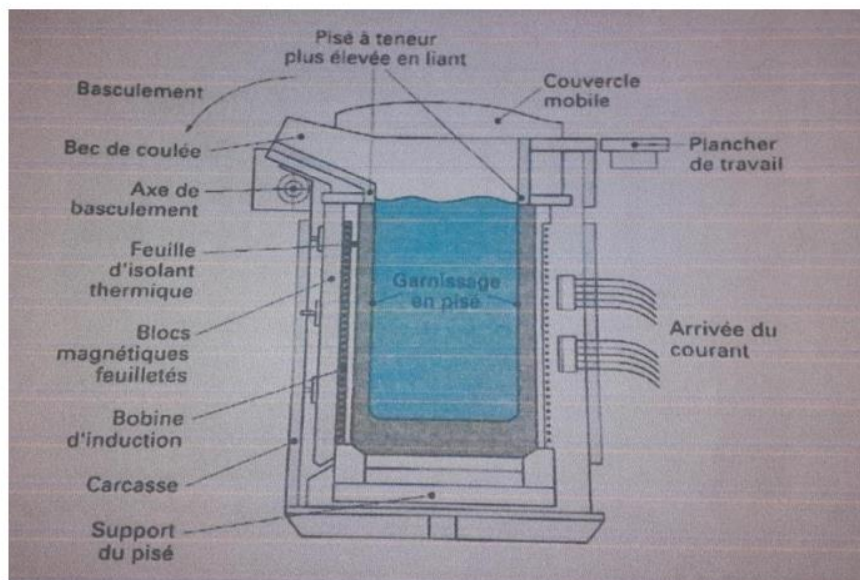


Figure VI.5. Schéma descriptif d'un four électrique à induction.

4.3.2 Modes de défaillances d'un four électrique à induction [45]

Les fours électriques à induction de fusion sont des équipements industriels complexes et peuvent rencontrer diverses pannes, notamment mécaniques, électriques, thermiques, et hydrauliques. La nature de ces pannes peut varier en fonction du type de four, de sa taille, de son ancienneté, de sa conception et de son mode d'utilisation. Voici quelques pannes courantes qui peuvent survenir sur ces fours:

1. Défaillances mécaniques

- Abrasion, cisaillement, corrosion des pièces mécaniques ;
- Déformation permanente, écaillage, fatigue, grippage ;
- Défauts préexistants dans les pièces en service ;
- Défaillances mécaniques en charge (choc, surcharge, fatigue) ;
- Frottement et usure entre organes en mouvement.

2. Défaillances électriques

- Arc, claquage, collage, fuite, fusion, usure, rupture des composants électriques ;
- Aimantation, effet Joule, électricité statique.

3. Défaillances thermiques

- Choc thermique, dilatation, rayonnement thermique ;
- Fatigue thermique et fatigue de contact.

4. Défaillances hydrauliques

- Cavitation, coup de bélier, onde de choc, turbulence dans les circuits hydrauliques.

5. Autres défaillances

- Rayage, faïençage, marquage de la surface des pièces ;
- Corrosion bactérienne due à des bactéries se multipliant dans les fluides ;
- Fuites de matériau fondu ;
- Blocage de dispositifs de basculement de la cuve, bouchage de four.

4.4 LOGICIEL DE SIMULATION [46]

4.4.1 Netica application

Netica est un logiciel spécialisé dans la gestion et l'utilisation de réseaux bayésiens et de diagrammes d'influence. Ce programme permet de construire, analyser, et manipuler des modèles probabilistes pour diverses applications. Avec Netica, on peut créer et modifier des réseaux, les adapter à de nouvelles données, et les utiliser pour tirer des conclusions ou prendre des décisions optimales. Il est capable d'apprendre des relations probabilistes à partir des données fournies et de résoudre des problèmes de décision, y compris ceux impliquant des décisions séquentielles où les choix futurs dépendent des résultats passés. Netica est souvent utilisé dans des domaines tels que le diagnostic, la prédiction, la gestion des risques, et l'analyse décisionnelle.

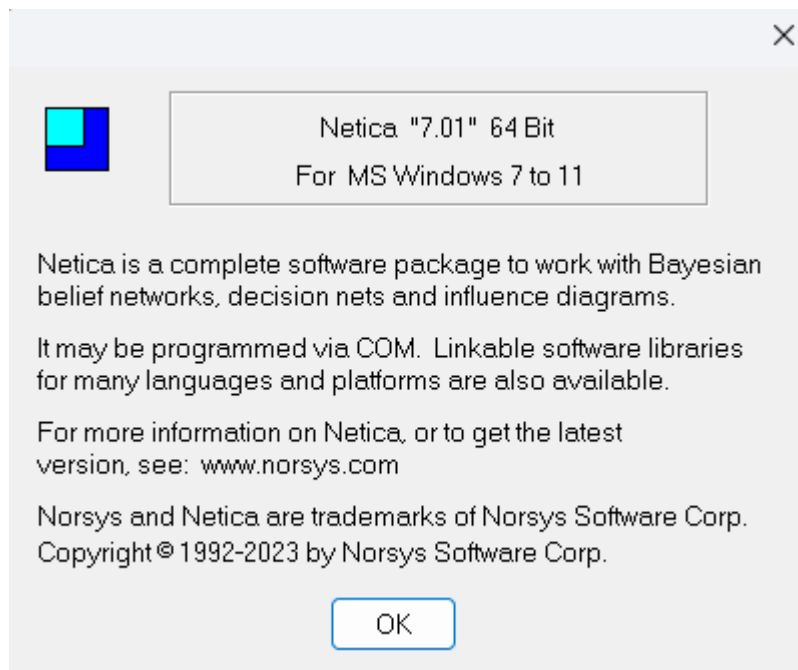


Figure VI.6. Fenêtre d'Information du Logiciel de Simulation Netica [46].

4.4.2 Objectifs de l'application

Netica a plusieurs objectifs clés pour aider les utilisateurs à exploiter pleinement les réseaux bayésiens et les diagrammes d'influence:

- **Création de Réseaux Bayésiens:** Faciliter la construction de réseaux bayésiens à l'aide d'une interface graphique intuitive, permettant aux utilisateurs d'intégrer et de structurer les données pertinentes de manière visuelle et interactive.
- **Inférence Probabiliste:** Compiler les réseaux bayésiens pour exécuter divers types d'inférences probabilistes, ce qui permet d'expérimenter avec les réseaux et de tirer des conclusions basées sur les relations probabilistes modélisées.
- **Analyse des Dépendances:** Permettre l'exploration des relations conditionnelles d'indépendance et de dépendance au sein des réseaux, offrant ainsi une meilleure compréhension de la structure et des interactions des variables.
- **Analyse de Sensibilité:** Effectuer des analyses de sensibilité pour évaluer comment les variations dans les données influencent les résultats, notamment en utilisant l'information mutuelle pour mesurer les impacts des variables.
- **Construction de Diagrammes d'Influence:** Étendre les réseaux bayésiens pour inclure des éléments décisionnels, créant ainsi des diagrammes d'influence qui intègrent les aspects décisionnels et probabilistes.
- **Optimisation des Décisions:** Déterminer les politiques de décision optimales à partir des diagrammes d'influence, permettant de prendre des décisions éclairées dans des contextes où les choix successifs dépendent des résultats antérieurs.
- **Apprentissage Automatique:** Apprendre et affiner les probabilités à partir de données existantes pour des réseaux dont la structure est déjà connue, améliorant ainsi la précision et l'efficacité des modèles probabilistes.

4.5 APPLICATION : « ANALYSE ET MODELISATION DE DEFAILLANCE DU FOUR ELECTRIQUE A INDUCTION (ALFET) PAR L'ARBRE DE DEFAILLANCE ET LES RESEAUX BAYESIENS »

4.5.1 Mise en œuvre

4.5.1.1 Présentation d'historique des pannes du four à induction [47]

Notre étude a pour objectif d'améliorer la fiabilité des fours électriques à induction en appliquant les méthodes de l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens pour diagnostiquer et modéliser les défauts. Après avoir suivi l'historique des pannes du four à induction fourni par ALFET entre la période du 01/03/2017 à 10/02/2021 en se basant sur les dates de démarrage et d'arrêt, nous avons résumé dans le tableau 1 suivant les causes des arrêts, les conséquences ainsi que les TTR et les TBF. [43]

Tableau VII.1. Dossier historique du four à induction [donné à ALFET].

N°	Date de démarrage	Date D'arrêt	Causes	TBF (h)	TTR (h)	Conséquences
1	01/03/2017	30/04/2017	Pas de débit d'eau.	1380	60	La surchauffe du four.
2	01/03/2017	01/04/2018	Dégradation de la pompe (débit d'huile insuffisant).	400	320	Blocage du vérin cause le blocage de four.
3	03/11/2017	06/01/2018	Surintensité.	980	460	Une diminution de l'efficacité de la fusion à cause de la bobine surchauffée.
4	31/12/2017	10/02/2018	Permutation étoile /triangle.	1240	200	Difficultés au démarrage de la pompe provoquant des retards dans le refroidissement de four.
5	01/01/2019	01/02/2019	Vibration du four.	660	60	- Fissuration du creuset. - Dégradations des composants électriques et mécaniques.

6	10/01/2019	13/02/2019	Bouchage de la bobine d'induction.	680	40	- Augmentation de la température de la bobine - Réduction de l'efficacité de la fusion. - Court-circuit
7	02/02/2019	04/04/2019	Indicateur de niveau erroné.	1130	300	L'arrêt de circuit de refroidissement.
8	10/02/2019	13/03/2020	Echauffement d'huile.	482	205	Blocage du four.
9	18/03/2019	20/05/2019	Surintensité.	926	511	Des courts-circuits et surchauffe.
10	25/03/2019	27/05/2019	Tension d'alimentation réduite.	1320	120	Instabilité du fonctionnement.
11	01/05/2019	03/07/2019	Surchauffage de la bobine d'induction	764	676	Mauvais fonctionnement.
12	09/09/2019	11/10/2019	Bouchage du four.	409	311	Perturbation du bon fonctionnement du processus de fusion.
13	15/11/2019	03/01/2020	Four bloqué.	1203	150	Arrêt de four.
14	02/03/2020	06/06/2020	Baise de tension.	1540	320	Mauvais fonctionnement.
15	12/03/2020	15/05/2020	Surintensité.	983	450	Perturbation de fonctionnement du four.

16	01/07/2020	30/08/2020	Blocage du vérin de basculement.	1000	320	Blocage du four.
17	01/11/2020	10/02/2021	Surchauffage du four.	1773	360	Mauvais fonctionnement.
18	30/12/2020	10/02/2021	Surchauffage de la bobine d'induction.	920	520	Mauvais fonctionnement.

4.5.1.2 Construction de l'ADD

❖ Identification des causes possibles (événements de base)

D'après le fichier historique du four électrique à induction basse fréquence, on remarque qu'il y a plusieurs causes de l'arrêt du four dans la période de [01/03/2017] a [10/02/2021].

Il est important de reconnaître que la modélisation de l'ensemble des pannes identifiées dans le dossier historique du four à induction serait extrêmement complexe et chronophage en raison de la diversité et du nombre de défaillances possibles. Chaque panne nécessite des calculs détaillés et des analyses spécifiques pour être correctement modélisée. Afin de garantir une analyse approfondie et rigoureuse, nous avons dû opérer une sélection des pannes les plus représentatives et pertinentes pour notre contexte d'étude.

Ces pannes sont:

Surintensité – Surchauffage de la bobine d'induction – Surchauffage du four – Baise de tension
- Blocage du vérin de basculement – Dégradation de la pompe (débit d'huile insuffisant) –
Bouchage du four.

❖ Evènements intermédiaires

Les défaillances sont classées selon leurs natures de l'effet de mode de défaillance (Mécanique, Hydraulique, Électriques et Thermique).

❖ **Événement redouté**

Panne d'un four électrique à induction.

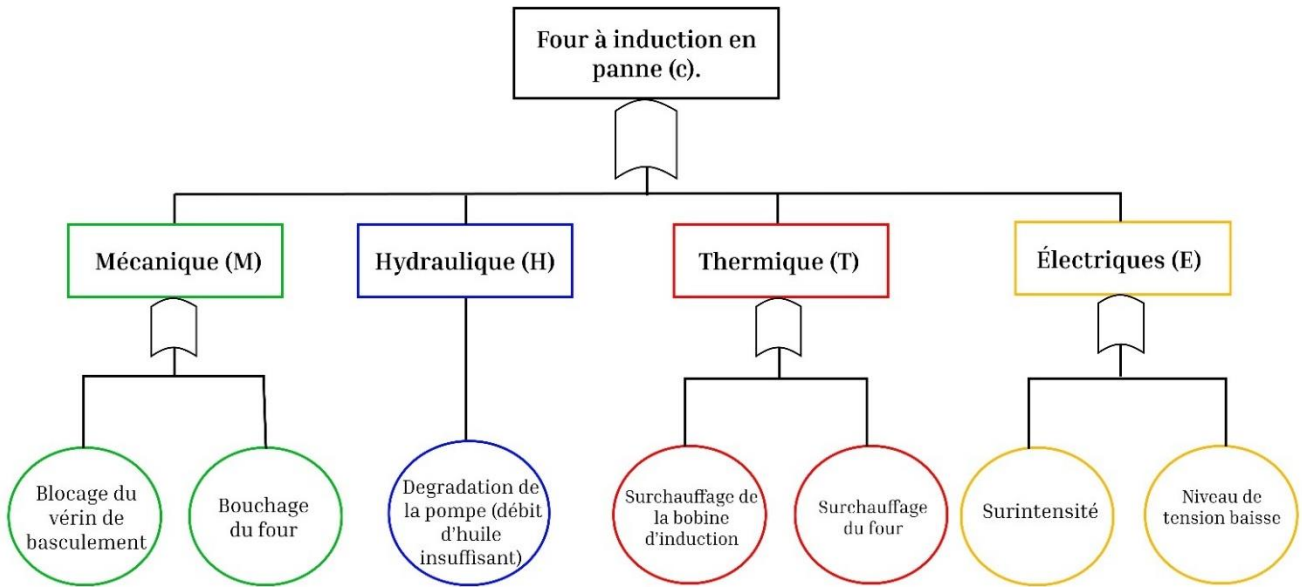


Figure VI.7. Add qualitative du Four à induction.

4.5.1.3 Tableau des probabilités

D'une part, du point de vue statistique on constate que:

- La période d'observation est du 01/03/2017 au 10/02/2021.
- Nombre total de défaillances observées $N_{tot} = 10$.
- Les défaillances sont classées en sept catégories avec leurs occurrences respectives $n_i = 7$.

Dans notre cas $N_{tot} = 10 < 20$, pour estimer La fonction de défaillance on va utiliser la méthode des rangs médians

$$F(t_i) = \frac{n_i - 0.3}{N_{tot} + 0.4} \quad (4.1)$$

D'autre part, du point de vue probabilité on sait que:

- La fonction de défaillance $F(t_i) = P(T \leq t_i)$ représente la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance avant l'instant.
- Sachant que la fonction de fiabilité $R(t) = 1 - F(t)$, on déduit l'estimation des $R(t_i)$.

Tableau VII.2. Tableau des probabilités.

N°	Les causes	Code	n_i	$F(t_i)$	$P(T \leq t_i)$
1	Surintensité	E1	3	0.259	0.259
2	Surchauffage de la bobine d'induction	T1	2	0.163	0.163
3	Surchauffage du four	T2	1	0.067	0.067
4	Baise de tension	E2	1	0.067	0.067
5	Blocage du vérin du basculement	M1	1	0.067	0.067
6	Dégradation de la pompe (Débit d'huile insuffisant)	H1	1	0.067	0.067
7	Bouchage du four	M2	1	0.067	0.067
			N_{tot} = 10		

4.5.1.4 Calcul des probabilités à postériori

Une fois que les probabilités des événements de base ont été estimées, nous pouvons calculer les probabilités des événements intermédiaires (mécaniques, hydrauliques, thermiques et électriques) en utilisant les portes logiques de l'arbre de défaillance (AdD) et l'algèbre booléenne.

$$P(M) = P(M1) + P(M2) - P(M1) \times P(M2) = 0.13$$

$$P(H) = P(H1) = 0.067$$

$$P(T) = P(T1) + P(T2) - P(T1) \times P(T2) = 0.219$$

$$P(E) = P(E1) + P(E2) - P(E1) \times P(E2) = 0.309$$

Les résultats sont synthétisés dans le tableau 3 suivant:

Tableau VII.3. Probabilités à postériori.

Mode de défaillance	Mécanique (M)	Hydraulique (H)	Thermique (T)	Électriques (E)
Porte logique	Porte « OU »	–	Porte « OU »	Porte « OU »
Probabilités à postériori	0.13	0.067	0.219	0.309

4.5.1.5 Quantification de l'Add

La probabilité d'occurrence de l'événement indésirable (C), sera calculée et intégrée dans des (Add).

$$P(C) = P(M) + P(H) + P(T) + P(E) - [P(M)P(H) + P(M)P(T) + P(M)P(E) + P(H)P(T) + P(H)P(E) + P(T)P(E)] + P(M)P(H)P(T) + P(M)P(H)P(E) + P(M)P(T)P(E) + P(H)P(T)P(E) - P(M)P(H)P(T)P(E).$$

$P(C) = 0.56195.$

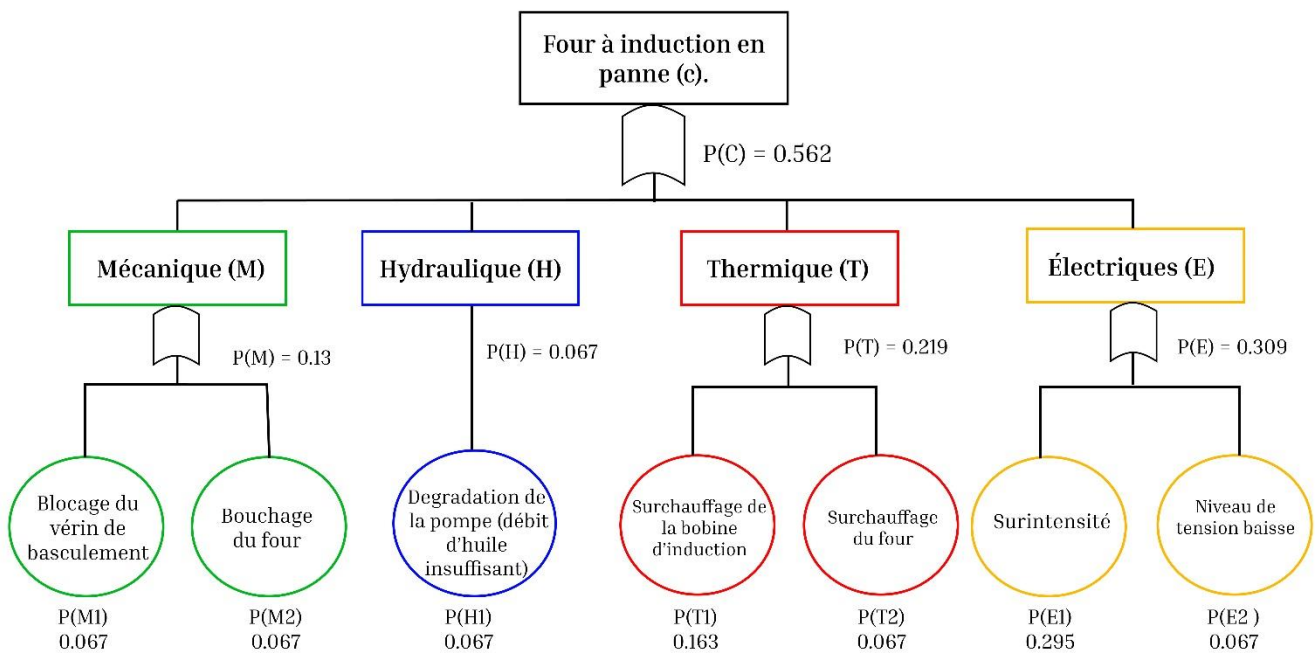


Figure VI.8. Add quantitative pour les défaillances du Four à induction.

4.5.1.6 Modélisation l'Add en réseau bayésien

Pour déterminer la probabilité d'occurrence de l'événement redouté (a priori), nous modélisons l'arbre de défaillance en utilisant des réseaux bayésiens. Cette approche permet de calculer la probabilité en s'appuyant sur le théorème de Bayes.

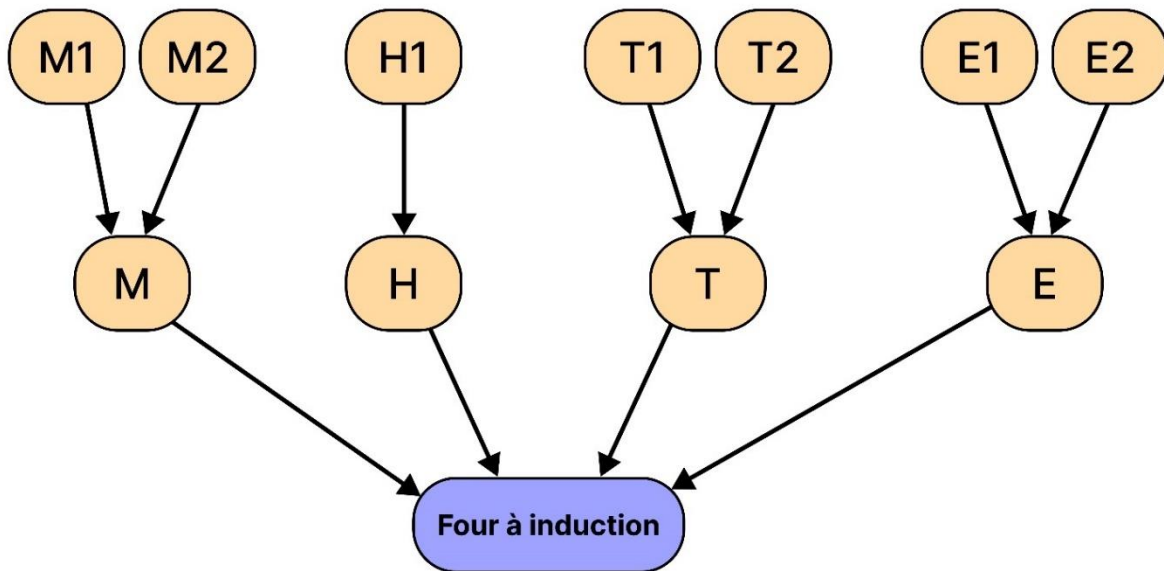


Figure VI.9. Modélisation de l'Add en RB.

4.5.1.7 Diagnostic des défaillances par réseaux bayésiens

A. Modélisation des défaillances du système

$$P(M \cup H \cup T \cup E) = P(M) + P(H) + P(T) + P(E) - [P(M \cap H) + P(M \cap T) + P(M \cap E) + P(H \cap T) + P(H \cap E) + P(T \cap E)] + [P(M \cap H \cap T) + P(M \cap H \cap E) + P(M \cap T \cap E) + P(H \cap T \cap E)] - P(M \cap H \cap T \cap E)$$

$$P(C, M, H, T, E) = P(C|M, H, T, E) \times P(M, H, T, E)$$

- $P(C, M, H, T, E)$: La probabilité conjointe que les événements C, M, H, T et E se produisent ensemble.
- $P(C|M, H, T, E)$: La probabilité conditionnelle que l'événement C se produise étant donné que les événements M, H, T et E se sont produits.
- $P(M, H, T, E)$: La probabilité conjointe que les événements M, H, T et E se produisent ensemble.

$$P(M/C) = P(C/M) \times P(M)/P(C)$$

$$P(H/C) = P(C/H) \times P(H)/P(C)$$

$$P(T/C) = P(C/T) \times P(T)/P(C)$$

$$P(E/C) = P(C/E) \times P(E)/P(C)$$

B. Inférence et probabilité conditionnelle

Le tableau 4 ci-dessous illustre la connaissance selon laquelle une défaillance mécanique, thermique ou hydraulique peut survenir dans le four à induction. Le four fonctionne uniquement si les composants mécanique, hydraulique et thermique sont opérationnels.

Dans l'arbre de défaillance, nous considérons la présence d'un défaut (V: vrai) ou l'absence d'un défaut (F: faux).

Tableau VII.4. Probabilité conditionnelle.

	M = V								M = F							
	H = V				H = F				H = V				H = F			
	T = V		T = F		T = V		T = F		T = V		T = F		T = V		T = F	
	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F	E = V	E = F
C = V	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
C = F	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Donc on peut alors se poser différentes questions,

- Quelle est la probabilité que le four reste opérationnel malgré une défaillance mécanique?

Pour répondre à cette question de probabilité, on utilise la loi de Bayes, ce qui permet de recalculer toutes les défaillances pour chaque modalité de chaque variable du réseau.

Les probabilités de défaillance des sous-systèmes sont normalisées pour devenir des probabilités a priori et on garde deux modalités:

- Présence de défaillance
- Absence de défaillance

Tableau VII.5. Probabilité des évènements M, H, T, E.

Défaillance	M	H	T	E
Probabilité a priori	0.13	0.067	0.219	0.309

$$\begin{aligned}
 P(C = V) = & P(C = V | M=V, H=V, T=V, E=V) \times P(M=V) \times P(H=V) \times P(T=V) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=V, H=V, T=V, E=F) \times P(M=V) \times P(H=V) \times P(T=V) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=V, H=V, T=F, E=V) \times P(M=V) \times P(H=V) \times P(T=F) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=V, H=F, T=V, E=V) \times P(M=V) \times P(H=F) \times P(T=V) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=F, H=V, T=V, E=V) \times P(M=F) \times P(H=V) \times P(T=V) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=V, H=V, T=F, E=F) \times P(M=V) \times P(H=V) \times P(T=F) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=V, H=F, T=V, E=F) \times P(M=V) \times P(H=F) \times P(T=V) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=F, H=V, T=V, E=F) \times P(M=F) \times P(H=V) \times P(T=V) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=V, H=F, T=F, E=V) \times P(M=V) \times P(H=F) \times P(T=F) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=F, H=V, T=F, E=V) \times P(M=F) \times P(H=V) \times P(T=F) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=F, H=F, T=V, E=V) \times P(M=F) \times P(H=F) \times P(T=V) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=V, H=F, T=F, E=F) \times P(M=V) \times P(H=F) \times P(T=F) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=F, H=V, T=F, E=F) \times P(M=F) \times P(H=V) \times P(T=F) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=F, H=F, T=F, E=V) \times P(M=F) \times P(H=F) \times P(T=F) \times P(E=V) + \\
 & P(C = V | M=F, H=F, T=V, E=F) \times P(M=F) \times P(H=F) \times P(T=V) \times P(E=F) + \\
 & P(C = V | M=F, H=F, T=F, E=F) \times P(M=F) \times P(H=F) \times P(T=F) \times P(E=F)
 \end{aligned}$$

C. Application numérique

$$\begin{aligned}
 P(C=V) = & (1 \times 5.894 \times 10^{-4}) + (1 \times 1.318 \times 10^{-3}) + (1 \times 2.10 \times 10^{-3}) + (1 \times 8.207 \times 10^{-3}) + (1 \times 3.944 \times 10^{-3}) + \\
 & (1 \times 4.1 \times 10^{-3}) + (1 \times 0.0183 \times 10^{-3}) + (1 \times 8.82 \times 10^{-3}) + (1 \times 0.0292) + (1 \times 0.014) + (1 \times 0.0549) + (1 \times 0.0654) + \\
 & (1 \times 0.0314) + (1 \times 0.195) + (1 \times 0.122) + (0 \times 0.438)
 \end{aligned}$$

$$P(C = V) = 0.5592784$$

$$P(M/C) = \frac{1 \times 0.13}{0.5592784} = 0.2324$$

$$P(H/C) = \frac{1 \times 0.067}{0.5592784} = 0.1197$$

$$P(T/C) = \frac{1 \times 0.219}{0.5592784} = 0.3915$$

$$P(E/C) = \frac{1 \times 0.309}{0.5592784} = 0.5524$$

4.5.1.8 Simulation avec logiciel Netica

La figure VI.10 représente le tableau des probabilités conditionnelles sous logiciel Netica.

Mecanique	Hydraulique	Thermique	Electriques	Defaillance C	Fiabilite C
Defaillance	Defaillance	Defaillance	Defaillance	1	0
Defaillance	Defaillance	Defaillance	Fiabilite	1	0
Defaillance	Defaillance	Fiabilite	Defaillance	1	0
Defaillance	Defaillance	Fiabilite	Fiabilite	1	0
Defaillance	Fiabilite	Defaillance	Defaillance	1	0
Defaillance	Fiabilite	Defaillance	Fiabilite	1	0
Defaillance	Fiabilite	Fiabilite	Defaillance	1	0
Defaillance	Fiabilite	Fiabilite	Fiabilite	1	0
Fiabilite	Defaillance	Defaillance	Defaillance	1	0
Fiabilite	Defaillance	Defaillance	Fiabilite	1	0
Fiabilite	Defaillance	Fiabilite	Defaillance	1	0
Fiabilite	Defaillance	Fiabilite	Fiabilite	1	0
Fiabilite	Fiabilite	Defaillance	Defaillance	1	0
Fiabilite	Fiabilite	Defaillance	Fiabilite	1	0
Fiabilite	Fiabilite	Fiabilite	Defaillance	1	0
Fiabilite	Fiabilite	Fiabilite	Fiabilite	0	1

Figure VI.10. TPC de l'évènement redouté sous Netica.

La prochaine étape consiste à remplir les données (probabilités) pour les événements Mécanique, Hydraulique, Thermique et Électriques.

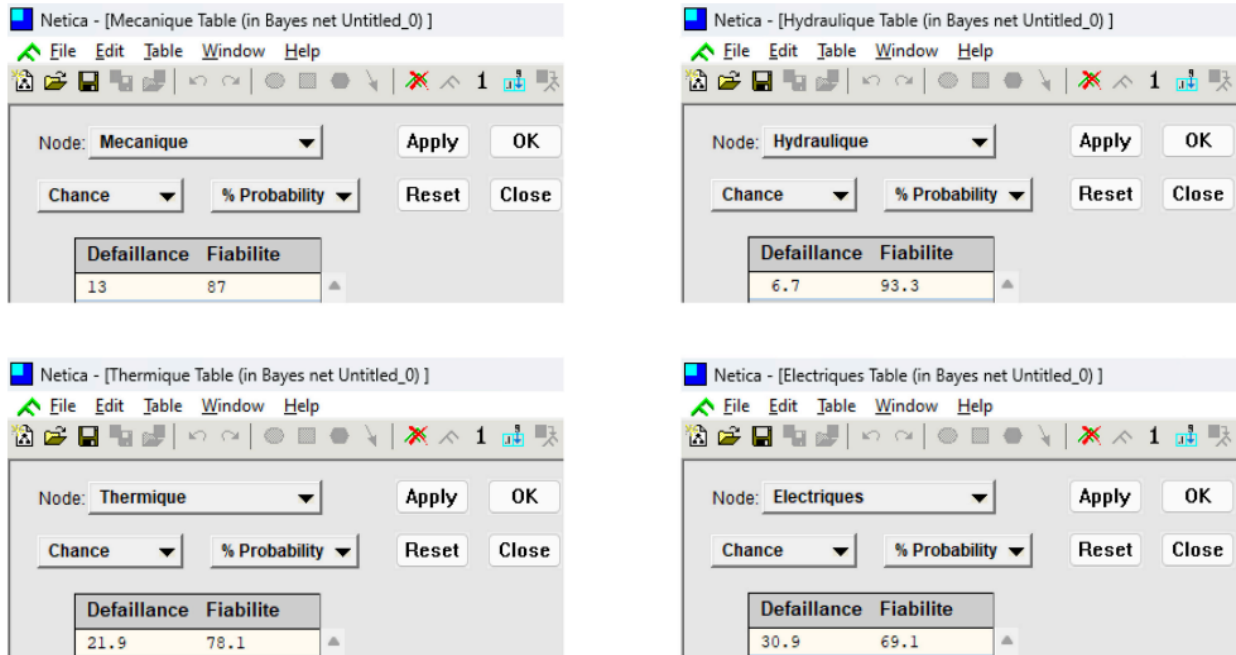


Figure VI.11. Probabilités de M, H, T, E sous Netica.

4.5.1.9 Résultat de simulation

1. Cas de l'étude

Nous réalisons d'abord une première inférence avec le logiciel Netica, qui permet de propager toute probabilité initiale ou a priori aux autres nœuds du réseau. Cela produit un nouveau tableau des croyances (probabilités) pour chaque nœud.

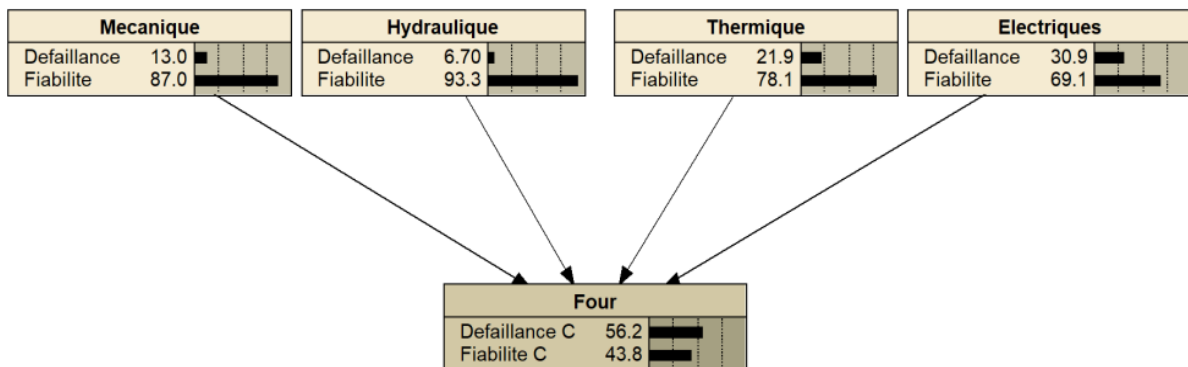


Figure VI.12. Inférence avec Netica, pour le four à induction.

➤ Discussion: Premier cas

- La probabilité d'occurrence de l'évènement redouté est identique à celle calculée par AdD, $P(C) = 0.5592784 \approx 0.56195$.

- Après l'analyse par AdD on trouve P (fiabilité du four) $= 1 - P(C) = 43.89\%$, ainsi la probabilité d'occurrence de l'évènement sommet P (défaillance du four) $= P(C) = 0.562$, ce qui vaut 56.2% . Cette probabilité est inacceptable, car la machine est stratégique. Afin d'optimiser sa disponibilité et prévenir les risques industriels, il est nécessaire de rechercher et d'identifier les causes profondes du système étudié, ainsi que de déterminer les solutions correctives et préventives pour minimiser ce pourcentage.

2. Cas de défaillance total du four

On place alors le système en défaillance totale, ce qui correspond à attribuer une probabilité de défaillance de 100% . Cette information est ensuite propagée à travers tous les réseaux bayésiens (inférence).

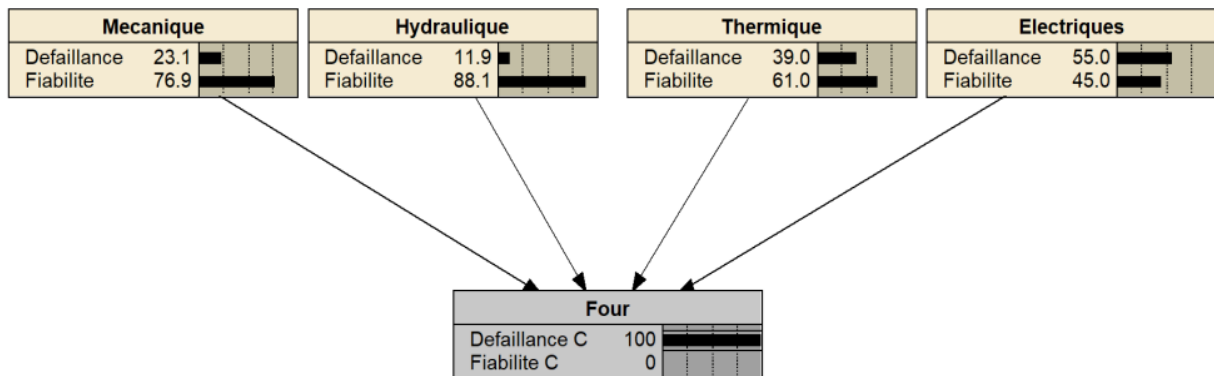


Figure VI.13. Cas de défaillance total du système.

➤ Discussion: Cas de défaillance total du four

- Les probabilités de défaillance pour les systèmes électriques, thermiques, mécaniques ou hydrauliques, étant donné un dysfonctionnement du four, sont respectivement de 55% , 39% , $23,1\%$ et $11,9\%$. Cela nous permet de mettre à jour nos croyances concernant la probabilité a priori.
- Les résultats de la simulation montrent que les défaillances sont principalement causées par les événements E1 (surintensité) et T1 (échauffement de la bobine). Ces événements sont donc les plus probables pour les défaillances du four à induction et doivent être traités en priorité

4.6 PLAN DE MAINTENANCE POUR LA PREVENTION DES RISQUES INDUSTRIELS D'UN FOUR ELECTRIQUE A INDUCTION

Le four à induction est un équipement vital dans de nombreux secteurs industriels pour la fusion et le traitement des métaux. Pour garantir son bon fonctionnement, il est essentiel de mettre en place un plan de maintenance préventive rigoureux. Ce plan permet de minimiser les risques de défaillances, d'optimiser les performances et de prolonger la durée de vie de l'équipement.

- **Nettoyage régulier :**

Nettoyez régulièrement les bobines d'induction et les connexions électriques afin d'éliminer toute saleté, débris ou dépôts susceptibles de nuire aux performances du four. Inspectez et nettoyez également les systèmes de refroidissement, tels que les échangeurs de chaleur, pour garantir une dissipation thermique efficace.

- **Vérification des composants électriques :**

Inspectez l'état des câbles électriques, des interrupteurs, des relais et des fusibles. Remplacez les composants endommagés ou usés. Assurez-vous que les connexions électriques sont bien serrées et en bon état.

- **Inspection des bobines d'induction :**

Examinez régulièrement les bobines d'induction pour repérer les fissures, les déformations ou les signes de surchauffe. Remplacez immédiatement les bobines défectueuses.

- **Vérification du système de refroidissement :**

Surveillez le système de refroidissement pour garantir le bon fonctionnement des pompes et un débit adéquat d'eau ou d'huile de refroidissement. Inspectez les filtres et nettoyez-les ou remplacez-les si nécessaire.

- **Lubrification des composants mécaniques :**

Lubrifiez les roulements, les engrenages et autres pièces mobiles selon les recommandations du fabricant. Inspectez et remplacez les joints d'étanchéité si nécessaire.

- **Formation du personnel :**

Veillez à ce que le personnel chargé de l'exploitation du four soit correctement formé aux procédures de maintenance préventive, aux mesures de sécurité et aux bonnes pratiques d'utilisation du four.

- **Planification et programmation de la maintenance :**

Planifiez et programmez la maintenance préventive en fonction des priorités, de la fréquence nécessaire pour chaque tâche (quotidienne, hebdomadaire, mensuelle, annuelle), et des ressources disponibles. Utiliser aussi des logiciels de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO) pour gérer le planning des interventions.

- **Suivi et évaluation :**

Suivez et évaluez régulièrement les interventions de maintenance pour ajuster le plan et améliorer l'efficacité.

4.7 CONCLUSION

Cette étude de cas sur le four à induction a permis de mettre en lumière l'importance d'un plan de maintenance préventive pour garantir la fiabilité et l'efficacité de l'équipement. En analysant l'historique des pannes et en identifiant les modes de défaillance principaux, nous avons pu développer une approche systématique pour prévenir les dysfonctionnements futurs. L'utilisation de méthodes statistiques et probabilistes, telles que l'arbre de défaillance et les réseaux bayésiens, s'est avérée essentielle pour quantifier les probabilités de défaillance et affiner nos diagnostics.

Grâce à cette analyse, nous avons élaboré un plan de maintenance préventive robuste, qui non seulement réduit les risques de défaillance mais optimise également les performances opérationnelles du four à induction. En conclusion, cette étude souligne l'importance d'une maintenance proactive et bien structurée, qui est indispensable pour le bon fonctionnement des équipements industriels et pour assurer une production continue et sans interruption.

Conclusion générale

Au terme de ce mémoire, nous avons exploré de manière exhaustive les différents aspects de la maintenance industrielle, des mécanismes de défaillance, des méthodes d'analyse et de modélisation des défaillances, ainsi qu'une étude de cas pratique sur un four électrique à induction.

Dans le premier chapitre on a commencé notre travail par une présentation de l'état de l'art de la maintenance industrielle, en abordant ses différents niveaux, la sûreté de fonctionnement et ses enjeux. Ce cadre théorique a permis de mieux comprendre l'importance cruciale de la maintenance dans le contexte industriel moderne.

Le deuxième chapitre s'est focalisé sur les divers modes et mécanismes de défaillance, tels que la corrosion, la détérioration des matériaux, l'usure et d'autres défaillances mécaniques et électriques. Nous avons également discuté des causes, de la classification et de la définition des défaillances, fournissant ainsi une vue d'ensemble des problèmes auxquels les industriels doivent faire face.

Dans le troisième chapitre, nous avons détaillé les différentes méthodes d'analyse qualitative et quantitative des défaillances, ainsi que leur modélisation. Des techniques comme l'arbre de défaillance, l'AMDEC et autres ont été présentées, mettant en lumière leur rôle essentiel dans le diagnostic et la prévention des pannes.

Le quatrième chapitre a concrétisé par une étude de cas sur un four électrique à induction., nous avons procédé à l'estimation des probabilités d'occurrences des événements indésirables. Pour cela, notre démarche méthodologique propose d'intégrer l'arbre de défaillance et le réseau bayésien, pour prendre en compte les données de retour d'expérience, pour faire des nouvelles prévisions probabilistes. Et une simulation a été effectuée avec le logiciel NETICA pour vérifier les résultats obtenus.

La discussion des résultats a conduit à l'élaboration d'un plan de maintenance préventive visant à minimiser les risques industriels. Il est important de noter que le manque de données pratiques et l'absence d'un historique complet rendent ces résultats sujets à une comparaison réelle et à une vérification supplémentaire.

En définitive, cette étude souligne l'importance de la modélisation et de l'analyse des défaillances pour la gestion des risques industriels. Elle met en avant la nécessité de promouvoir une culture de prévention et de sécurité dans les entreprises. En investissant dans la recherche et le développement d'outils innovants, nous pouvons créer des environnements industriels plus sûrs, fiables et durables, et ce travail simple reste une source d'espoir pour augmenter d'avantage la production et d'améliorer la qualité et l'efficacité du service maintenance.

Bibliographie

- [1] Livre, Le grand livre de la maintenance - Concepts, démarches, méthodes, outils et techniques.
- [2] Développement d'une approche d'aide à la maîtrise des risques dans les activités de maintenance d'une chaîne logistique : Approche par Modélisation et Simulation basée sur les Systèmes Multi-Agents,
["https://www.researchgate.net/publication/324121335_Developpement_d'une_approche_d'aide_a_la_maitrise_des_risques_dans_les_activites_de_maintenance_d'une_chaine_logistique_Approche_par_modelisation_et_simulation_basee_sur_les_systemes_multi-agents"](https://www.researchgate.net/publication/324121335_Developpement_d'une_approche_d'aide_a_la_maitrise_des_risques_dans_les_activites_de_maintenance_d'une_chaine_logistique_Approche_par_modelisation_et_simulation_basee_sur_les_systemes_multi-agents)
- [3] MAINTENANCE Méthodes et organisations, Livre de François Monchy
- [4] Maintenance des Moteurs Diesel,
["https://www.researchgate.net/publication/302992486_Maintenance_des_Moteurs_Diesel"](https://www.researchgate.net/publication/302992486_Maintenance_des_Moteurs_Diesel).
- [5] Maintenance industrielle Fonction maintenance, publié par AFNOR en mai 2002, ["https://se2t-france.com/pdf/normefdx60000.pdf"](https://se2t-france.com/pdf/normefdx60000.pdf).
- [6] [Module de sûreté de fonctionnement](#) par C. Pagetti-ENSEEIH (2010).
- [7] [Maîtrise des risques, sûreté et sûreté de fonctionnement](#) par A. Lannoy (2017).
- [8] [Modélisation et évaluation de la sûreté de fonctionnement](#) par AE Rugina (2007).
- [9] [DE LA CONCEPTION A LA SURETE DE FONCTIONNEMENT](#) par M. Bouissou et al.
- [10] [Une expertise de Sûreté de Fonctionnement en maîtrise d'ouvrage: pourquoi?](#) par H. Du Baret (2022)
- [11] Polycopié de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), Faculté des Sciences de la Technologie Département Génie des Transports, Pr. Ahmed BELLAOUAR M.A. Salima BELEULMI UNIVERSITE Constantine 1, Année Académique 2013-2014.
- [12] [Organisation et gestion de la maintenance Industrielle](#) par G. Hocine (2023)
- [13] [Etude de la Maintenance Industrielles](#) par C. Kamel (2020)

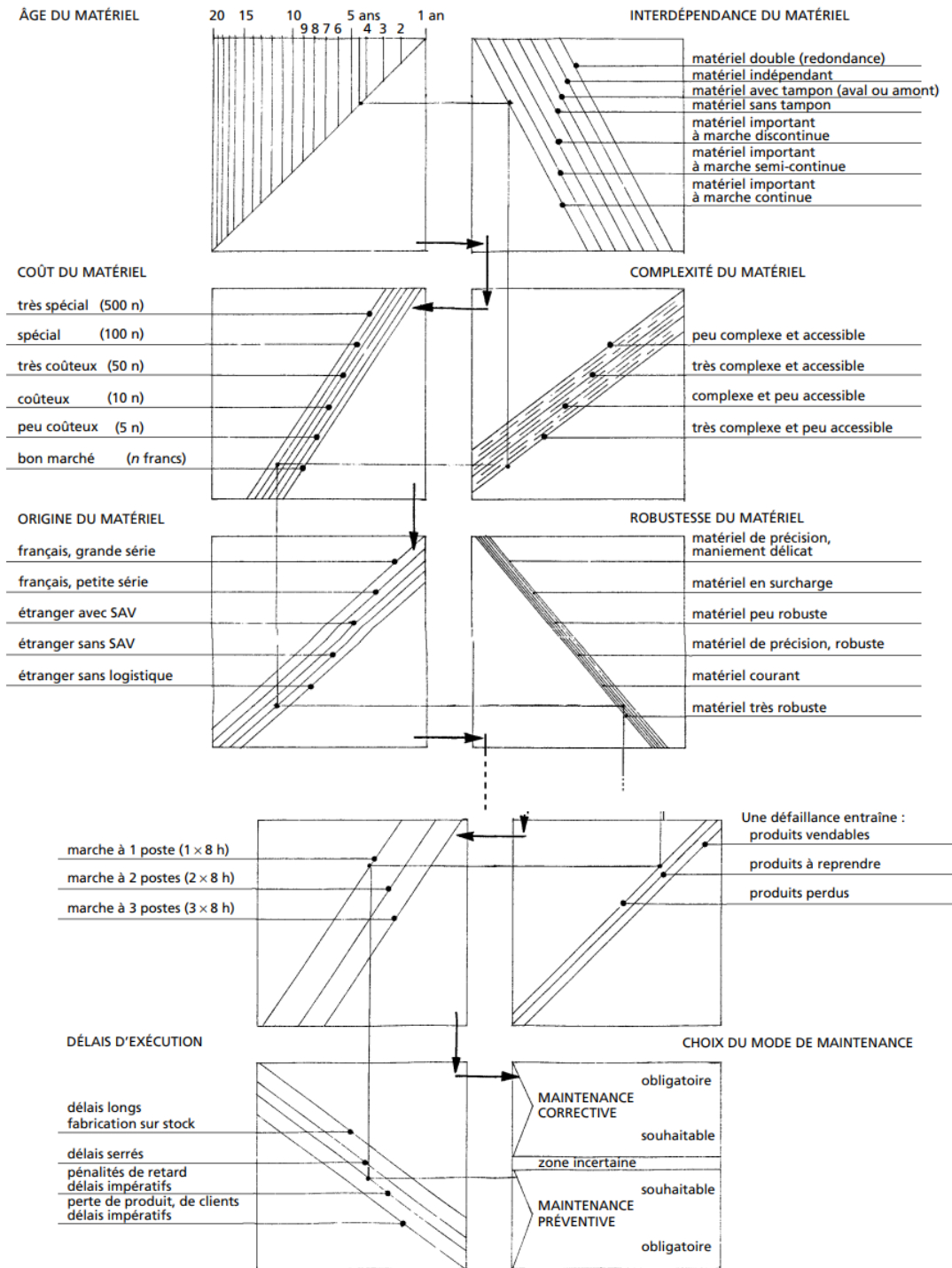
- [14] [L'entreprise à l'épreuve des facteurs humain et organisationnel: la pratique de l'analyse d'accident au service de la sécurité à GrDF](#) par G. Desmorat (2012)
- [15] Modèle Intégré d'Analyses Multirisques - N. Touili (2018), [Lire l'article complet](#)
- [16] Nouvelle Approche de la Sécurité Basée sur la Raison Pratique - H. Blazsin, F. Guarnieri (2014), [Lire l'article complet](#)
- [17] Analyse et Gouvernance Adaptative - P. Lascoumes (1996), [Lire l'article complet](#)
- [18] Concepts et stratégies de maintenance, <https://hubertfaigner.fr/approche-par-le-risque-en-maintenance/>
- [19] Livre 'Guide de la maintenance industrielle', Delagrave.
- [20] Techniques de l'Ingénieur 'Fonction stratégique de la maintenance' Réf. Internet : 42137 | 4^e édition
- [21] Livre 'La maintenance basée sur la fiabilité' par Gilles Zwingelstein. HERMES.
- [22] 'Les défaillances' [Le BTS MS Archives - Ressources et Cours en Ligne pour le BTS Maintenance des Systèmes \(hubertfaigner.fr\)](#).
- [23] [La résistance des matériaux - myMaxicours](#)
- [24] Cours 'MECANIQUE DE LA RUPTURE' Université Oran 2 IMSI
- [25] Livre 'Corrosion localisée' par F. DABOSI, G. BERANGER, B. BAROUX.
- [26] [22] « Introduction à la maintenance », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul., 2013. [Analyse des défaillances et aide au diagnostic \(technologuepro.com\)](#).
- [27] 'Diagnostic' [Le BTS MS Archives - Ressources et Cours en Ligne pour le BTS Maintenance des Systèmes \(hubertfaigner.fr\)](#).
- [28] Livre 'Diagnostic des défaillances' par Gilles Zwinglstein .HERMES.
- [29] 'Les outils d'analyse de défaillance' [Le BTS MS Archives - Ressources et Cours en Ligne pour le BTS Maintenance des Systèmes \(hubertfaigner.fr\)](#).
- [30] Livre 'Maintenance industrielle '.memotech .

- [31] VESELY W.E., STAMATELATOS M., DUGAN J.B., FRAGOLA J., MINARICK J., RAILSBACK J., 2002. Fault Tree Handbook with Aerospace Applications. NASA Office of Safety and Mission Assurance.
- [32] Livre NIKOLAOS LIMNIOS, « Fault Trees », ISTE Ltd, United State, 2007.
- [33] Vesely, W.E., Goldberg, F.F, U.S NuclearRegulatoryCommission, Roberts, N.H., University of Washington, Haasl, D.F, Institute of system Sciences, Inc, « FaultTreeHandbook. », January 1981.
- [34] Norman FENTON, Martin NEIL. Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks. 2013.
- [35] Salima BELEULMI. Contribution à l'Analyse Bayésienne en Fiabilité des Systèmes Mécanique. Université des frères MENTOURI Constantine 2016.
- [36] Guetarni Islam Hadj MOHAMED, «Analyse Quantitative Des Risques : Application Sur Les Bacs De Stockage», Doctorat LMD, Université d'Oran 2, 2019.
- [37] Henri PROCACCIA, Eric FERTON and Marc PROCACCIA. Fiabilité Et Maintenance Des Matériels Industriels Réparables Et Non Réparables. Lavoisier Paris 2011.
- [38] UNIVERSITE M'HAMED BOUGERRA BOUMERDES FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE DIAGNOSTIC ET SURVEILLANCE PAR Dr.K.IRINISLIMAN.
- [39] [Four à induction - FONDERIE VINCENT \(fonderie-vincent.com\)](http://fonderie-vincent.com).
- [40] [Interface \(fonderie-ardennes.fr\)](http://fonderie-ardennes.fr).
- [41] [Quels Sont Les Types De Fours À Induction ? - Kintek Solution \(kindle-tech.com\)](http://kindle-tech.com).
- [42] [LES FOURS A INDUCTION EN FONDERIE \(centerblog.net\)](http://centerblog.net).
- [43] [Application du four de fusion d'aluminium à induction \(dw-inductionheater.com\)](http://dw-inductionheater.com).
- [44] [CHAUFFAGE INDUSTRIEL PAR INDUCTION : TOUT CE QUE VOUS DEVEZ SAVOIR - Wattco](http://Wattco).
- [45] <https://www.norsys.com/WebHelp/NETICA.htm>

- [46] MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES 'Diagnostic de défaut d'un four électrique par la méthode de l'arbre de défaillance' par BELHEZIEL Abdelhak et MOUFFOK Mimouna 2023 Université Ibn Khaldoun de Tiaret Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Mécanique.
- [47] PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER 'Analyse FMD d'un four à induction' par M. Farouk Abd eldjilil et H. Nadhir 2022 Université Ibn Khaldoun de Tiaret Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Mécanique .

Annexes

ANNEXE A : UTILISATION DE L'ABAQUE DE NOIRET



1. **Abaque AGE DU MATÉRIEL**

2. **Abaque INTERDÉPENDANCE DU MATÉRIEL**

a : Matériel doublé

b : Matériel indépendant

c : Matériel avec tampon aval ou amont

d : Matériel sans tampon

e : Matériel important à marche discontinue

f : Matériel important à marche semi-continue

g : Matériel important à marche continue

3. **Abaque COMPLEXITÉ DU MATÉRIEL**

a: Matériel peu complexe et accessible

b : Matériel très complexe et accessible

c : Matériel complexe et peu accessible

d : Matériel très complexe et peu accessible

4. **Abaque COUT DU MATÉRIEL**

a : Matériel bon marché

b : Matériel peu coûteux

c : Matériel coûteux

d : Matériel très coûteux

e : Matériel spécial

f : Matériel très spécial

5. **Abaque ORIGINE DU MATÉRIEL**

a : Matériel du pays - grande série

b : Matériel du pays - petite série

c : Matériel étranger avec service après-vente

d : Matériel étranger sans service après-vente

e : Matériel étranger sans service technique

6. Abaque ROBUSTESSE DU MATÉRIEL

a : Matériel très robuste

b : Matériel courant

c : Matériel de précision robuste

d : Matériel peu robuste

e : Matériel en surcharge

f : Matériel de précision - maniement délicat

7. Abaque CONDITIONS DE TRAVAIL

a : Marche à un poste

b : Marche à deux postes

c : Marche à trois postes

8. Abaque PERTE DE PRODUIT

a : Produits vendables - suite d'une défaillance matérielle

b : Produits à reprendre - suite d'une défaillance matérielle

c : Produits perdus - suite d'une défaillance matérielle

9. Abaque DÉLAI D'EXÉCUTION

a : Délais libres - fabrication sur stock

b : Délais serrés

c : Délais impératifs - pénalité de retard

d : Délais impératifs - produits non vendus - perte clientèle

10. Abaque CHOIX DE TYPE DE MAINTENANCE

- Zone Maintenance corrective obligatoire ou souhaitable
- Zone Incertitude
- Zone Maintenance préventive

ANNEXE B : TABLEAU DE COEFFICIENT

Désignation critères	NB PTS	COEF	Désignation critères	NB PTS	COEF
LES CONDITIONS DE TRAVAIL			COÛT DU MATERIEL		
- Production continue 3*8	50	5	- Matériel à 1 seule unité ou très spéciale 300000 F	55	1
- Production de jour 2*8	35	5	- Matériel coûteux compris entre 100000 et 300000 F	25	1
- Production en 1 poste 1*8	15	5	- Matériel peu coûteux compris entre 20 000 et 100000 F	15	1
DELAIS D'EXECUTION			- Matériel pas coûteux : à 20000 F	5	1
- Délais impératif avec perte de clients	45	5	ORIGINE DU MATERIEL		
- Délai impératif avec paiement d'indemnité	30	5	- Matériel étranger sans ST	45	2
- Délais serrés	20	5	- Matériel étranger avec ST	25	2
- Délais inexistantes livraison sur stock	5	5	- Matériel local petite diffusion	20	2
L'AGE DU MATERIEL			- Matériel local grande diffusion	10	2
- Matériel neuf (-1 an)	45	2	ROBUSTESSE DU MATERIEL		
- Matériel jeune (1à 5 ans)	30	2	- Matériel de grande précision et de maniement délicat	30	1
- Matériel âgé (5à 10 ans)	20	2	- Matériel travaillant en surcharge	30	1
- Matériel démodé (10 ans)	5	2	- Matériel peu robuste	25	1
INTERDEPENDANCE DU MATERIEL			- Matériel de précision robuste	10	1
- Matériel d'infrastructure à marche continue	35	2	- Matériel robuste	5	1
- Matériel d'infrastructure à marche discontinue	25	2	PERTE DE PRODUIT		
- Matériel sans tampon amont ou aval	25	2	- Produits perdus non commercialisables (ferrailles)	55	1
- Matériel indépendant	10	2	- Pièces à reprendre	35	1
- Matériel double	5	2	- Pièces commercialisables sans reprises	10	1
COMPLEXITE DU MATERIEL					
- Très complexe et inaccessible	45	1			
- Peu complexe et inaccessible	25	1			
- Très complexe et accessible	25	1			
- Peu complexe et accessible	5	1			

ANNEXE C : TERMINOLOGIE

Selon la norme CEI 61508 [IEC 02] et AFNOR [AFN 88] :

Système :

Ensemble d'éléments qui interagissent selon un modèle précis, un élément pouvant être un autre système, appelé sous-système, les sous-systèmes pouvant être eux-mêmes soit un système de commande soit un système commandé composé de matériel, des composants.

Sous-système :

Ensemble de composant (mécanique, électromécanique, électronique, ...).

Composant :

Un composant est une partie d'un système (matériels ou événements), non décomposable dans le cadre de l'étude, et pour laquelle on dispose d'informations qualitatives (conditions de fonctionnement, modes de défaillance, ...) et quantitatives (fréquences d'apparitions des pannes, durées de bon fonctionnement, ...) suffisantes. Le type de composants, leurs quantités, leur qualité et leur manière dont ils sont disposés ont un effet direct sur la fiabilité du système.

Redondance :

Existence de plus de moyens que strictement nécessaire pour accomplir une fonction requise dans une unité fonctionnelle ou pour représenter des informations par des données.

Risque :

effet de l'incertitude sur des objectifs », mettant ainsi l'accent sur les effets d'une connaissance incomplète des événements ou des circonstances sur le processus de prise de décision au sein d'un organisme.

Un symptôme:

Une trace d'une erreur dans le système qui se manifeste comme un phénomène à caractère perceptible ou observable lié à un état ou une évolution. Il est considéré comme une anomalie indésirable de comportement qui peut présager d'une défaillance à venir. C'est pourquoi il faut décrire le symptôme de la façon la plus précise possible, c'est-à-dire caractériser la défaillance.

L'erreur:

une manifestation d'une faute dans le système.

Un défaut est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.

Un défaut

est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.