

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Diagnostic de défaut d'un four
électrique par la méthode de l'arbre de
défaillance

Préparé par :

BELHEZIEL Abdelhak et MOUFFOK Mimouna

Soutenu publiquement le : / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M. BENAAMAR Badr	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. BOURGUIG Kada	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M.BEY Mohamed	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. SLIMANI Halima	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2022– 2023

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail avec tous nos coeurs à :

Nos chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sincères sentiments , pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices.

Notre directeur de recherche, Dr SLIMANI HALIMA pour sa guidance précieuse, son expertises et sa patience .

Nos familles à tous nos chers amis

Nos frères et sœurs

Tous ceux que j'aime

Ce mémoire est le fruit d'un travail collectif et nous souhaitons dédier cette realisation 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 indefectible et votre confiance tout au long de ce parcours.

MOUNA, HAKOU

Remerciements

Selon la tradition, et à travers de cette page de remerciements Nous tenons à saluer tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude de notre master. Le parcours qui nous a menés jusqu'à ce stade de notre formation n'aurait pas été possible sans le soutien inestimable et l'apport précieux de nombreuses personnes, que nous souhaitons chaleureusement remercier.

Nous tenons, tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos gratitude à notre directeur de mémoire Dr. **SLIMANI HALIMA** pour la confiance, les encouragements, les orientations, les précieux conseils qu'elle nous a accordés durant la période de préparation de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir examiner notre travail et de l'enrichir par leurs remarques pertinentes.

Nous désirons aussi nos sincères remerciements à **MONSIEUR GUEMMOUR MOHAMED** pour ses conseils et ses orientations et l'ensemble de l'équipe pédagogique de l'université **Ibn Khaldoun** de **Tiaret**, spécialement du département de **Génie Mécanique**, qui nous ont contribué à notre formation pour arriver à ce stade. Nos remerciements s'adressent profondément nos familles pour le soutien moral, sans oublier aussi nos amis et nos camarades de la promotion Maintenance Industrielle 2023 pour les encouragements et pour le temps agréable que nous avons passé ensemble.

Finalement, nous sommes conscients que ce mémoire de fin d'étude n'aurait pas pu voir le jour sans l'appui et l'implication de toutes les personnes mentionnées précédemment. Leur contribution a été déterminante dans mon cheminement académique et personnel.

Veillez accepter nos plus sincères remerciements.

MOUNA, HAKOU

SOMMAIRE

Chapitre 1

1. INTRODUCTION.....	3
1.1. Historique.....	3
1.2. Définition	4
1.3. Les objectifs de maintenance	6
1.4. Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise	6
1.5. Rôles de la fonction maintenance dans l'entreprise.....	7
1.6. Stratégies de la fonction maintenance	8
1.7. Activités de la fonction maintenance	9
1.8. Différentes politiques de maintenance.....	9
1.8.1 Maintenance préventive	9
1.8.2 Maintenance préventive systématique	10
1.8.3 Maintenance préventive conditionnelle	10
1.8.4 Maintenance préventive prévisionnelle	11
1.8.5. Maintenance corrective	11
1.8.5.1. Maintenance corrective palliative.....	11
1.8.5.2. Maintenance corrective curative.....	11
1.8.6. Maintenance « améliorative »	12
1.9. Niveaux de maintenance	12
1.9.1. Premier niveau.....	12
1.9.2. Deuxième niveau	12
1.9.3. Troisième niveau	13
1.9.4. Quatrième niveau.....	13
1.9.5. Cinquième niveau.....	14
1.10. Démarche de la maintenance	14
1.11. Défaillance en maintenance	15
1.11.1. Définition	15
1.11.2. Classification des défaillances.....	16
1.12. Supervision, surveillance et diagnostic.....	16
1.13. Le diagnostic	17
1.13.1. Définitions.....	17
1.13.2. Rôle du diagnostic	18

1.13.3. Méthodes de diagnostic.....	18
1.13.3.1. Méthodes internes	19
1.13.3.2. Méthodes externes	20
1.13.3.3. Méthodes inductives et déductives	20
1.13.3.4. Méthodes quantitatives et qualitatives	20
1.14. CONCLUSION	24

Chapitre 2

2. INTRODUCTION.....	26
2.1. Historique et domaine d'application.....	26
2.2. Définition et objectives	26
2.3. Principe de fonctionnement	27
2.4. Représentation graphique de l'AdD	28
2.4.1. Evènements	28
2.4.2. Portes logiques	29
2.4.3. Symboles de transfert	30
2.5. Etapes de la mise en œuvre de l'AdD	31
2.6. Démarche et Construction de l'arbre de défaillances.....	32
2.6.1. Définir le système à étudier	33
2.6.2. Énoncer la défaillance à analyser	34
2.6.3. Etudier le système	34
2.6.4. Reconnaître les causes probables possibles	34
2.7. Construction de l'AdD.....	34
2.7.1. Etapes de construction	34
2.7.1.1. Evènement redouté ou sommet (évènement indésirable)	34
2.7.1.2. Evènement intermédiaires.....	35
2.7.1.3. Evènements élémentaires, de base, transfert et conditions	35
2.7.2. Les règles de construction.....	35
2.9. Analyse de l'AdD.....	36
2.8.1 Analyses qualitatives de l'AdD.....	36
2.8.2 Analyse quantitative de l'AdD.....	38
2.8.3. Méthodes directes de calcul de probabilité	39
2.8.4. Méthodes indirectes de calcul de probabilité	40

2.9. CONCLUSION	42
Chapitre 3	
3. INTRODUCTION.....	44
3.1. Fours electriques.....	44
3.2. Le Four électrique à Induction	44
3.2.1. Définition	44
3.2.2. Principe de fonctionnement.....	45
3.2.3. Types de four à induction.....	46
3.2.4. Applications industrielles des fours à induction.....	47
3.2.5. Autres applications de l'induction.....	47
3.2.6. Avantages et inconvénients des fours à induction.....	47
3.2.7. Four électrique à induction à basse fréquence (installé au niveau de l'entreprise ALFET)	48
3.3. Modes de défaillances d'un four électrique à induction	50
3.4. Application : « Diagnostic de défauts du four électrique à induction basse fréquence par l'arbre de défaillance »	54
3.5. Construction de l'Add.....	56
3.6. Plan de maintenance préventive d'un four électrique à induction	62
3.7.CONCLUSION	63

ABRIVIATIONS

ISO : Organisation internationale de normalisation.

ANSI : American National Standards Institute.

NE : Norme Européenne.

DIN : L'institut allemand de normalisation.

AFNOR : Association Française de Normalisation.

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité.

AMDE : Analyse des modes de défaillance, de leurs effets.

AdD : Arbre de défaillances.

5M : Matières, matériels, milieu, méthodes, main d'œuvre.

M : La partie mécanique.

H : La partie hydraulique.

T : La partie thermique.

ALFET : Algérienne des fonderies Tiaret.

NOMENCLATURE***SYMBOLE DÉSIGNATION***

EI : Evènement indésirable

P(E) : La probabilité de l'évènement E

P(E1.E2) : Probabilité composée

A : Evènement observée

B : Evènement étudié

P(A) : Probabilité à priori

P(B|A) : La probabilité que B se produise lorsqu'A est vrai

F(t) : La fonction de défaillance

P (T≤t) : la probabilité d'occurrence d'un mode de défaillance avant l'instant t.

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Mise en situation du service maintenance dans l'entreprise industrielle7
 Figure 1.2 : Les activités de la fonction maintenance.....9
 Figure 1.3 : Schéma générale de supervision 17
 Figure 1.4 : Classification des méthodes de diagnostic..... 19
 Figure 1.5 : Diagramme de Pareto ou courbe ABC 21
 Figure 1.6 : Classification des principes méthodes de l'analyse qualitative 22
 Figure 1.7 : Diagramme d'Ishikawa..... 23
 Figure 1.8 : Feuille d'analyse AMDEC..... 23
 Figure 1.9 : L'arbre de défaillance 24

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Différents événement de l'arbre analyste 31
 Figure 2.2 : Les étapes d'analyse de l'AdD..... 32
 Figure 2.3 : Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillance..... 33
 Figure 2.4 : Exemple élémentaire pour le calcul des coupes minimales..... 37
 Figure 2.5 : Porte ET 38
 Figure 2.6 : Porte OU 39

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : Four électrique à induction 45
 Figure 3.2 : Chauffage d'un métal par induction 45
 Figure 3.3 : Isolation de bobine de four à induction. 45
 Figure 3.4 : Fours à creuset..... 46
 Figure 3.5 : Corps d'un four à creuset..... 46
 Figure 3.6 : Schéma d'un four à canal 47
 Figure 3.7 : four à canal..... 47
 Figure 3.8 : Schéma descriptif d'un four électrique à induction..... 49
 Figure 3.9 : Schéma d'installation du système de refroidissement du four..... 50
 Figure 3.10 : vue des deux pompes du système de refroidissement du four 50
 Figure 3.11 : Schéma d'installation électrique du four 50
 Figure 3.12 : Usure et rupture des matériaux réfractaires 51
 Figure 3.13 : défaillance de bobines d'induction..... 52
 Figure 3.14 : Fuite de matériau fondu 52

Figure 3.15 : Câbles électriques endommagés.....	53
Figure 3.16 : Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence.....	57
Figure 3.17 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts Mécaniques)	58
Figure 3.18 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts électriques)	59
Figure 3.19 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts thermiques).....	60
Figure 3.20 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts hydrauliques).....	61

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1

Tab 1.1: Comparaison entre entretien et maintenance4

CHAPITRE 2

Tab. 2.1 : Symboles des évènements dans l'AdD28

Tab. 2.2 : Symboles des portes logiques dans l'AdD29

Tab. 2.3 : Symboles de transfert sous l'AdD30

CHAPITRE 3

Tab 3.1 : les avantages et les inconvénients d'un four à induction48

Tab 3.2 : Dossier historique du four à induction [donné à ALFET]54

Introduction générale

Introduction générale

Le contenu du présent travail s'intègre dans un contexte technologique en relation avec le secteur industriel et particulièrement celui de l'industrie de fonderie. Dans ce type d'industrie, le processus de production s'appuie fortement sur l'exploitation des fours. Les entreprises qui activent dans ce domaine sont de plus en plus sensibilisées à l'importance des coûts induits par les défaillances accidentelles des systèmes de production telle que les fours électrique à induction.

Les fours électriques à induction sont des équipements d'une importance capitale dans l'industrie. Grâce à leur technologie de chauffage électromagnétique, ces fours sont appréciés pour leur efficacité énergétique et leur capacité à améliorer la productivité des opérations industrielles. Il a connu un développement technologique remarquable.

Le présent mémoire s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études pour l'obtention de diplôme de master en maintenance industrielle, sous le thème : « **Diagnostic de défaut d'un four électrique par la méthodes de l'arbre de défaillance** ».

L'application des méthodes prévisionnelles de maintenance à des matériels à haute production est moins coûteuse que la perte de production due un arrêt du matériel. L'arrêt d'une seule machine peut entraîner l'arrêt de toute la ligne.

Dans le but de mettre en pratique et valoriser nos connaissances théoriques acquise durant notre cursus universitaire dans la spécialité maintenance industrielle, notre objectif était de fournir aux hommes de maintenance un outil d'aide pour diagnostiquer qualitativement et quantitativement les défaillances qui peuvent survenir aux niveau des fours électriques à induction afin d'améliorer son taux de sa disponibilité et garantir sa longévité.

Pour mieux arborer notre travail, ce manuscrit est structuré sous forme de trois chapitres :

Dans le premier chapitre on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérative nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours en faveur d'un meilleur rendement de la production et de l'économie. Quelques définitions concernant la maintenance, les défaillances et le diagnostic avec ses différentes méthodes. D'une manière générale un chapitre coutumiers dans la spécialité.

Le contexte du second chapitre sera présenté l'une de ses méthodes savoir l'arbre de défaillance dans l'aspect qualitative et quantitative et quelques méthodes de calcul de probabilité.

Enfin, le troisième et dernier chapitre, est considéré comme la pièce maitresse de ce travail. Il est entièrement consacré au diagnostic de défauts par la méthode de l'arbre de défaillance, à l'aide de cette méthode et à la base de l'historique apporté de ALFET, on va d'établir un arbre de défaillance du four électrique à induction selon quatre modes de défauts et de préciser les causes principales de l'arrêt dans chaque type de défaut. Et bien-sûr on clôture ce manuscrit par une conclusion générale qui donne un aperçu global de tout le travail réalisé dans ce projet.

*Chapitre 1: Notions
générale sur la
maintenance*

Chapitre1 : Notions générale sur la maintenance

1. INTRODUCTION

Les installations et les équipements tendent à se détériorer dans le temps sous l'action de causes multiples (usures, déformations) dues au fonctionnement, à l'action des agents corrosifs (agent chimique, atmosphère,...etc.). Ces détériorations peuvent provoquer l'arrêt de fonctionnement (pannes), la diminution des capacités de production, l'augmentation des coûts de réparation et la mise en péril de la sécurité des personnes.

Dans ce chapitre, on va présenter des concepts généraux sur la maintenance industrielle en abordant l'importance, l'entretien et la situation de cette dernière dans une entreprise, son organisation, les politiques de maintenance, ses cinq niveaux et sa démarche.

1.1. HISTORIQUE

- **Avant 1900:** On parlait de **réparation**
- **De 1900 – 1970:** Vu le développement des chemins de fer, de l'automobile, de l'aviation et l'armement pendant la première et la seconde guerre mondiale, on a remplacé le terme de réparation par la notion **d'entretien**.
- **1970 – aujourd'hui :** Les développements de secteurs à risques et d'outils modernes, on a remplacé le terme d'entretien par la notion de **maintenance**.

Les principales raisons à retenir pour le passage de la notion d'entretien à la notion de maintenance sont:

- Evolution technologique
- Coûts
- Automatisation
- Amortissement
- Contraintes réglementaires

Le tableau Tab 1.1 compare les caractéristiques de l'entretien et de la maintenance : [1]

Tab 1.1: Comparaison entre entretien et maintenance	
Entretien	Maintenance
Subir la défaillance	Maîtriser la défaillance
Activité statique	Activité dynamique
Cloisonnement	Interpénétration
Un service à coté des autres	Fonction stratégique de l'entreprise

1.2.Définition

1°. Selon la norme ISO (9000 :2015) (Organisation internationale de normalisation), qui concerne les systèmes de gestion de la qualité, définit également la maintenance comme l'ensemble des actions techniques et administratives entreprises pour conserver un équipement, un système ou une installation dans un état spécifié, afin de garantir un fonctionnement satisfaisant et/ou de détecter et de corriger les défaillances potentielles.

2°. Selon ANSI (American National Standards Institute) : All actions appropriate for retaining an item/part/equipment in, or restoring it to, a given condition.

3°. Selon NE (EN 13306/2001) (Norme Européenne), la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à la maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

4°.Selon DIN (norme DIN 31051) (L'institut allemand de normalisation), définit la maintenance comme l'ensemble des mesures visant à maintenir ou à rétablir l'état prévu d'un bien ainsi qu'à constater et à juger l'état actuel.

5°.Selon AFNOR (NF X 60-010) (Association Française de Normalisation) de la maintenance industrielle est la suivante : la maintenance est l'ensemble des actions permettent de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifique ou en mesure d'assurer un service déterminé [1].

6°. Selon LAROUSSE : Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement [2].

La définition de la maintenance fait donc apparaître 5 notions : [3]

1. **Un bien (norme x50-500)** : c'est un produit conçu pour assurer un service déterminé.

- **Bien durable:** c'est un bien conçu pour assurer une fonction donnée pendant un temps relativement long compte tenu des opérations maintenance. Ex : machine-outil.

- **Bien semi-durable:** bien conçu pour assurer une fonction donnée est caractérisé par une usure assez rapide d'au moins un constituant fondamental est irremplaçable, conduisant à une mise hors service.

Ex: lampe

- **Bien éphémère:** bien conçu pour se servir qu'une fois pendant un temps très court. Ex. : briquet.

2. **Maintenir** : qui suppose un suivi et une surveillance

3. **Rétablir** : qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut

4. **Etat spécifié et service déterminé** : qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance.

5. **Coût optimal** : qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique.

Parfois, la Maintenance constitue un élément stratégique de l'entreprise qui nécessite des moyens importants et beaucoup de dépenses.

Une Maintenance mal organisée, mal gérée ou mal exécutée, peut avoir des impacts néfastes sur le fonctionnement du système de production :

- Arrêts multiples et indisponibilité des installations,
- Surcoûts de production,
- Grands risques de mauvaise qualité et d'une disponibilité des produits.

De même, une mauvaise Maintenance ou une Maintenance insuffisante, peut être parfois à l'origine d'importantes catastrophes (aéronautique, transport, nucléaire, ..) et peut mettre en danger l'existence même de l'entreprise.

1.3. LES OBJECTIFS DE MAINTENANCE

Les objectifs de la maintenance peuvent être classés en deux types : [4]

Premier objectif : Rétablir un bien, en état de dysfonctionnement et le replacer en état de fonctionnement, donc de produire.

Deuxième objectif : Maintenir ce bien, par une suite d'actions préventives et planifiées, en état parfait de fonctionnement, donc de produire. En règle générale, le service maintenance doit garder l'outil de production en état opérationnel, afin d'assurer une production efficace et maximale. (Biens : machines, systèmes automatisés de production, mécanismes, appareils divers).

1.4. Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise

Dans une entreprise industrielle, la fonction maintenance est généralement une sous-fonction de la fonction sécurité industrielle. Elle possède des interfaces de liaison avec toutes les autres fonctions qui composent l'entreprise (Figure 1-1). [1]

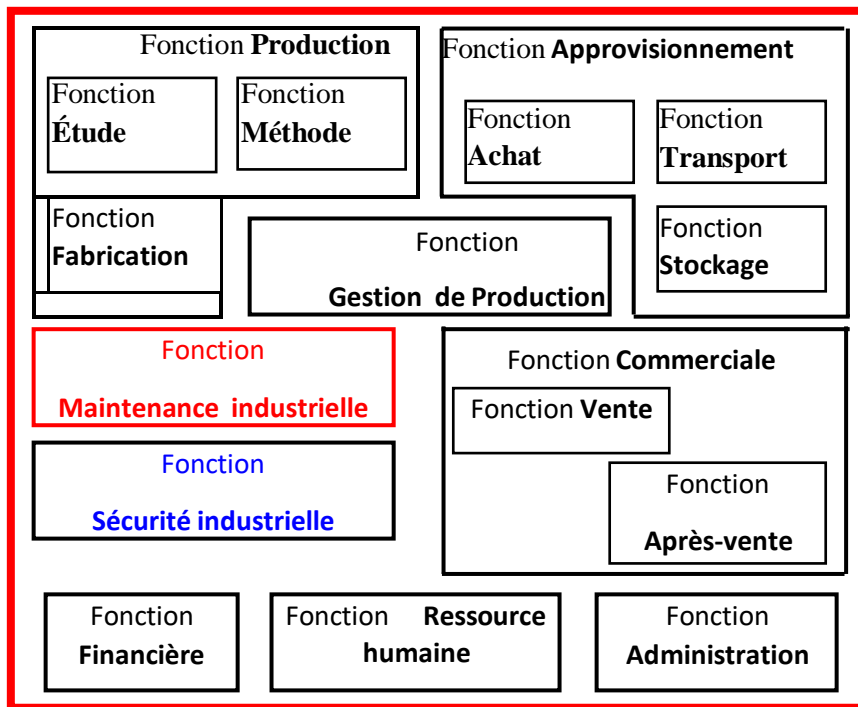


Figure. 1.1 Mise en situation du service maintenance dans l'entreprise industrielle.[1]

1.5. Rôles de la fonction maintenance dans l'entreprise

Dans une entreprise industrielle, la fonction maintenance jouera trois rôles : [1]

Rôle N°1: Maintenance de l'outil de production.

- Assurer la disponibilité la plus élevée possibles des équipements de production (Machines, machines-outils, fours, installations et engins de levage et de manutention).
- Maintenir les appareils de mesure ou de contrôle (opérations d'étalonnage, de calibration, d'entretien ou de réparation)

Rôle N°2: Maintenance des infrastructures.

- Entretien et maintenir les bâtiments en bon état.
- Maintenir les installations de ventilation, chauffage, climatisation, éclairage,
- Maintenir les équipements de sécurité et de protection de l'environnement tel que les extracteurs d'airs, ventilateurs.
- Contrôler et surveiller les travaux concernant l'hygiène, la sécurité, la pollution, la gestion de l'énergie...

Rôle N°3: Maintenance sous-traitée. Il s'agit dans ce cas de :

- Négocier les contrats d'assistance technique
- Veiller au respect de ces contrats

1.6. Stratégies de la fonction maintenance

- **Problème** " Comment diminuer le nombre de défaillances tout en visant à rentabiliser toute action de maintenance."
- **Solution:**
 1. Adopter une politique de maintenance et mettre en œuvre une bonne stratégie afin de ne plus subir de défaillances.
 2. Prévoir les défaillances par le calcul de probabilité de leurs apparitions et de leurs conséquences.

A cet effet, la fonction maintenance sera amenée à considérer 03 types de prévisions à 03 niveaux:

a. les prévisions à long terme □ *Niveau stratégique*

Les prévisions à long terme sont liées à la politique de l'entreprise et permettent l'ordonnancement des charges, des stocks, des investissements en matériel.

b. les prévisions à moyen terme □ *Niveau tactique*

- Veiller à l'immobilisation des équipements à des moments qui perturbent le moins possible, le programme de fabrication et cela afin de maintenir le potentiel d'activité de l'entreprise.
- Fournir nécessairement le calendrier des interventions de maintenance suffisamment tôt. Car elle a une influence sur l'ordonnancement des fabrications.

c. les prévisions à court terme □ *Niveau opérationnel*

- Réduire les durées d'immobilisation des équipements ainsi que les coûts des interventions.
 - La réduction des coûts de maintenance et d'immobilisation n'est possible que si l'équipement et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable.
 - Il est donc nécessaire de préparer le travail et étudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'exécution des interventions.

Le service technique lié à cette fonction doit fournir toutes informations qualitatives et quantitatives susceptibles d'influencer les politiques particulières de l'entreprise.

1.7. Activités de la fonction maintenance

La fonction maintenance, se présente comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : [1]

- Activités à dominante technique
- Activités à dominante gestion

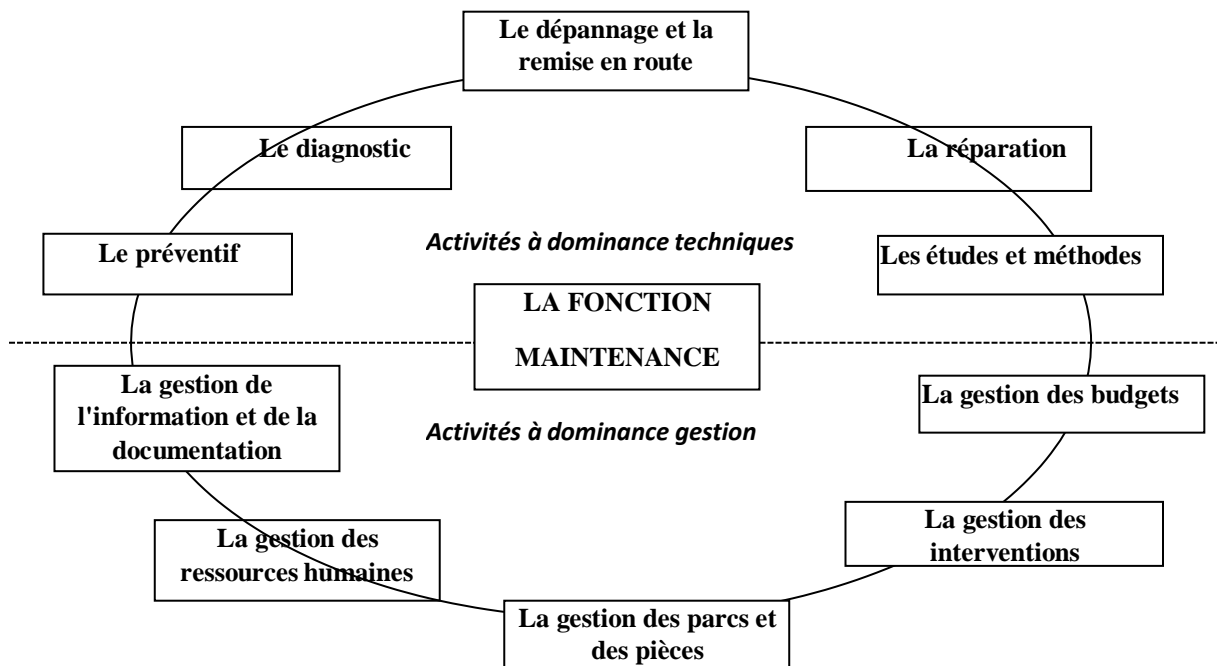


Figure 1.2. Les activités de la fonction maintenance

1.8. DIFFERENTES POLITIQUES DE MAINTENANCE

Le choix d'une méthode de maintenance traduit la politique de maintenance de l'entreprise qui a pris en compte certains objectifs. Tels que : [4]

- Réduction des périodes d'indisponibilité des matériels ;
- Réduction des coûts de maintenance.
- Amélioration de la qualité des produits
- Assurer la plus grande sécurité possible dans l'exploitation des matériels,.... .

1.8.1 Maintenance préventive

Maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu.

Autrement dit, la maintenance préventive permet de réduire les risques et probabilités de dysfonctionnement des systèmes de production.

La maintenance préventive peut être :

- Systématique ;
- Conditionnelle ;
- Prévisionnelle.

1.8.2 Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive systématique permet d'effectuer des opérations de maintenance, afin d'éliminer ou de diminuer les risques de dysfonctionnement des systèmes de production. Elle s'effectue suivant un échéancier prévu et établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage du bien. Cette unité d'usage caractérise l'exploitation du bien.

Exemples :

- le km parcouru pour une locomotive
- la tonne produite pour un haut-fourneau
- la palette conditionnée pour une empaqueteuse

Cette méthode de maintenance s'applique à des équipements

- Soumis à une réglementation sécuritaire : ponts roulants, matériels d'incendie, installations sous pression, ...
- Présentant des coûts de défaillance très élevés : système avec processus de production continu, lignes de fabrication automatisées,...
- Pour lesquels une défaillance peut entraîner des accidents graves matériels de transport en commun des personnes, appareils et constituants utilisés dans l'énergie nucléaire, ...

1.8.3 Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive conditionnelle est subordonnée franchissement d'un seuil prédéterminé significatif de l'état de dégradation du bien. Le franchissement du seuil peut être mis en évidence par l'information donnée par un capteur ou par tout autre moyen.

Exemple :

Sur une presse hydraulique le déclenchement d'un indicateur de colmatage entraîne le remplacement ou le nettoyage du filtre encrassé.

1.8.4 Maintenance préventive prévisionnelle

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à analyse de l'évolution surveillée de paramètres Significatifs de dégradation du bien. Permettant, grâce à une surveillance très précise, de suivre l'évolution d'un défaut ou d'une usure et donc de planifier une intervention avant défaillance totale ou partielle. Elle est encore appelée maintenance prédictive, mais ce terme n'est pas normalisé.

Exemples :

- La mesure périodique du niveau vibratoire d'une machine permet de programmer des activités de maintenance lorsque ce niveau augmente puis dépasse une valeur prédéterminée
- L'intensité à vide, absorbée par un transformateur de puissance, traduit l'état de l'isolement diélectrique enroulements et à partir d'une valeur donnée déclenche la révision générale du transformateur.

1.8.5. Maintenance corrective

La maintenance corrective regroupe l'ensemble des activités réalisées après la défaillance (totale ou partielle) d'un bien, ou la dégradation de sa fonction, pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement.

La maintenance corrective peut être :

- Palliative ;
- Curative.

1.8.5.1. Maintenance corrective 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.

1.8.5.2. Maintenance corrective 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.

1.8.6. Maintenance « améliorative »

Après plusieurs défaillances de même nature, ce type de maintenance permet, après réflexion et étude, d'éliminer le problème. Elle nécessite obligatoirement une concertation entre services Production - Bureau d'étude et Maintenance.

1.9. NIVEAUX DE MAINTENANCE

Un niveau de maintenance se définit par rapport : [6]

- à la nature de l'intervention;
- à la qualification de l'intervenant
- aux moyens mis en œuvre.

La norme NF X 60-010 donne, à titre indicatif, cinq niveaux de maintenance, en précisant le service qui en a la responsabilité, la production ou la maintenance.

1.9.1. Premier niveau

Il s'agit de réglages simples prévus par le constructeur ou le service de maintenance, au moyen d'éléments accessibles sans aucun démontage ou ouverture de l'équipement.

Exemples :

- Echanges en toute sécurité d'éléments consommables tels que fusibles, voyants,
- Dégagement d'un produit défectueux sur une machine automatisée après la mise en sécurité de la machine.

Ces interventions de premier niveau peuvent être réalisées par l'exploitant du bien, sans outillage particulier à partir des instructions d'utilisation.

1.9.2. Deuxième niveau

Il s'agit de dépannages par échange standard des éléments prévus à cet effet et d'opérations mineures de maintenance préventive.

Exemples :

- Graissage d'une machine ;
- Contrôle du bon fonctionnement d'un four de traitements thermiques ;
- Remplacement d'une électrovanne sur un système de serrage de pièce.

Ces interventions de deuxième niveau peuvent être réalisées par un technicien ou l'exploitant du bien dans la mesure où ils ont reçu une formation pour les exécuter en toute sécurité.

1.9.3. Troisième niveau

Il s'agit d'identification et de diagnostic de pannes suivis éventuellement :

- d'échanges de constituants ;
- de réparations mécaniques mineures ;
- de réglage et réétalonnages général des mesureurs.

Exemples :

- Remplacement d'une bobine de contacteur défectueuse à la suite d'une surtension,
- Démontage d'un manomètre donnant des indications erronées, réétalonnage sur un banc de contrôle, remontage sur la machine ;
- Remplacement d'une clavette cisailée nécessitant l'ajustage de la nouvelle clavette.

Les interventions de troisième niveau peuvent être réalisées par un technicien spécialisé directement sur le site ou dans un atelier de maintenance.

1.9.4. Quatrième niveau

Il s'agit de tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive à l'exception de la rénovation et de la reconstruction.

Exemples

- Révision générale d'un compresseur ;
- Démontage, réparation, remontage, réglage d'un treuil de levage,
- Remplacement du coffret d'équipement électrique de démarrage d'une machine-outil

Ces interventions de quatrième niveau peuvent être réalisées par une équipe disposant d'un encadrement technique très spécialisé et de moyens importants bien adaptés à la nature de l'intervention.

1.9.5. Cinquième niveau

Il s'agit de tous les travaux de rénovation, de reconstruction ou de réparation importante, confiés à un atelier central de maintenance ou à une entreprise extérieure prestataire de services.

Exemples

- Révision générale de la chaufferie d'une usine ;
- Rénovation d'une ligne de conditionnement de flacons pour améliorer son degré d'automatisation ;
- Réparation d'un engin de levage portuaire partiellement endommagé à la suite d'une tempête.

Dans ce type de travaux les moyens et les méthodes sont comparables à ceux mis en œuvre lors de la fabrication des matériels. C'est au constructeur d'en fournir, les spécifications techniques et constructives. .

1.10. DEMARCHE DE LA MAINTENANCE

Les interventions sur des équipements sont nécessaires pour la conservation de leur bon état de fonctionnement il est donc possible de garder en mémoire:[3]

- Les pannes qui ne sont présentés.
- Les coûts de remise en état.
- Le temps d'indisponibilité
- Les coûts de perte de production pendant l'indisponibilité
- Les modifications techniques à porter...etc.

Cette nécessité conduit à mettre en place pour chaque équipement un dossier qui se présente en 2 parties:

- Dossier technique
- Dossier machine

Dossier technique

Il regroupe tout ce qui est propre à un modèle de machine: données du constructeur, plans schémas électriques, nomenclature... Il suffit donc d'un dossier technique par type des machines [4].

Dossier machine

Relatif à chaque machine prise individuellement, les dossiers machine regroupent:

- Les renseignements propres qui concernent cette machine (année de mise en service, montant d'investissement, configuration de fonctionnement, GRAFCET, GEMMA ...)
- La trace écrite de toutes les opérations d'entretien réalisé sur la machine (historique ou traçabilité) [4].

1.11. DÉFAILLANCE EN MAINTENANCE [7]

Dans le cadre de la maintenance industrielle, l'analyse du comportement des systèmes a pour objet la prise en compte et l'étude des aléas de fonctionnement et de leur processus d'apparition.

On ne peut prétendre à une disponibilité optimale des matériels sans une connaissance précise de la nature des défaillances.

1.11.1. Définition

Selon *la norme AFNOR X 60-011* «Altération ou cessation d'un bien 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).

Les défaillances ont des causes, des manifestations et des conséquences très diverses. Aussi pour mieux les connaître et pouvoir efficacement intervenir, il est nécessaire de distinguer plusieurs catégories : selon de la rapidité de manifestation ; selon le degré d'importance ; selon les causes, selon les conséquences ; ou par combinaison des concepts précédents, etc....

1.11.2. Classification des défaillances

Selon la norme **NF X 60-011** il existe plusieurs familles des défaillances

➤ *Suivant leurs causes*

- Défaillances de causes intrinsèques : défaillances dues à une mauvaise conception du bien, à une fabrication non conforme du bien ou à une mauvaise installation du bien. Les défaillances par usure (liées à la durée de vie d'utilisation) et par vieillissement (liées au cours du temps) sont des défaillances intrinsèques.
- Défaillance de causes extrinsèques : défaillances de mauvais emploi, par fausses manœuvres, dues à la maintenance, conséquences d'une autre défaillance.

➤ *Suivant leur degré :*

- défaillance complète, partielle, permanente, fugitive, intermittente, etc.
- Défaillance Complète : défaillance entraînant l'inaptitude complète de l'équipement à accomplir toutes les fonctions
- Défaillance Partielle : défaillance à la suite de laquelle l'équipement ne peut plus accomplir qu'une partie des fonctions prévues initialement ou ne peut les accomplir qu'avec des performances dégradées.

➤ *Suivant leur vitesse d'apparition :* soudaine ou progressive.

- Défaillance soudaine : défaillance qui ne se manifeste pas par une perte progressive des performances et qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.
- Défaillance progressive : défaillance due à une évolution dans le temps des caractéristiques d'une entité.

1.12. SUPERVISION, SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC

La supervision consiste à gérer et à surveiller l'exécution d'une opération ou d'un travail accompli par l'homme ou par une machine, puis à proposer des actions correctives en cas de besoin [8,9].

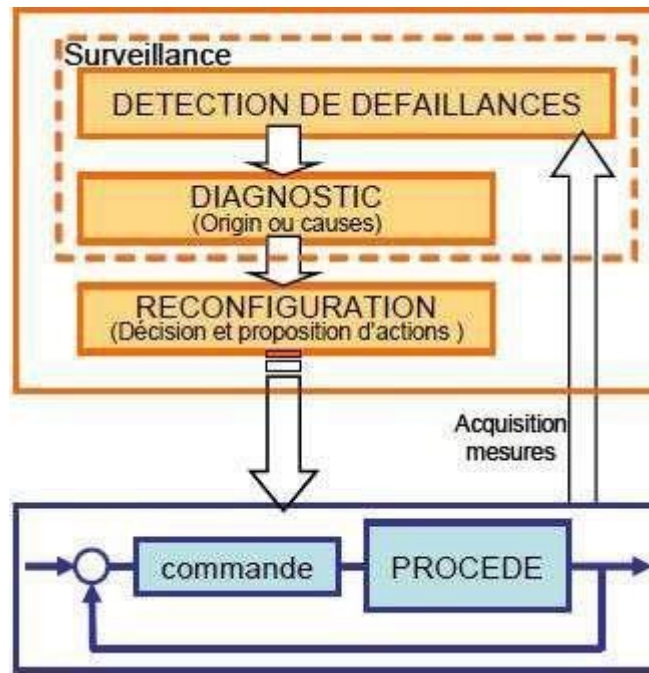


Figure 1.3. Schéma générale de supervision [8]

La surveillance est une opération d'acquisition permanente des signaux et commandes d'un procédé afin de reconstituer l'état de fonctionnement réel. Ainsi, la surveillance utilise les données provenant du système pour représenter l'état de fonctionnement (normal ou anormal).

Le diagnostic faisant partie du processus de surveillance, il permet d'identifier les causes d'un ensemble de symptômes observés (déviations par rapport à un fonctionnement normal) qui indiquent une dégradation ou une panne de certains composants du système conduisant à un comportement anormal du système.

La reconfiguration agit sur le système en adaptant la configuration matérielle, ainsi que sur le système de commande et prend la décision qui détermine l'état à atteindre et la séquence d'actions correctives à réaliser [8].

1.13. LE DIAGNOSTIC

1.13.1. Définitions

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

La norme NF EN 13306 va plus loin, puisqu'elle indique que le diagnostic d'une panne est « l'ensemble des actions menées pour la détection de la panne, sa localisation et l'identification de la cause ». On va donc jusqu'à l'expertise de la

défaillance. La localisation de panne est l'ensemble des actions menées en vue d'identifier l'équipement en panne au niveau de l'arborescence appropriée. Le diagnostic d'un système matériel désigne toute méthode permettant de déterminer si une machine est défaillante ou non et de déterminer l'origine de la panne à partir des informations relevées par observation, contrôles et tests [10]. Voir **[ANNEXE A1]**

1.13.2. Rôle du diagnostic

Une fois situé dans la chaîne de la supervision et en particulier au niveau de la surveillance, le processus du diagnostic machine, qui permet :

- D'identifier et localiser les défaillances des entités techniques.
- De connaître les causes de ces défaillances.
- D'estimer la probabilité d'occurrence des prochaines dégradations ou défaillances.
- De fournir une assistance pour assurer la disponibilité, Fiabilité et la sécurité du système. [10].

1.13.3. Méthodes de diagnostic

Si la prise de décision conduit à déclarer le processus défaillant, il convient alors de sélectionner une méthode de diagnostic. [10].

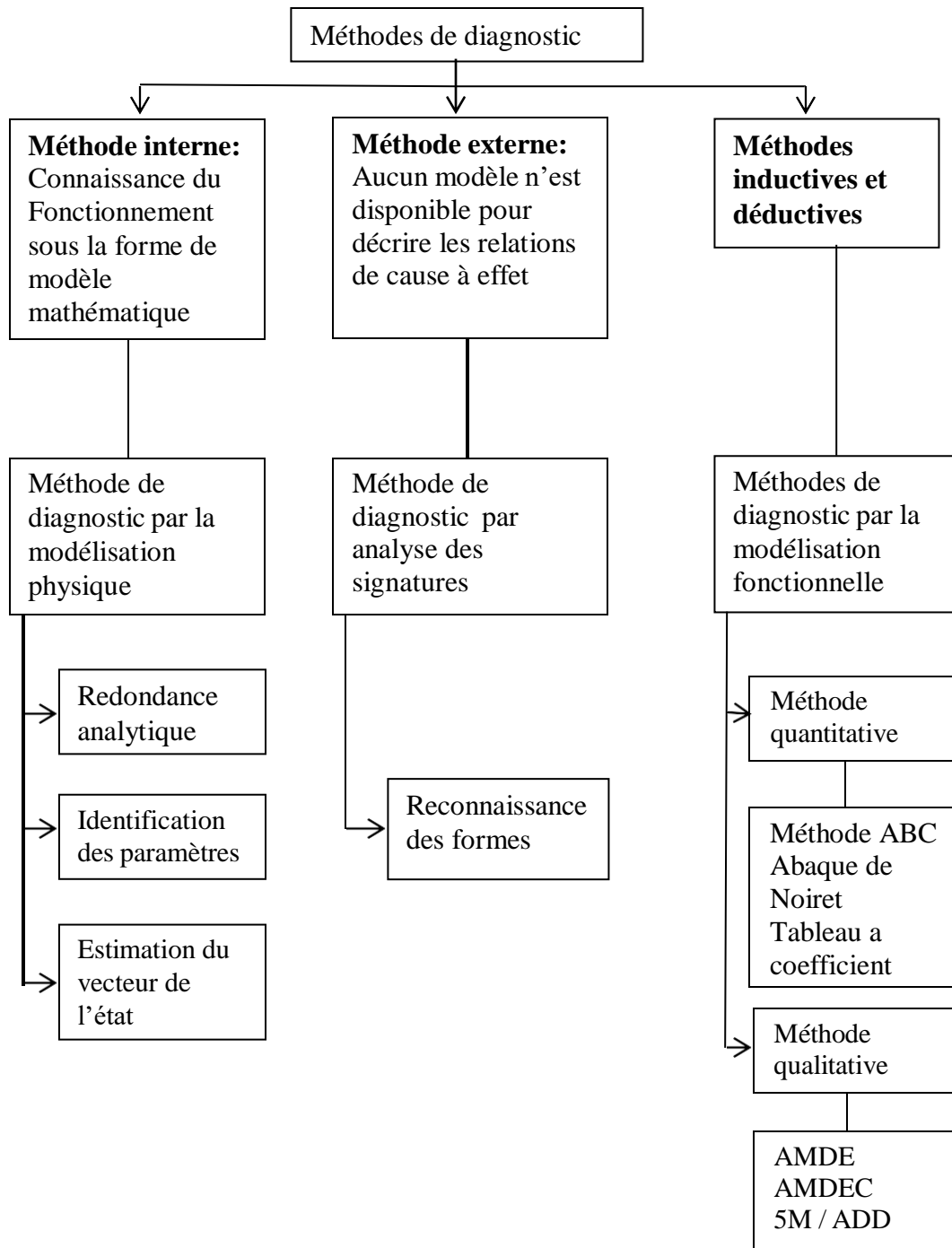


Figure 1.4. Classification des méthodes de diagnostic [10].

1.13.3.1. Méthodes internes

Ces méthodes sont basées sur des modèles physiques ou de comportement (modèles mathématiques) validés expérimentalement par les techniques d'identification de paramètres. Ainsi, ces modèles permettent la mise en œuvre de 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 ». Ces méthodes regroupent en deux grandes familles : -

La méthode du modèle mathématique - Les méthodes d'identification de paramètres ou d'estimation du vecteur d'état [11].

1.13.3.2. Méthodes externes

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 [11].

1.13.3.3. Méthodes inductives et déductives

1. 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.
2. 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 [11].

1.13.3.4. Méthodes quantitatives et qualitatives

L'analyse des défaillances peut s'effectuer de manière quantitative puis qualitative en exploitant l'historique de l'équipement et les données qualitatives du diagnostic et de l'expertise des défaillances. [12]

1^{er}. Méthodes quantitatives

Les analyses quantitatives sont supportées par des outils mathématiques ayant pour but d'évaluer la sûreté de fonctionnement et entre autres la sécurité.

Cette évaluation peut se faire par des calculs de probabilités (par exemple lors de l'estimation quantitative de la probabilité d'occurrence d'un événement redouté) ou bien par recours aux modèles différentiels probabilistes.

Un point très important mérite d'être clarifié, c'est que les résultats de l'analyse quantitative ne sont pas des mesures absolues, mais plutôt des moyens indispensables d'aide au choix des actions pour la maîtrise des risques.

a. Méthode ABC (Diagramme de PARETO)

La méthode ABC apporte une réponse. Elle permet l'investigation qui met en évidence les éléments les plus importants d'un problème afin de faciliter les choix et les priorités. On classe les événements (pannes par exemple) par ordre décroissant de coûts (temps d'arrêts, coût financier, nombre, etc...), chaque événement se rapportant à une entité. On établit ensuite un graphique faisant correspondre les pourcentages de coûts cumulés aux pourcentages de types de pannes ou de défaillances cumulés. Sur le

schéma de la figure 1.6, on observe trois zones. 1. Zone A : 20% des pannes occasionnent 80% des coûts ; 2. Zone B : les 30% de pannes supplémentaires ne coûtent que 15% supplémentaires ; 3. 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 porter sur les pannes de la zone A. [7]

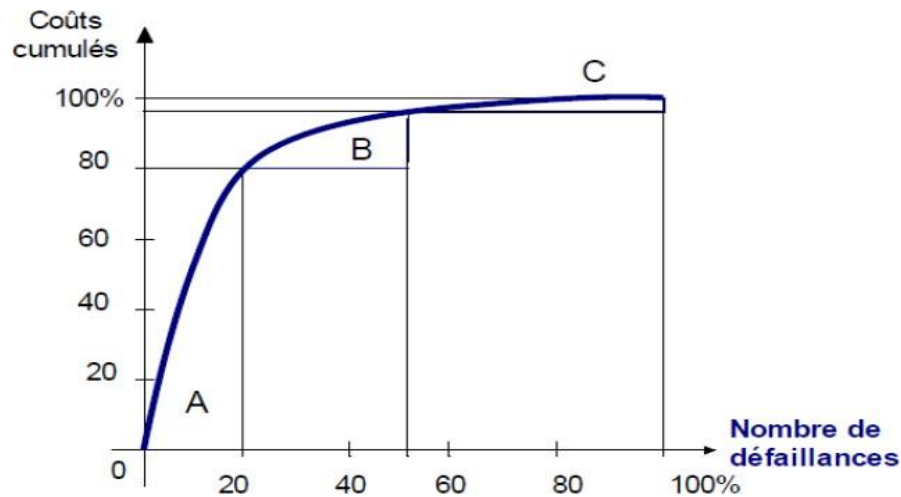


Figure 1.5. Diagramme de Pareto ou courbe ABC [7].

b. Abaque de Noiret

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 est une recommandation offrant trois 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. Il ne s'agit que d'un outil d'aide à la décision et non pas d'un outil de décision. [ANNEXE A2]

c. Tableau a coefficient

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

- Première zone en dessous de 500 points : pas de nécessité du préventif.
- Deuxième zone entre 500 et 540 points : possibilité du préventif.
- Troisième zone au-dessous de 540 points : le préventif est nécessaire.

[ANNEXE A3]

2^{ème}. Méthodes qualitatives

L'application des méthodes d'analyse qualitatives fait systématiquement appel aux raisonnements par induction et par déduction (Monteau&Favaro, 1990).

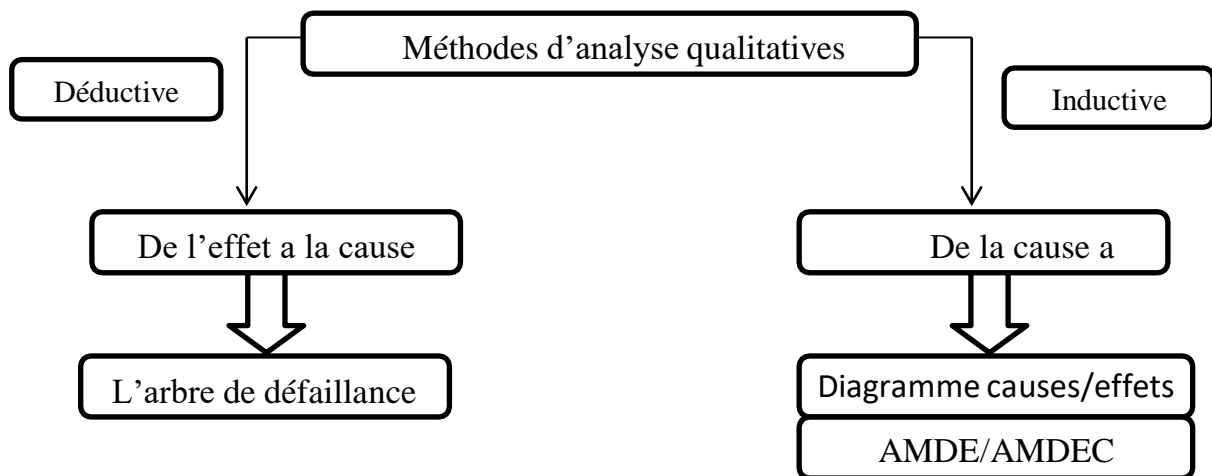


Figure 1.6. Classification des principes méthodes de l'analyse qualitative [12].

a. Diagramme causes-effet

Cet outil a été créé par Ishikawa, professeur à l'Université de TOKYO dans les années 60 et concepteur d'une méthode de management de la qualité totale. Le diagramme causes-effet est une représentation graphique du classement par familles de toutes les causes possibles pouvant influencer un processus. Ces familles de causes au nombre de 5 engendrent la non qualité dans un processus de fabrication. Leur nom commence par la lettre M d'où l'appellation 5M. Ishikawa a proposé une représentation graphique en « arête de poisson ».

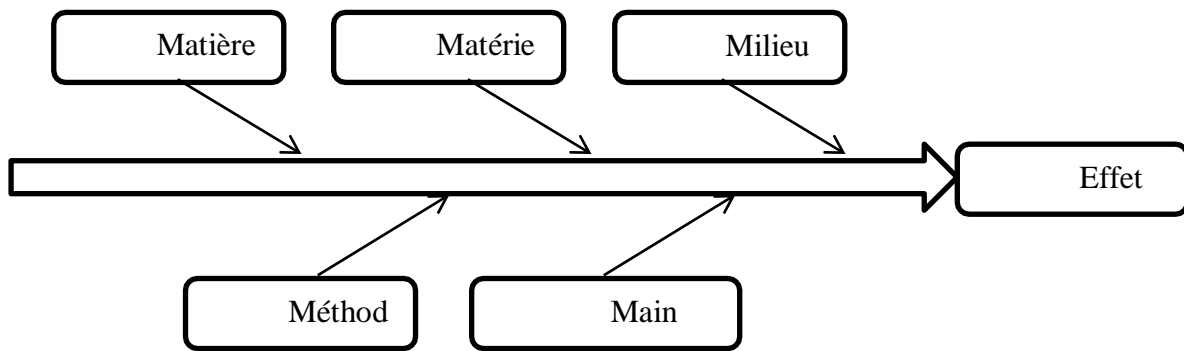


Figure 1.7. Diagramme d'Ishikawa [7].

b. AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse préventive de la sûreté de fonctionnement des produits et des équipements. Ce principe de la prévention repose sur le recensement systématique et l'évaluation des risques potentiels d'erreurs susceptibles de se produire à toutes les phases de réalisation d'un produit.

Date de l'analyse :	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ					Phase de fonctionnement	page :				
	Machine :		Organe :				Nom :				
Pièce/Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action Corrective	
						F	G	N	C		

Figure 1.8. Feuille d'analyse AMDEC [7].

c. L'arbre de défaillance (Add)

Un arbre de défaillances (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statiques (un système statique est un système dont la défaillance ne dépend pas de l'ordre de défaillance de ses composants). Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini. Une telle représentation graphique met donc en évidence les relations de cause à effet.

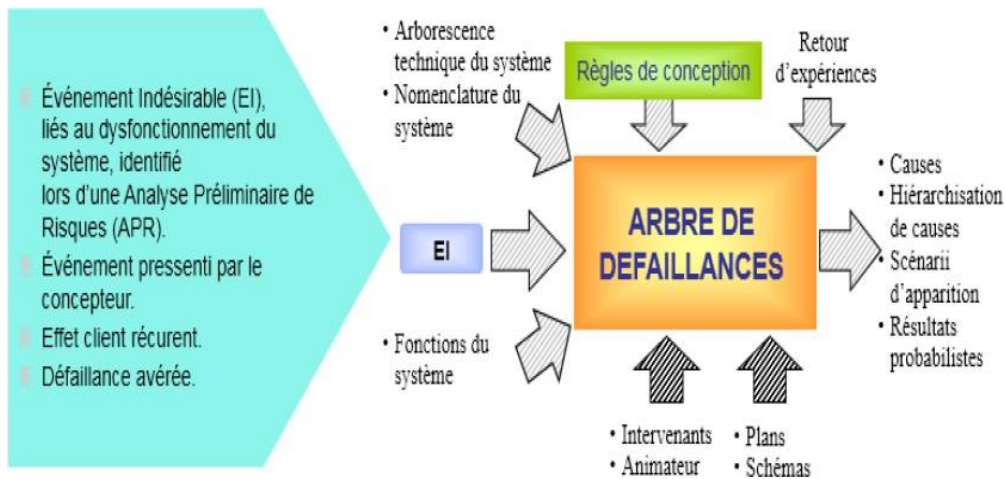


Figure 1.9. L'arbre de défaillance [7].

1.14. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur la maintenance industrielle, le but de la maintenance et ces différents types. Puis nous avons procédé à la présentation des opérations de maintenance. Par la suite nous avons parlé sur les niveaux de maintenance considérés, l'objectif principal de la politique de maintenance ainsi que leurs méthodes de diagnostic. Dans ce qui suit, nous avons choisi de discuter sur la technique de l'arbre de défaillance parmi ces méthodes.

Chapitre 2:Présentation de la méthode de l'arbre de défaillance

Chapitre2 : L'arbre de défaillance

2. INTRODUCTION

Contrairement à l'analyse des modes de défaillances, l'arbre de défaillances est une méthode déductive (déductif : procédant d'un raisonnement logique rigoureux) utilisée dans de nombreux domaines industriels. C'est un outil graphique sous forme arborescence qui permet de savoir comment un système peut être indisponible. Il s'agit de représenter les différents événements et leurs liaisons par des portes de logique (fonction ET ou fonction OU selon que la défaillance du matériel se produit lorsque les événements se réalisent ensemble ou séparément).

Dans ce chapitre, on va présenter la technique de l'arbre de défaillance (AdD), puis on va aperçu leur démarche et construction dans le cadre qualitative et quantitative (probabilisé), Ensuite, un rappel sur les différentes méthodes pour le calcul des probabilités qui est en relation directe avec notre technique.

2.1. HISTORIQUE ET DOMAINE D'APPLICATION

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'événements 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... Elle est aussi utilisée pour analyser a posteriori les causes d'accidents qui se sont produits. Dans ces cas, l'événement redouté final est généralement connu car observé. On parle alors d'analyse par arbre des causes, l'objectif principal étant de déterminer les causes réelles qui ont conduit à l'accident [13].

2.2. DEFINITION ET OBJECTIVES

L'AdD (aussi appelé arbre de pannes ou arbre de fautes) est une technique d'Ingénierie très utilisée dans les études de sécurité et de fiabilité des systèmes statique, Cette méthode consiste à représenter graphiquement les combinaisons possibles d'événements qui permettent la réalisation d'un événement indésirable prédéfini (également appelé « événement redouté »).[14].

L'objectif est de suivre une logique déductive en partant d'un événement redouté pour déterminer de manière exhaustive (exhaustif : sujet traité à fond) l'ensemble de ses causes jusqu'aux plus élémentaires les objectifs sont résumés en quatre points : [15]

- La recherche des événements élémentaires, ou leurs combinaisons qui conduisent à un E.R.
- La représentation graphique des liaisons entre les événements. Remarquons qu'il existe une représentation de la logique de défaillance du système pour chaque E.R. Ce qui implique qu'il y aura autant d'arbres de défaillances à construire que d'E.R. retenus.
- Analyse qualitative : cette analyse permet de déterminer les faiblesses du système. Elle est faite dans le but de proposer des modifications afin d'améliorer la fiabilité du système. La recherche des éléments les plus critiques est faite en déterminant les chemins qui conduisent à un E.R. Ces chemins critiques représentent des scénarios qui sont analysés en fonction des différentes modifications qu'il est possible d'apporter au système. L'analyse des scénarios qui conduisent à un E.R. est faite à partir des arbres de défaillances, il est alors possible de disposer des "barrières de sécurité" pour éviter les incidents.
- Enfin, il est possible d'évaluer la probabilité d'apparition de l'E.R. connaissant la probabilité des événements élémentaires. C'est l'analyse quantitative qui permet de déterminer d'une manière quantitative les caractéristiques de fiabilité du système étudié.

L'objectif est en particulier de définir la probabilité d'occurrence des divers événements analysés. Les calculs reposent sur : les équations logiques tirées de la structure de l'arbre de défaillances et des probabilités d'occurrence des événements élémentaires.

2.3. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La méthode de l'arbre de défaillance commence par la définition de l'événement de défaillance à analyser. Ensuite, un diagramme d'arbre est construit pour décrire les causes de cette défaillance. Le diagramme d'arbre de défaillance est une représentation graphique des événements qui peuvent conduire à la défaillance. Les événements sont disposés en branches et sous-branches, qui représentent les causes et les conséquences.

Les événements sont classés en deux catégories : les événements de base et les événements supérieurs. Les événements de base sont des événements qui ne peuvent pas être décomposés en

sous-événements. Les événements supérieurs sont des événements qui sont la conséquence de plusieurs événements de base [16].

2.4. Représentation graphique de l'AdD

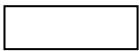

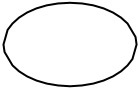
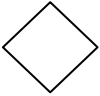
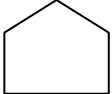
La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à l'aide des Symboles suivants : [17]

- la symbolique des événements
- Portes logiques
- Symboles de transfert

2.4.1. Evènements :

Il existe d'autre type d'événements défini par la norme leurs symboles ainsi que leurs significations sont répertoriées dans le tableau suivant (Tab. 2.1) :



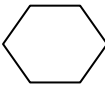


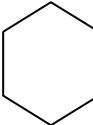
Tableau 2.1 : Symboles des évènements dans l'AdD [17]

Symbole	Désignation
	Evènement Intermédiaire ou final : Evènement du plus haut niveau : sommet d'arbre « évènement redouté », ou évènement intermédiaire résultant d'un évènement redouté.
	Evènement de base : une défaillance de base de lancement qui ne nécessite aucun développement ultérieur.
	Evènement de condition : conditions et restrictions qui sont appliquées sur n'importe quelle porte logique.
	Evènement non développé : un évènement qui n'est pas encore développé à cause de manque d'informations.
	Evènement maison : un évènement qui est normalement, prévu de se produire.

2.4.2. Portes logiques

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU (Tab. 2.2).

Tableau. 2.2 : Symboles des portes logiques dans l'AdD [17]

Symbole	Désignation
	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.
	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.
	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).
	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).

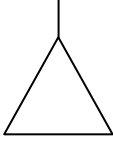
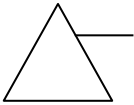
2.4.3. Symboles de transfert

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. 2.3 : Symboles de transfert sous l'AdD [17]

Symbole	Désignation
	<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>

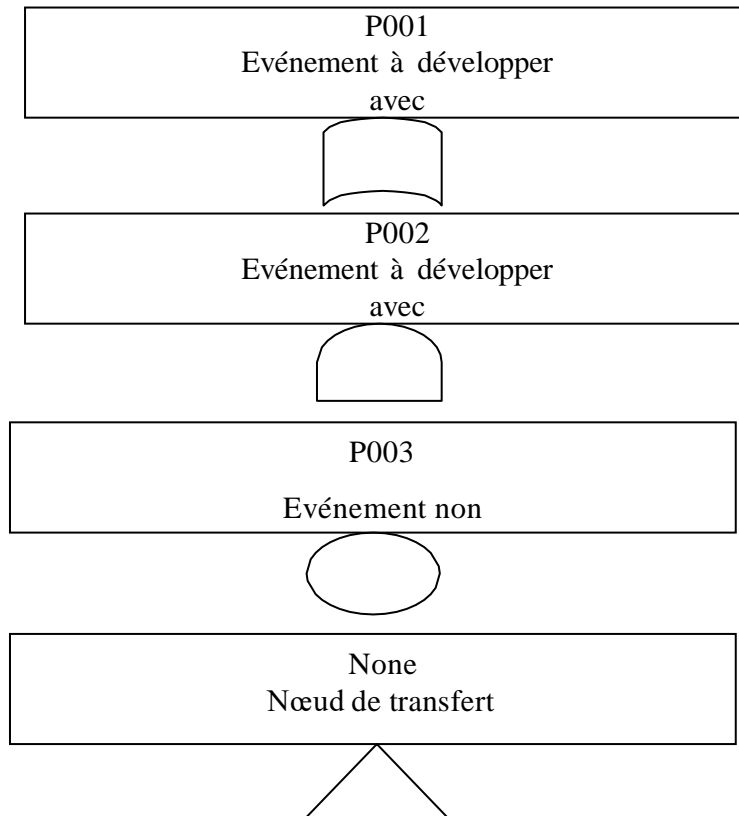


Figure 2.1 Différents événements de l'arbre analyste[18]

2.5. Etapes de la mise en œuvre de l'AdD

Une analyse d'arbre de défaillance (AdD) réussie exige la mise en œuvre des étapes suivantes :

- Identification de l'objectif de l'analyse AdD.
- Définition de l'événement principal de l'arbre de défaillance.
- Définition du domaine ou l'étendue de l'analyse AdD.
- Définition de la résolution de l'analyse AdD.
- Définition des règles de base de l'AdD.
- Construire l'arbre de défaillance AdD
- Evaluation de l'arbre de défaillance AdD.
- Interprétation et présentation des résultats

Les cinq premières étapes concernent la formulation de problème d'une analyse d'arbre de défaillance, le reste des étapes concerne la construction actuelle de l'arbre de défaillance et l'interprétation des résultats de l'arbre de défaillance. Bien que la plupart des étapes soient exécutées d'une manière séquentielle, les étapes 3 à 5 peuvent être réalisées en parallèle, les étapes 4 et 5 sont souvent modifiées durant les étapes 6 et 7. La corrélation des huit étapes est représentée dans la Figure 2.1[16].

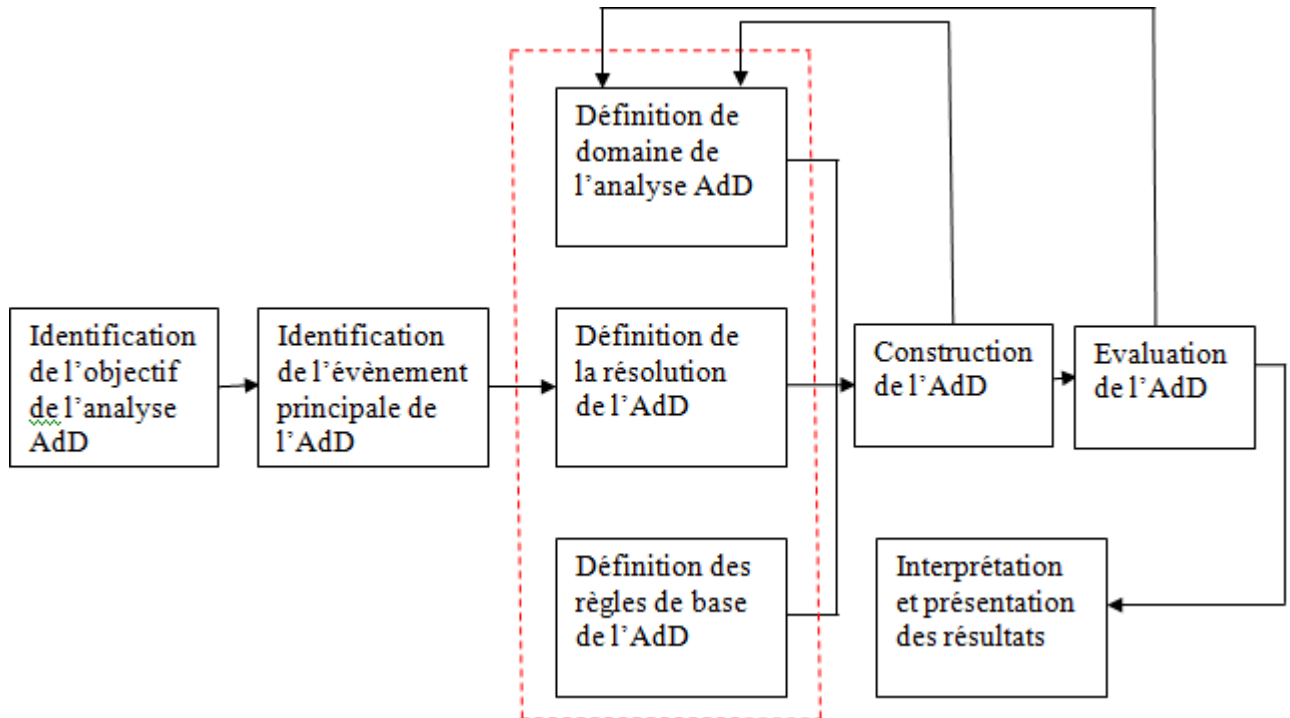


Figure 2.2 : Les étapes d'analyse de l'AdD[19].

2.6. Démarche et Construction de l'arbre de défaillances

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 [20].

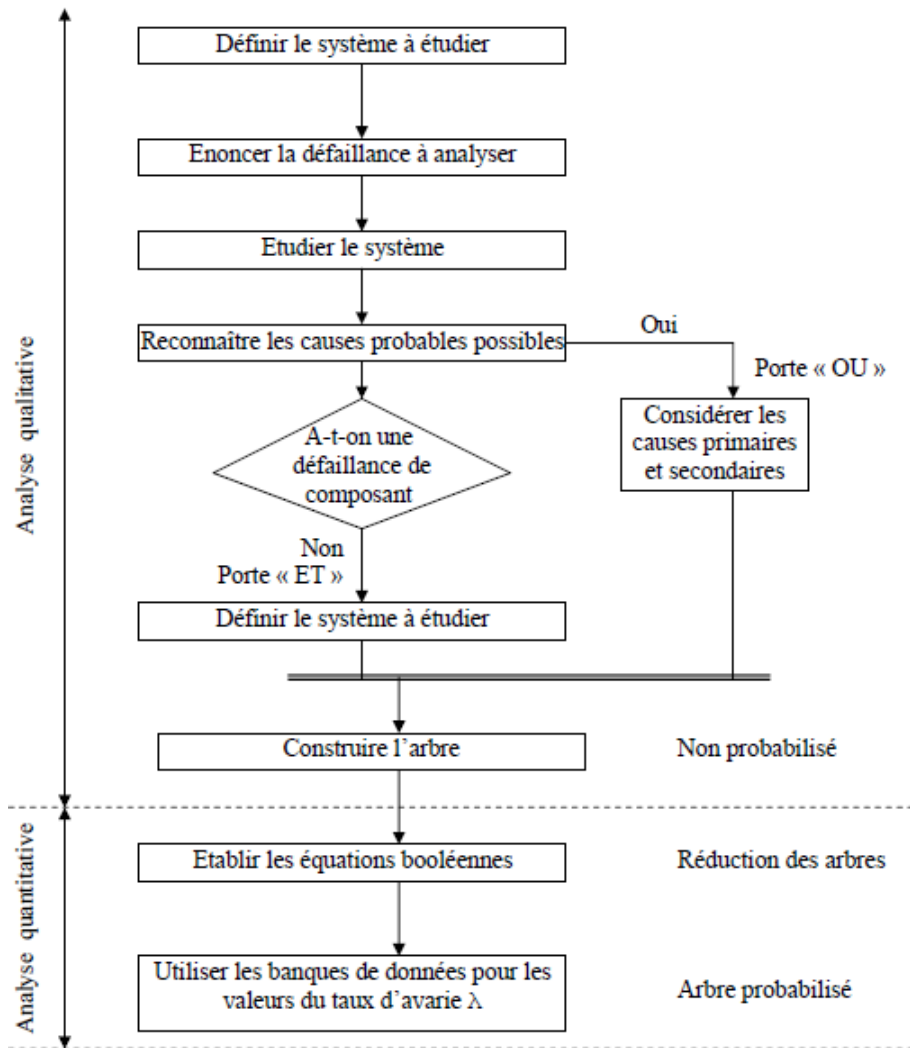


Figure 2.3 : Démarche à suivre pour construire un arbre de défaillance[20].

2.6.1. Définir le système à étudier

- Définir le système et ses limites matérielles. Le système peut être une entité technique complète mais ce sera plus souvent un sous-ensemble présentant un risque particulier. La documentation technique complète doit être réunie.
- 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".

2.6.2. 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.

2.6.3. 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.

2.6.4. Reconnaître 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.

2.7. Construction de l'AdD

2.7.1. Etapes de construction

Les principales étapes pour construire un arbre de défaillance sont de définir l'événement indésirable à étudier, d'examiner le système et d'élaborer l'arbre de défaillance.

Ensuite, afin d'analyser l'arbre, pour la partie qualitative, on devra d'abord calculer des coupes minimales et valider de manière qualitative l'arbre, il s'agit de recueillir des données correspondantes des événements élémentaires, de calculer la probabilité des portes et de la racine de l'arbre, finalement d'analyser les résultats obtenus et de trouver des solutions [14].

La construction de l'arbre de défaillances repose sur l'étude des événements entraînant un événement redouté. Elle est détaillée dans plusieurs normes industrielles dont la norme **CEI 61025** [21].

2.7.1.1. Evènement redouté ou sommet (évènement indésirable)

La première étape réside dans la définition de l'évènement à étudier d'une façon explicite et précise, cet évènement est appelé sommet, ou encore évènement redouté. Cette étape est cruciale quant à la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse.

L'arbre de défaillance se veut être une représentation synthétique ; le libellé de l'évènement devra être bref, mais aussi évocateur que possible dans la boîte qui le représente dans l'arbre, on lui associant un texte complémentaire apportant toutes les précisions utiles sur la définition de l'évènement.

Cette remarque est aussi valable pour tous les éléments qui vont figurer dans l'arbre. 13

2.7.1.2. Evènement intermédiaires

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

2.7.1.3. Evènements élémentaires, de base, transfert et conditions

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

2.7.2. Les règles de construction [20]

- Expliciter les faits et noter comment et quand ils se produisent
 - pour l'évènement redouté,
 - pour les évènements intermédiaires.
- Effectuer un classement des évènements
 - Évènement élémentaire représentant la défaillance d'un composant
 - Défaillance première

- Défaillance de commande.
 - Événements intermédiaires provenant d'une défaillance de composant,
 - Événements intermédiaires provenant du système indépendamment du composant
- Rechercher les “ causes immédiates ” de l'apparition de chaque événement intermédiaire afin d'éviter l'oubli d'une branche.
- Eviter les connexions directes entre portes car elles sont en général dues à une mauvaise compréhension du système ou une analyse trop superficielle.
- Supprimer les incohérences comme par exemple : un événement qui est à la fois cause et conséquence d'un autre événement.

2.8. Analyse de l'AdD [22]

L'analyse de l'arbre de défaillance comprend une analyse qualitative puis éventuellement une analyse quantitative. Ces concepts sont expliqués plus en détail dans ce qui suit :

2.8.1 Analyses qualitatives de l'AdD

Le traitement qualitatif de l'arbre est double. Tout d'abord, il vise à déterminer les coupes minimales puis 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 indésirable. La recherche des coupes minimales se fait traditionnellement à partir de l'AdD en appliquant les règles classiques de simplification des expressions booléennes à la fonction logique représentée par l'arbre.

L'expression des coupes minimales pour l'EI peut être écrite dans sa forme générale :

$$EI = C1 \vee C2 \vee \dots \vee C \quad (1)$$

Où EI est l'évènement indésirable et C1, C2,..., Ci sont les coupes minimales. Chaque coupe minimale est une fonction des événements élémentaires de la forme :

$$Ci = \prod_j X_j \quad (2)$$

Où X_j , avec $j \in [1, n]$, est un événement élémentaire.

Un arbre des défaillances est constitué d'un nombre fini de coupes minimales qui sont uniques pour son EI. Une coupe minimale composée d'un seul élément représente une défaillance de

composant qui toute seule produit l'EI. Pour une coupe minimale de n composants, les n -composants doivent tous être défaillants pour l'occurrence de l'EI.

Pour déterminer les coupes minimales, l'arbre est d'abord traduit en une équation booléenne équivalente. Les lois de l'algèbre de Boole s'appliquent ensuite pour éliminer les termes redondants. Nous allons expliquer ceci à l'aide de l'arbre de la figure 2.3.

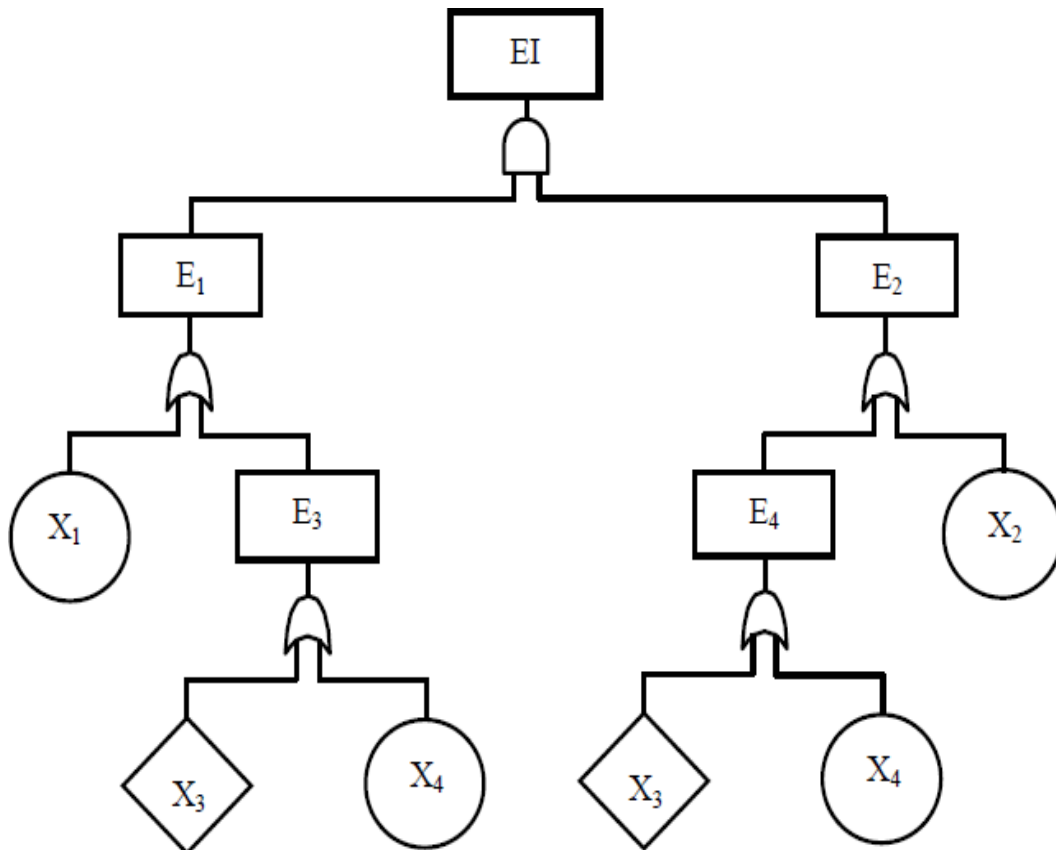


Figure 2.4 : Exemple élémentaire pour le calcul des coupes minimales [22]

La relation d'absorption nous conduit à :

$$EI = X1X2 \vee X3 \vee X4 \quad (3)$$

Quant au deuxième aspect de l'analyse qualitative de l'AdD, tous les événements de base sont supposés équiprobables et on étudie le cheminement à travers les portes logiques d'un événement élémentaire ou d'une combinaison d'évènements élémentaires jusqu'à l'évènement indésirable. De manière intuitive, une défaillance se propageant à travers l'arbre ne rencontrant que des portes

OU est susceptible de conduire très rapidement à l'EI. A l'inverse, un cheminement s'opérant exclusivement à travers des portes ET indique que l'occurrence de l'évènement indésirable à partir de l'évènement ou de la combinaison d'évènements de base considérée est moins probable et démontre ainsi une meilleure prévention de l'évènement indésirable suite à cette défaillance.

2.8.2 Analyse quantitative de l'AdD

Une analyse quantitative d'un arbre de défaillance permet d'estimer la probabilité d'apparition d'un évènement indésirable et des évènements intermédiaires.

Une étude probabiliste peut avoir deux objectifs :

- 1- L'évaluation rigoureuse de la probabilité d'occurrence de l'évènement redouté.
- 2- Le tri de scénarios critiques (en partant des coupes minimales de plus fortes probabilités).

Ces calculs ne peuvent se concevoir que si chaque évènement élémentaire peut être probabilisé à partir d'une loi soigneusement paramétrée et de la connaissance du temps de mission associé à l'évènement redouté **ET / OU** à l'aide de données issues du retour d'expérience.

a) *Porte ET :*

Soient A et B deux évènements de base liés par une porte logique ET, et conduisant à un évènement indésirable E (Figure 2.4). Si A et B sont indépendants, on obtient :

$$(E) = (A) * (B) \quad (4)$$

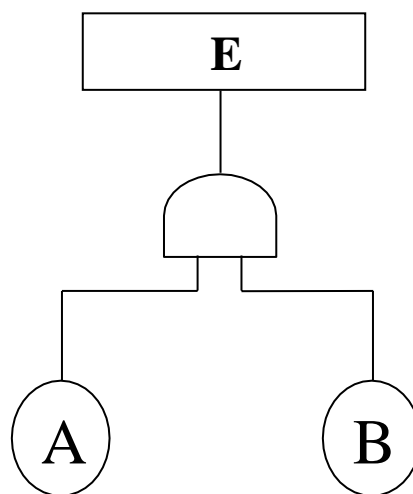


Figure 2.5 : Porte ET

b) Porte OU

Soient A et B deux évènements de base liés par une porte logique OU, et conduisant à un évènement indésirable E (Figure 2.5). Si A et B sont indépendants, on obtient :

$$P(E) = P(A) + P(B) - P(A) * P(B) \quad (5)$$

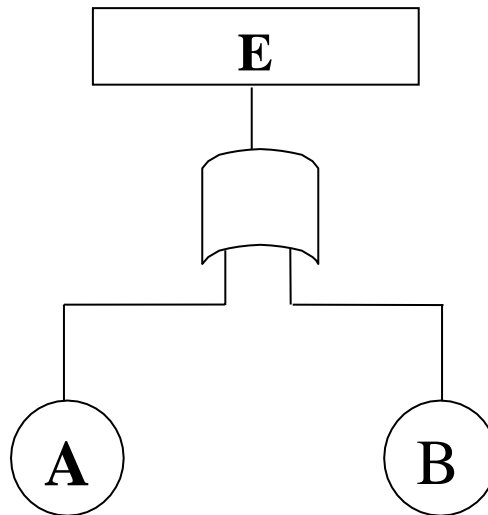


Figure 2.6 : Porte OU

Il existe deux approches principales pour calculer les probabilités dans les arbres de défaillance : les méthodes directes et les méthodes indirectes.[23]

2.8.3. Méthodes directes

La méthode directe consiste à calculer la probabilité de chaque évènement dans l'arbre de défaillance en utilisant les probabilités conditionnelles. Qui sont les probabilités qu'un évènement se produise étant donné que tous les évènements qui le précèdent se sont produits. Les probabilités conditionnelles sont calculées à l'aide de la formule de Bayes :

$$P(A|B) = P(B/A) * P(A) / P(B) \quad (6)$$

Où :

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

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

$P(A)$ est la probabilité de l'événement A.

$P(B)$ est la probabilité de l'événement B.

Une fois que les probabilités conditionnelles de tous les événements ont été calculées, la probabilité de la défaillance totale du système peut être calculée en multipliant les probabilités de tous les événements qui mènent à la défaillance du système.

Exemple

Supposons que nous avons un système composé de deux composants, A et B. Le composant A peut fonctionner avec une probabilité de 0,8, tandis que le composant B peut fonctionner avec une probabilité de 0,9. Le système ne fonctionnera pas si l'un des composants échoue. La probabilité de défaillance totale du système peut être calculée comme suit :

$$P(A \text{ échoué}) = 1 - P(A \text{ fonctionne}) = 1 - 0,8 = 0,2$$

$$P(B \text{ échoue}) = 1 - P(B \text{ fonctionne}) = 1 - 0,9 = 0,1$$

$$P(\text{Système échoue}) = P(A \text{ échoué}) + P(B \text{ échoue}) - P(A \text{ échoué}) * P(B \text{ échoue}) = 0,2 + 0,1 - 0,2 * 0,1 = 0,28$$

2.8.4. Méthode indirecte

Les méthodes indirectes de calcul de probabilité dans les arbres de défaillance sont souvent utilisées lorsque les données nécessaires pour calculer directement les probabilités sont insuffisantes ou indisponibles. Ces méthodes consistent à utiliser des informations supplémentaires pour estimer les probabilités de défaillance des composants dans 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 :

$$P(A|B) = P(B|A) \times \frac{P(A)}{P(B)} \quad (7)$$

Équation de Chapman-Kolmogorov :

$$P(i, j) = \Sigma(P(i, k) \times P(k, j)), \quad (8)$$

où $P(i, j)$ est la probabilité de transition de l'état i à l'état j dans la chaîne de Markov.

Équation de Monte Carlo : $P = \text{nombre de fois où l'arbre a échoué} / \text{nombre total de simulations}$

Méthode de Bayesienne : Cette méthode utilise des informations a priori sur la probabilité de défaillance des composants pour estimer la probabilité de défaillance globale de l'arbre. Elle est basée sur le théorème de Bayes, qui permet de calculer la probabilité d'un événement à partir de probabilités conditionnelles. Par exemple, si l'on sait que la probabilité de défaillance d'un composant est de 0,1 et que ce composant est nécessaire pour que l'arbre de défaillance échoue, on peut estimer la probabilité de défaillance de l'arbre en utilisant le théorème de Bayes.

Méthode de Markov : Cette méthode utilise une chaîne de Markov pour modéliser la progression de l'arbre de défaillance. La chaîne de Markov est une série d'états, chacun avec une probabilité de transition vers un autre état. Dans le contexte de l'arbre de défaillance, chaque état représente une configuration différente de composants qui fonctionnent ou ont échoué. Les probabilités de transition sont déterminées à partir des probabilités de défaillance des composants et de la structure de l'arbre.

Méthode de Monte Carlo : Cette méthode utilise des simulations aléatoires pour estimer les probabilités de défaillance de l'arbre. Elle consiste à générer des ensembles aléatoires de défaillances de composants et à évaluer la probabilité que l'arbre échoue en fonction de ces défaillances. Cette méthode est particulièrement utile lorsque l'arbre est complexe et qu'il est difficile de déterminer les probabilités de défaillance de manière analytique.

Exemple

Supposons qu'un système à deux composants, A et B. La probabilité de défaillance du composant A est de 0,1 et celle du composant B est de 0,2.

Voulons simuler le comportement du système pour déterminer la probabilité de défaillance du système. Nous pouvons générer des séries de nombres aléatoires pour simuler les défaillances des composants A et B. Si l'un ou les deux composants échouent, nous considérons que le système a échoué. Nous pouvons simuler le système 10 000 fois et compter le nombre de fois où le système a échoué :

$N(\text{event}) = \text{nombre de fois où le système a échoué} = 2208$

$N(\text{total}) = \text{nombre total de simulations} = 10000$

$P(\text{system failure}) = N(\text{event}) / N(\text{total})$

En résumé, les méthodes directes et indirectes sont des approches utiles pour calculer les probabilités dans les arbres de défaillance. Le choix de la méthode dépendra de la complexité de l'arbre de défaillance et de la disponibilité des données nécessaires pour calculer les probabilités.

2.9. CONCLUSION

En conclusion, l'arbre de défaillance est un outil d'analyse de sécurité efficace pour identifier les causes potentielles d'un événement indésirable et les moyens de prévention de cet événement. Cette méthode est souvent utilisée dans les industries à haut risque pour évaluer la sécurité des systèmes et des processus.

De toute façon ce chapitre est une présentation générale de la technique de l'arbre de défaillance (adD) comme un outil de diagnostic des défaillances et on va appliquer cette méthode aux fours électriques dans le chapitre suivant ,plus précisément au four électrique à induction.

*Chapitre 3 : Diagnostic
de défaut d'un four
électrique*

Chapitre 3 : diagnostic de défauts d'un four électrique

3. INTRODUCTION

Dans l'industrie, en tant que système technique à dominante énergétique, le four est un outil utilisé pour élever la température d'un produit industriel. Il peut être mis en œuvre en tant que un système destiné uniquement au chauffage tel que le réchauffage de l'acier avant déformation plastique, le réchauffage de pétrole brut avant distillation. Ou bien en tant que réacteur dans lequel on élabore les produits tel que four de fusion de métaux, four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie, etc....

Les fours industriels s'intègrent généralement dans une ligne de production complexe dont ils sont des éléments principaux, on les trouve dans un très grand nombre d'activités industrielles.

Le Présent chapitre traite trois parties qui concernent un préambule sur les fours électriques d'une manière générale, le four électrique à induction, son principe, ses types...,et comme étude de cas on a choisi le four électrique à induction basse fréquence et on mettra en œuvre la méthode de l'arbre de défaillance afin de diagnostic ces modes de défaillance.

3.1. FOURS ELECTRIQUES

Les fours électriques présentent de grands avantages pour la fusion des métaux, les plus importants étant les suivants : Des températures très élevées jusqu'à 3500 ° C peuvent être obtenues dans certains types de fours électriques. La vitesse de montée en température peut être contrôlée et maintenue dans des limites très précises, avec des régulations entièrement automatiques. La charge est totalement exempte de contamination par le gaz combustible. L'atmosphère en contact avec la masse fondue peut être parfaitement contrôlée, la rendant oxydante ou réductrice à volonté, et même dans certains types de four, elle peut fonctionner sous vide. Les revêtements durent plus longtemps que les autres types et sont installés dans un espace confiné. Son fonctionnement est effectué avec une hygiène supérieure à celle des autres types de fours. Les types de base de fours électriques sont : [24]

- Fours à arc électrique
- Fours à résistance électrique
- Four électrique à induction

3.2. Le Four électrique à Induction

3.2.1. Définition

Un four à induction est un élément électrique fonctionnant grâce au phénomène de chauffage par induction de métal. Dans la chaleur est provoqué par induction magnétique dans un milieu conducteur (habituellement un métal) placé dans un creuset, autour de quel l'enroulement magnétique est refroidi par l'eau. La plupart des fours à induction se composent d'un tube des anneaux de cuivre refroidis à l'eau, entourant un récipient de réfractaire matériel. [25]



Figure 3.1 : Four électrique à induction.[25]

3.2.2. Principe de fonctionnement

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.

En effet ce mode de chauffage est basé sur le principe du transformateur. Il utilise les propriétés électromagnétiques de certains matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ alternatif, laissent se développer des courants induits (courants de Foucault). C'est le corps à chauffer lui-même qui constitue le secondaire du transformateur. [26]



Figure 3.2 : Chauffage d'un métal par induction.



Figure 3.3: Isolation de bobine [24]de four à induction.[24]

3.2.3. Types de four à induction

Les fours à induction se partagent en deux grands types qui se subdivisent eux-mêmes en fonction de leurs alimentations électriques. Il s'agit des fours à canal et des fours à creuset par induction.

a) Fours à creuset

Les fours à induction à creuset sont appelés aussi fours à induction sans canal ou sans noyau. Ils se composent essentiellement d'une bobine inductrice entourant un creuset en réfractaire, leur forme facilite leur entretien. Le métal en fusion coule alors dans la lingotière située juste au-dessous du creuset. On peut leur appliquer des puissances élevées surtout en moyenne fréquence et ils sont des fours puissants et rapides bien adaptés pour la fusion. [27]

Il existe deux groupes principaux de fours sans noyau, classés selon la fréquence du courant alternatif appliqué :

- Les fours de fréquence du secteur (ou ligne) qui sont normalement exploités à 50Hz;
- Les fours de fréquence moyenne qui peuvent être exploitées à partir de 150Hz jusqu'à 1500Hz.

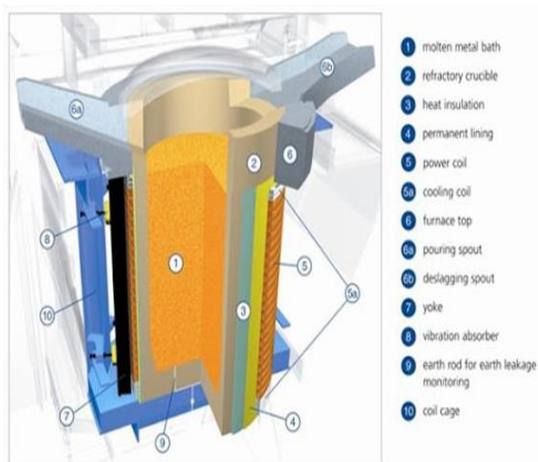


Figure 3.4 : Fours à creuset.[27]

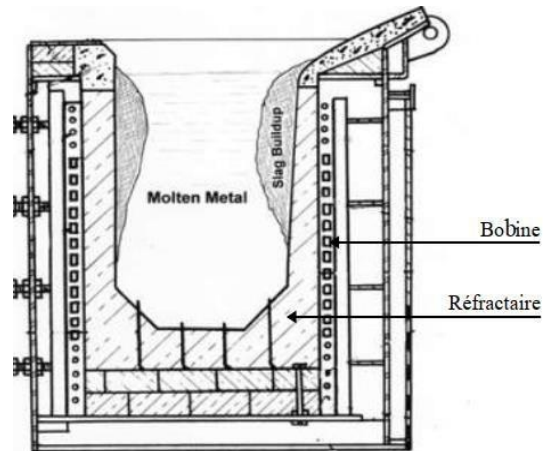


Figure 3.5 : Corps d'un four à creuset. [27]

b) Four à canal

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 3.6 et 3.7). 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. [28]

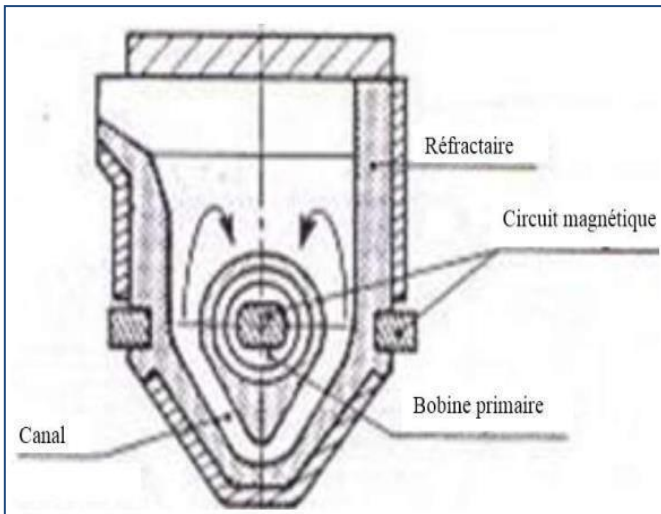


Figure 3.6 : Schéma d'un four à canal. [28]

Figure 3.7 : four à canal.[28]

3.2.4. Applications industrielles des fours à induction

On trouve principalement des installations de chauffage par induction dans les domaines de la métallurgie et de la mécanique : 45 % pour la fusion, 45 % pour le chauffage avant formage, 10 % pour le traitement thermique et les applications diverses.

Cependant, grâce à l'évolution des technologies de l'électronique et à l'apparition de composants de commutation plus rapides, des applications innovantes sont apparues dans d'autres domaines : chimie (fusion directe de verres et d'oxydes...), grand public (plaque chauffante de cuisine).[29]

3.2.5. Autres applications de l'induction

On peut citer entre autre:

- Le brassage électromagnétique d'alliages métalliques ;
- Le confinement électromagnétique de plasma ;
- Le décapage de peinture ;
- Les plaques de cuisson ;
- La recharge d'accumulateurs.

3.2.6. Avantages et inconvénients des fours à induction

L'avantage de ce procédé est qu'il est propre, économe en énergie et permet de mieux contrôler la fusion des métaux. Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supprime les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup.

L'inconvénient principal à l'utilisation de four à induction dans une fonderie est le manque de capacité de raffinage ; les matériaux de charge doivent être propres des produits d'oxydation et décomposition connue, et quelques éléments d'alliage peuvent être dus perdu à l'oxydation (et doit étheré-ajouté à la fonte).Le tableau suivant montre ces avantages et ces inconvénients :

Tableau 3.1 : les avantages et les inconvénients d'un four à induction[30]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • La propreté de ce procédé, l'économie en énergie et permutation de mieux contrôler la fusion des métaux. • Les fonderies modernes utilisent ce type de four qui supplante les hauts fourneaux pour produire la fonte, car ces derniers émettent beaucoup de poussières et polluent beaucoup. • Les capacités des fours à induction varient de moins d'un kilogramme à cent tonnes, Comme aucun arc ou combustion n'est utilisé, la température de la matière n'est pas supérieure à celle requise pour le faire fondre, ce qui peut prévenir la perte des éléments d'alliage précieux. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'absence de raffinage dans le phénomène des matériaux de charge doivent être propres de produits d'oxydation et d'une composition connue. • Certains éléments d'alliage peuvent être perdus en raison de l'oxydation (et doivent être rajoutés après-coup à la fonte). • Le volume des matériaux à fondre est faible, plus la fréquence du four est élevée.

3.2.7. Four électrique à induction à basse fréquence (installé au niveau de l'entreprise ALFET)

Description [31]

Les différentes parties du four à induction :

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 classés en deux grandes parties :

1. la partie mécanique :

Elle est composée des éléments suivant :

- **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.

2. 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.
- Charpente de condensateurs de compensation.
- Charpente de condensateurs d'équilibrage.

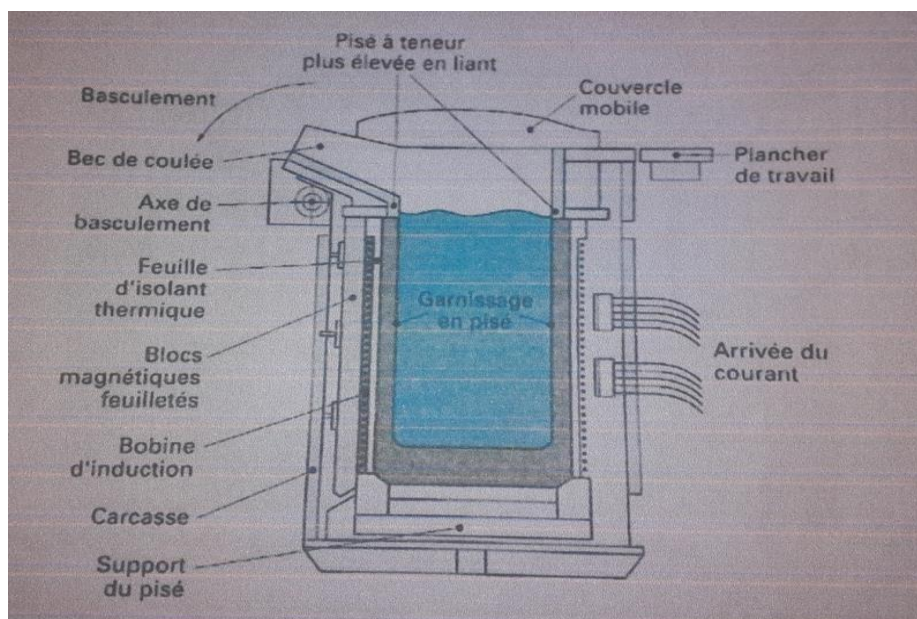


Figure 3.8 : Schéma descriptif d'un four électrique à induction [31]

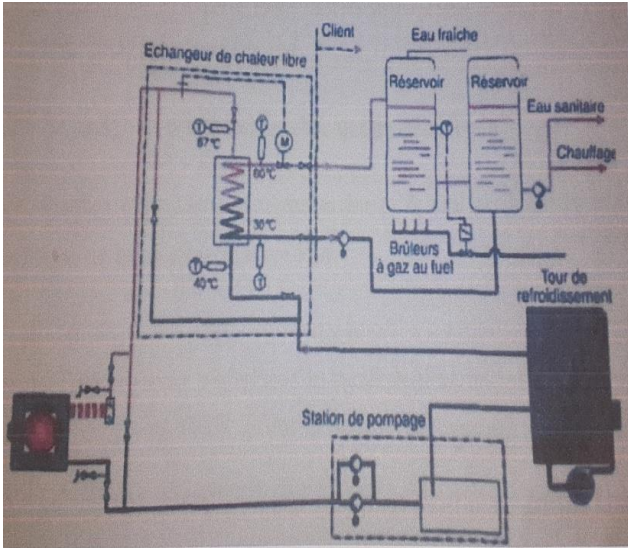


Figure 3.9 : Schéma d'installation du refroidissement du four [32]

Figure 3.10 : vue des deux pompes du de système système de refroidissement du four[32]

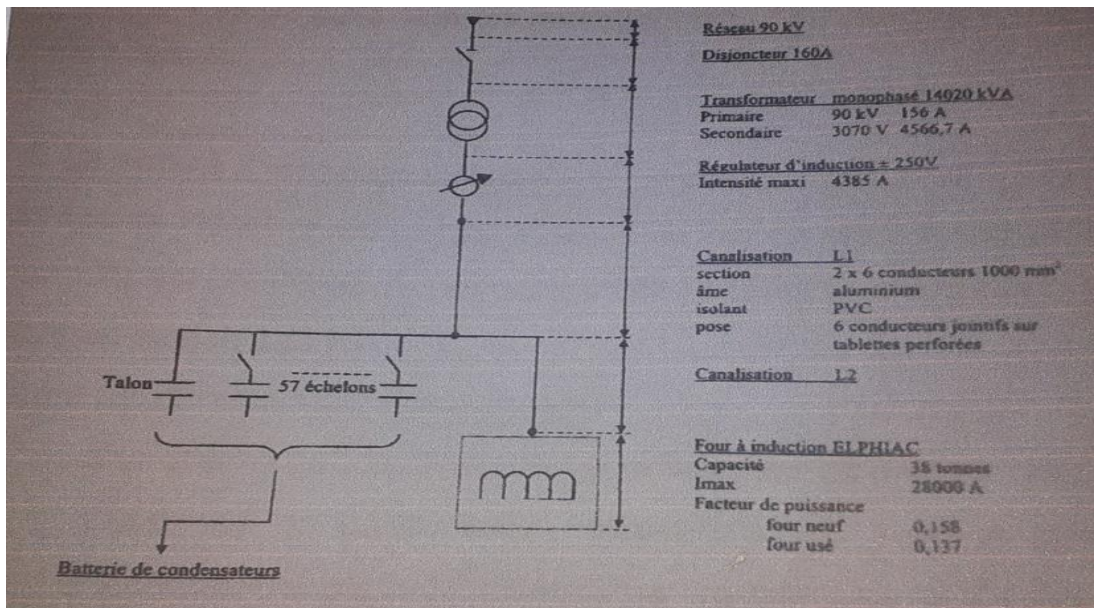


Figure 3.11 : Schéma d'installation électrique du four [32]

3.3. Modes de défaillances d'un four électrique à induction

Les fours électriques à induction de fusion sont des équipements industriels complexes et peuvent être sujets à diverses pannes de différent type (mécaniques, électriques, thermiques, hydrauliques...). Ces pannes peuvent varier en fonction du type de four, de sa taille, de son âge, de sa conception et de son utilisation. Voici quelques pannes courantes qui peuvent survenir sur les fours :

- Usure et rupture des matériaux réfractaires (tels que les briques) et des éléments chauffants (tels que les bobines et les résistances), Au fil du temps, ils peuvent de corroder, se fissurer et finalement se rompre.



Figure 3.12 : Usure et rupture des matériaux réfractaires. [Prenez d'ALFET]

- Des fuites ou des obstructions dans le système de refroidissement tels que les tuyaux, les joints ou les vannes, peuvent entraîner une perte de pression d'eau et la surchauffe du four.
- les températures élevées dans le four peuvent causer des l'isolation thermique utilisée pour protéger les parties sensibles du four .Des fissures ou des dégradations de l'isolation peuvent entraîner des fuites de chaleur, une inefficacité du chauffage ou une détérioration des composants internes.
- défaillance de bobines d'induction qui génèrent le champ magnétique peuvent subir des dommages ou une usure au fil du temps. Cela peut entraîner une diminution de l'efficacité du chauffage ou une panne complète.

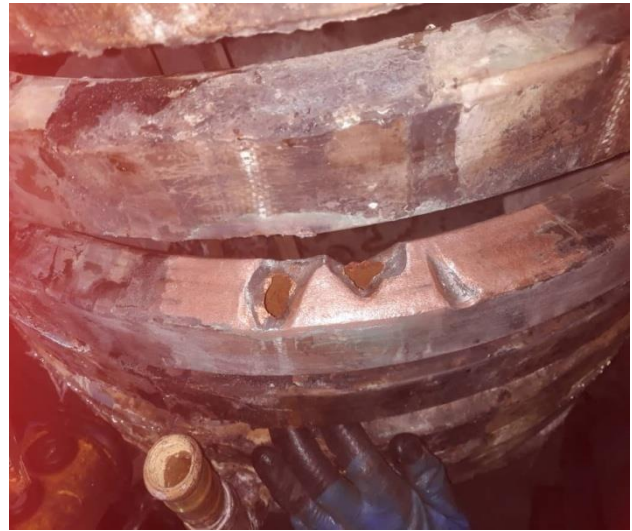


Figure 3.13 : défaillance de bobines d'induction.[prenezde ALFET]

- Des défaillances dans les composants électroniques du convertisseur, tels que les condensateurs ou les transistors, peuvent entraîner le dysfonctionnement du four.
- Des vibrations et des bruits anormaux à cause de l'usure ou grippage des composants mécaniques de support, tels que les roulements, les paliers ou les arbres.
- des fuites de matériau fondu peuvent se produire si les joints ou les fermetures du four ne sont pas étanches.



Figure 3.14 : fuite de matériau fondu.[prenezde ALFET]

- Blocage ou bouchage de four.

- Blocage de dispositifs de basculement de la cuve (vérins, pupitre...)
- débit d'eau insuffisant ou pas de débit en raison d'obstruction des conduites, pompe ou vannes défectueuse ou bien des problèmes de pression et de filtrage
- défaillance du système de contrôle et d'automatisation des fours peuvent rencontrer des problèmes de logiciel, de capteurs défectueux ou de connexions électriques instables, ce qui peut entraîner une mauvaise régulation de la température, une perte d'efficacité ou des arrêts inattendus.
- Problèmes d'alimentation électrique : des coupures decourant, des fluctuations de tension ou des problèmes de connexion électrique peuvent entraîner des arrêts du four ou des surchauffes.
- des courts-circuits peuvent se produire en raison de câbles endommagés, de connexions lâches ou de défauts dans les composants électriques.
- des problèmes de câblage ,tels que des connexion mal serrées, des câbles dénudés ou des fils endommagés, peuvent provoquer des pannes électriques, des étincelles ou des surchauffes.



Figure 3.15 : câbles électriques endommagés.[prenez de ALFET]

3.4. Application : « Diagnostic de défauts du four électrique à induction basse fréquence par l'arbre de défaillance »

Mise en œuvre

Notre étude a pour but de réduire le nombre de défaillances en mettant en œuvre un arbre de défaillance pour le diagnostic de défauts, pour cela, nous exploiterons les données du fichier historiques concernant le four à induction basse fréquence. Le tableau 3.2 expose cet historique entre la période du 01/03/2017 à 10/02/2021.

Tableau 3.2 : Dossier historique du four à induction [donné à ALFET].

N°	Date de démarrage	Date d'arrêt	TBF (h)	TTR (h)	pannes	causes	Conséquences	Actions
1	01/03/2017	30/04/2017	1380	60	Pas de débit d'eau. Débit d'eau insuffisant.	Moteur d'entraînement de la pompe d'eau endommagé. Usure, casse interne dans la pompe.	La surchauffe du four.	Réparer ou remplacer la pompe par un autre.
2	01/03/2017	01/04/2018	400	320	Débit d'huile insuffisant.	Défaillance des distributeurs	Blocage du vérin cause le blocage de four.	Changer les distributeurs
3	06/04/2017	06/06/2017	1400	40	Coupage du courant	Défaillance de transformateur - Défaillance de bouton poussoir	Arrêt du système	Changer les relais et les fusibles
4	03/11/2017	06/01/2018	980	460	Surintensité	phases déséquilibrées	Une diminution de l'efficacité de la fusion à cause de la bobine surchauffée.	Vérifier les connexions électriques Répartir les charges
5	31/12/2018	10/02/2018	1240	200	Permutation étoile /triangle	Contacteur étoile/triangle défaillant à cause de durée de vie ou mauvais manipulation	Des difficultés au démarrage de la pompe provoquant des retards dans le	Vérifier le contacteur étoile/triangle (remplacer un nouveau ou le bien manipulé)

							refroidissement de four	
6	01/01/2019	01/02/2019	660	60	Vibration de four	Culasse desserré	Fissuration du creuset Dégradations des composants électriques et mécaniques	Changement de culasse
7	10/01/2019	13/02/2019	680	40	Bouchage de la bobine d'induction	Mauvaise refroidissement à causes des impuretés.	Augmentation de la température de la bobine Réduction de l'efficacité de la fusion. Court-circuit	Vérifier le système de refroidissement (les conduites d'eau, des pompes, des échangeurs de chaleurs et des dispositifs de régulation du température)
8	02/02/2019	04/04/2019	1130	300	Indicateur de niveau erroné	colmatage	L'arrêt de circuit de refroidissement	Régler l'indicateur
9	10/02/2019	13/03/2020	482	205	Echauffement d'huile	Viscosité d'huile diminuée	Blocage du four	Changement d'huile
10	18/03/2019	20/05/2019	926	511	Surintensité	Problème de câblage	Des courts-circuits et surchauffe	Vérifiez où réparer les câbles.
11	25/03/2019	27/05/2019	1320	120	Tension d'alimentation réduite	Doigts de connexion desserrés	Instabilité du fonctionnement (réduction de la puissance chauffe)	Changer les doigts, Resserrer correctement les doigts
12	28/03/2019	29/05/2019			Fuites obturation	Raccords desserrés/joints défectueux	Perte de performance du circuit de refroidissement	Vérifier l'étanchéité des joints et resserrer les tuyaux.
13	01/05/2019	03/07/2019	764	676	La surchauffe de la bobine	Débit diminué A cause de	Mauvais fonctionne	Réparer ou remplacer la

					d'induction	blocage de vanne	ment	vanne par autre.
14	09/09/2019	11/10/2019	409	311	Bouchage de four	La crasse. Mauvais qualité de métal	Perturber le bon fonctionnement du processus de fusion	Nettoyer le Four et Vérifier la qualité de métal
15	15/11/2019	03/01/2020	1203	150	Four bloqué	Vérin de basculement bloqué (Début d'huile insuffisant)	Arrêt de four	Vérifier monté en pression (augmenter le débit)
16	02/03/2020	06/06/2020	1540	380	Basse de tension	doigts du transformateur mal positionnés	Mauvais fonctionnement	Serrez correctement les connexions du transformateur
17	12/03/2020	15/05/2020	983	450	Surintensité	Condensateur défaillant	Perturbation de fonctionnement du four	Détection et remplacement du condensateur défaillant.
18	01/07/2020	30/08/2020	1000	320	Blocage du vérin de basculement	Usure de piston	Blocage du four	Changer le piston
19	01/11/2020	10/02/2021	1773	360	La Surchauffe de four	Axe de distributeur d'eau grippé	Mauvais fonctionnement	Nettoyage des axes, la lubrification
20	30/12/2020	10/02/2021	920	520	La Surchauffe de la bobine d'induction	Pompe d'eau grippée	Mauvais fonctionnement	Nettoyer soigneusement la pompe Vérifier les composants internes de la pompe.

3.5. Construction de l'AdD

Pour la construction de l'arbre de défaillance d'un four électrique à induction basse fréquence, on a suivi une méthode déductive, qui fournit une démarche systématique pour identifier les causes d'un événement unique intitulé **événement redouté** (point de départ de la construction de l'arbre), c'est à dire: **panne d'un four électrique à induction basse fréquence**.

À partir de là, le principe est de définir des niveaux successifs d'évènements tels que chacun est une conséquence d'un ou plusieurs événements du niveau inférieur intitulé **événements intermédiaire**

La démarche est la suivante : pour chaque événement d'un niveau donné, le but est d'identifier l'ensemble des événements immédiats nécessaires et suffisants à sa réalisation.

Des opérateurs logiques (ou portes) permettent de définir précisément les liens entre les événements des différents niveaux.

Ce processus déductif est poursuivi niveau par niveau jusqu'à ce que les spécialistes concernés ne jugent pas nécessaire de décomposer des événements en combinaisons d'évènements de niveau inférieur, notamment parce qu'ils disposent d'une valeur de la probabilité d'occurrence de l'évènement analysé. Ces événements non décomposés de l'arbre sont appelés **événements élémentaires (ou événements de base)**.

Contrairement à l'approche inductive de l'AMDEC (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) qui ne cible pas les conséquences des défaillances élémentaires, l'approche déductive de l'arbre de défaillance permet de se focaliser exclusivement sur les défaillances contribuant à l'évènement redouté.

Alors, en démarrant de l'évènement redouté qui est la panne **d'un four électrique à induction basse fréquence**, on a tracé l'arbre de défaillance. Il est composé de quatre événements de niveau inférieur (Électrique, thermique, mécanique, hydraulique) pour lesquels nous tracerons un arbre de défaillance pour chacun afin d'identifier les événements élémentaires d'une panne de four (identification des causes possibles de l'arrêt du four d'après son historique de pannes dans la période de 01/03/2017 à 10/02/2021).

Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence : Les fours électriques à induction basse fréquence sont sujets à des défauts (mécaniques, électriques, thermiques, hydrauliques,) c'est ce que représente la figure 3.16

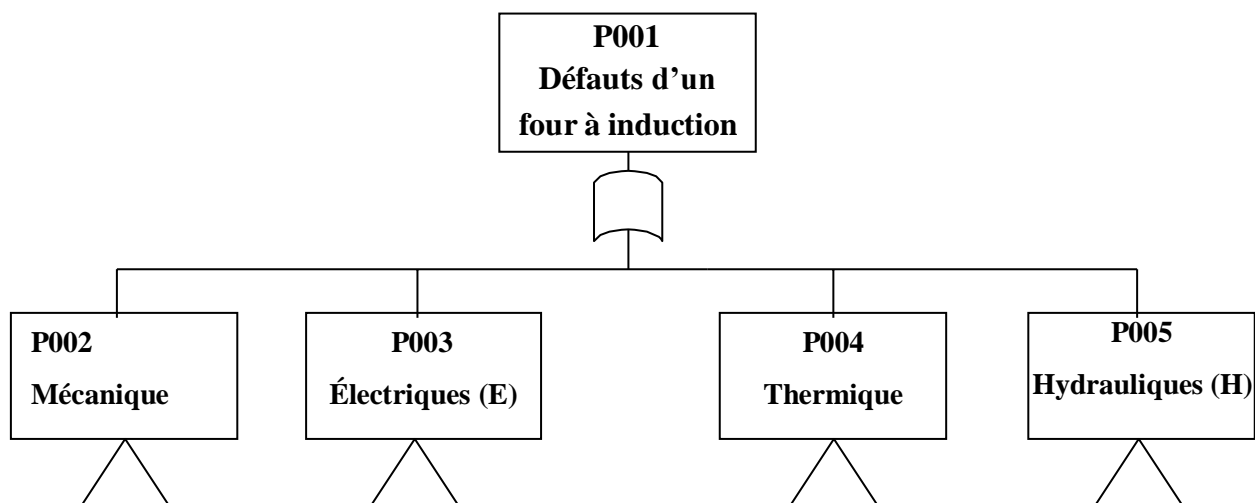


Figure 3.16 : Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence

a. Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence (Défauts Mécaniques).

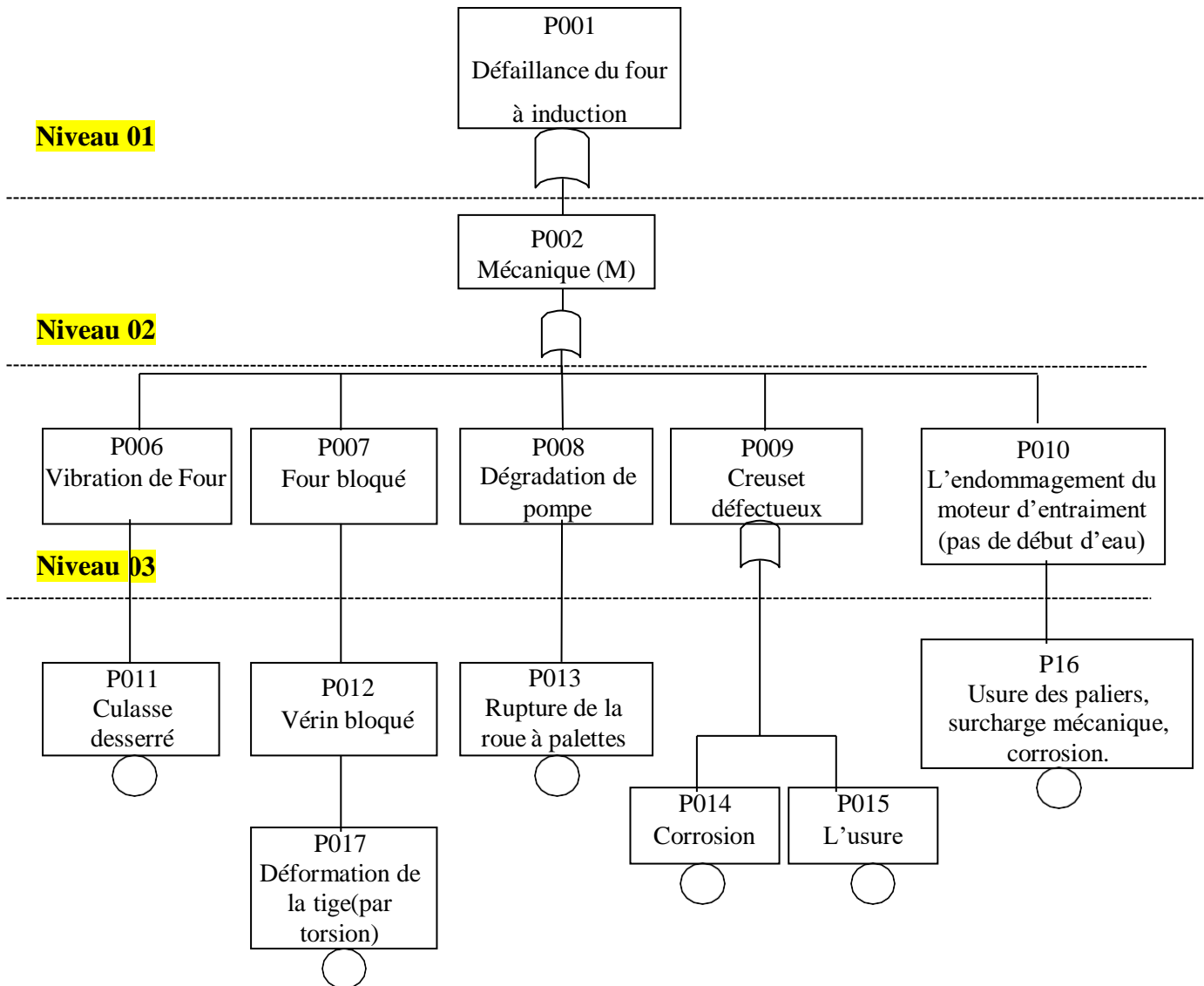


Figure 3.17 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts Mécaniques).

À partir de la **Figure 3.17** nous notons que les défauts mécaniques identifier dans le four à induction sont principalement dus à des vibrations excessives et liés à d'autres facteurs tels que, l'usure, la corrosion et les contraintes mécaniques (ruptures et déformations). Il est important de noter que ces défauts mécaniques ont des conséquences graves sur la performance et la fiabilité du four. Il est donc crucial de mettre en œuvre des mesures préventives telles que le resserrage régulier des connexions de la culasse, l'entretien des vérins, la maintenance du moteur de la pompe, la sélection de la creuset de haute qualité et la conception adéquate de la tige. Ces recommandations sont essentielles pour minimiser les perturbations de production et assurer le bon fonctionnement du four.

b. Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence (Défautes électriques).

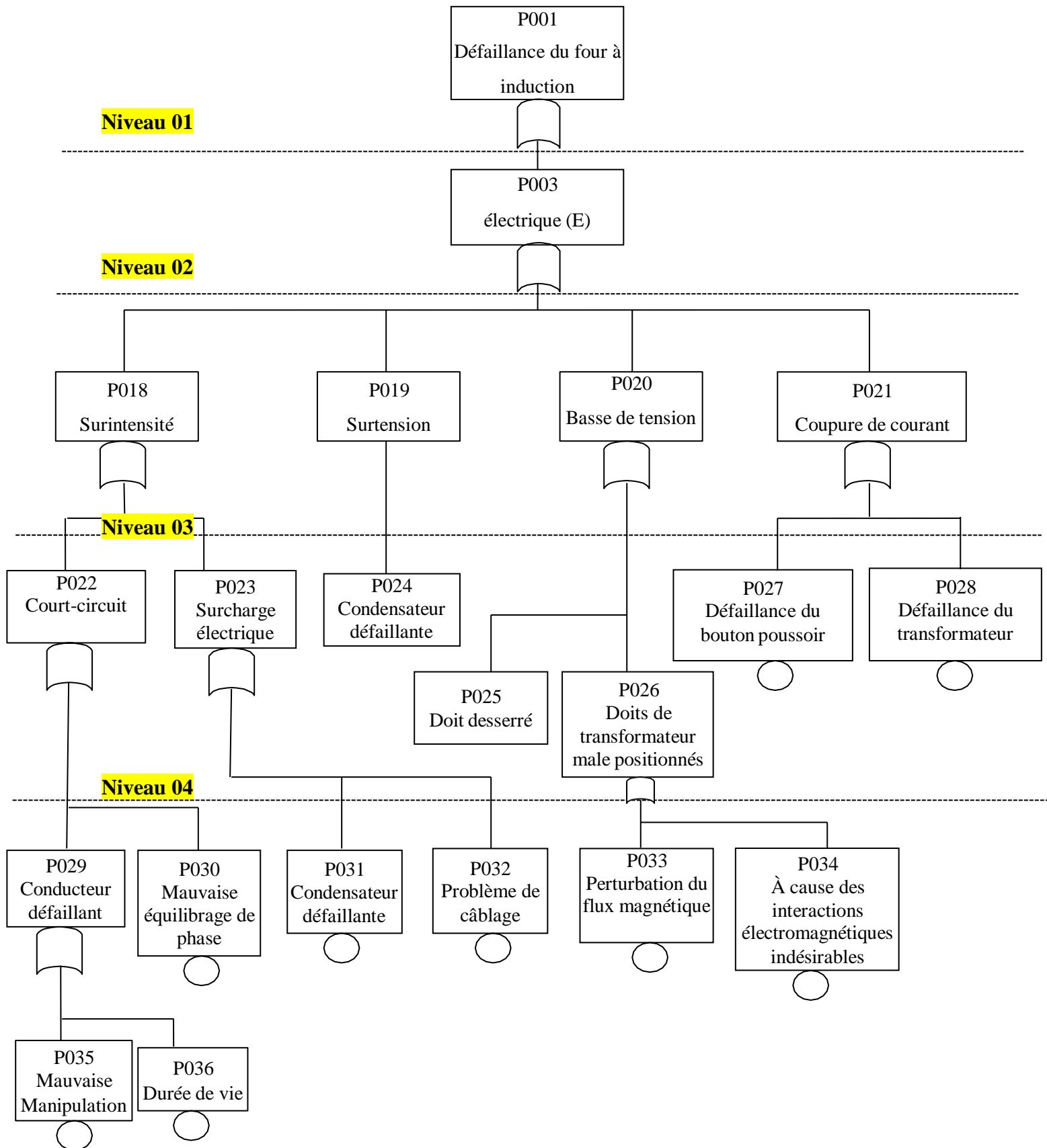


Figure 3.18 :Arbre de défaillance du four à induction (Défauts électriques).

À partir de la figure 3.18 on peut voir que les défauts électriques souvent trouvés largement à cause de la surintensité par court-circuit et surcharge électrique cela se produit à cause de contact direct entre conducteurs ou un problème de câblage aussi ces défauts dues aux problèmes spécifiques dans le système d'alimentation électrique et d'instabilité de tension.

Pour éviter ces défauts électriques, il est nécessaire d'utiliser des dispositifs de protection tels que les régulateurs de tension, d'installer des dispositifs de secours, et de maintenir une bonne mise à la terre. Ces mesures aideront à garantir un fonctionnement stable et fiable du four électrique.

b. Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence (Défauts Thermique).

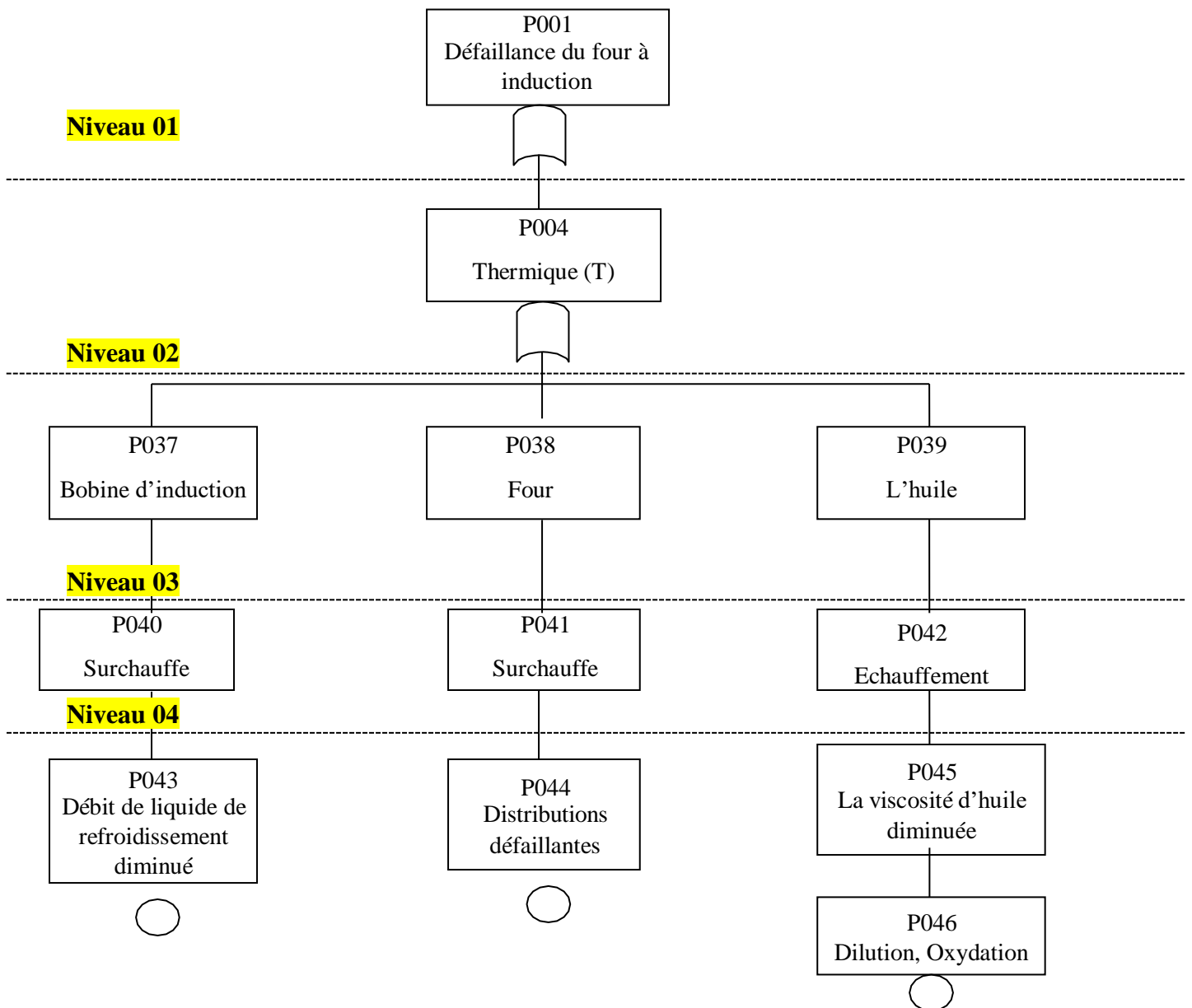


Figure 3.19: Arbre de défaillance du four à induction (Défauts Thermiques).

Parmi les causes les plus importantes illustrées sur la figure 3.19, qui conduisent à un défaut thermique, il y a des surchauffes, une diminution de débit de refroidissement (huile). Il est essentielle de maintenir un système adéquat de liquide de refroidissement dans un four électrique pour éviter ces défauts thermiques.

b. Arbre de défaillance du four à induction basse fréquence (Défautshydrauliques).

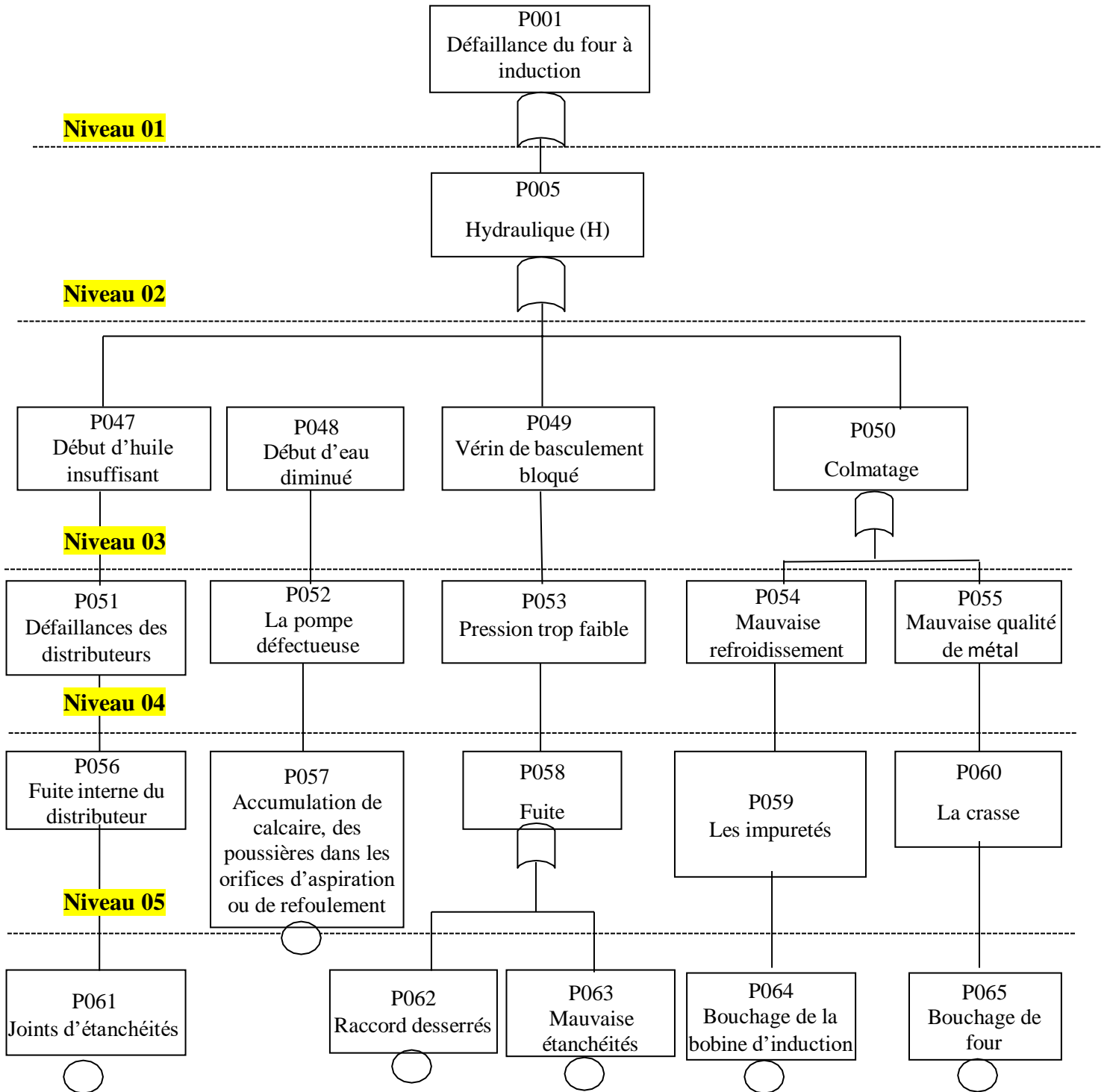


Figure 3.20 : Arbre de défaillance du four à induction (Défauts hydrauliques).

Les pannes les plus fréquentes sont dues au mauvais refroidissement à cause des fuites et des impuretés. Il est important de corriger rapidement les défauts hydrauliques, un entretien régulier, une inspection des composants, un remplacement des filtres et suivi du niveau et de la qualité du fluide hydraulique peuvent contribuer à réduire les défauts hydrauliques et à prolonger la durée de vie de ce système.

3.6. Plan de maintenance préventive d'un four électrique à induction

La mise en place d'un plan de maintenance préventive pour un four électrique à induction de fusion est essentiel pour assurer son bon fonctionnement et prolonger sa durée de vie.

1. Nettoyage régulier :

- Nettoyez les bobines d'induction et les connexions électriques pour éliminer la saleté, les débris ou les dépôts qui pourraient nuire aux performances du four.
- Vérifiez et nettoyez les systèmes de refroidissement, tels que les échangeurs de chaleur, pour maintenir une dissipation thermique efficace.

2. Vérification des composants électriques :

- Vérifiez l'état des câbles électriques, des interrupteurs, des relais et des fusibles. Remplacez ceux qui sont endommagés ou usés.
- Contrôlez les connexions électriques pour vous assurer qu'elles sont bien serrées et en bon état.

3. Inspection des bobines d'induction :

- Vérifiez régulièrement l'état des bobines d'induction pour détecter les fissures, les déformations ou les signes de surchauffe. Remplacez les bobines défectueuses dès que possible.

4. Vérification du système de refroidissement :

- Surveillez le système de refroidissement pour vous assurer que les pompes fonctionnent correctement et que le débit d'eau ou d'huile de refroidissement est adéquat.
- Vérifiez les filtres et nettoyez-les ou remplacez-les si nécessaire.

5. Lubrification des composants mécaniques :

- Graissez les roulements, les engrenages et les autres pièces mobiles conformément aux recommandations du fabricant.
- Vérifiez et remplacez les joints d'étanchéité si nécessaire.

6. Calibrage et vérification des capteurs et des systèmes de contrôle :

- Calibrez les capteurs de température, de pression et d'autres instruments de mesure pour vous assurer de leur précision.
- Vérifiez les systèmes de contrôle et de régulation du four pour vous assurer qu'ils fonctionnent correctement.

7. Formation du personnel :

- Assurez-vous que le personnel chargé de l'exploitation du four est correctement formé sur les procédures de maintenance préventive, la sécurité et les bonnes pratiques d'utilisation du four.

8. Tenue d'un journal de maintenance :

- Documentez toutes les activités de maintenance préventive, y compris les vérifications, les réparations, les remplacements de pièces, les problèmes rencontrés et les actions prises.

3.7.CONCLUSION

Au terme de ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les fours électriques en générales et en particulier les fours à induction, concernant leur principe de fonctionnement, descriptions, types, avantages et inconvénients des fours à induction.

En outre, on a diagnostiqué le four à induction basse fréquence par la technique de l'arbre de défaillance pour établir un plan de maintenance préventive de ce four. Cette approche nous a permis d'analyser de manière systématique les causes possibles des défauts et les conséquences associées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans le cadre de notre projet de fin d'études établi pour l'obtention du diplôme de master, en électromécanique spécialité maintenance industrielle, on a essayé de traiter la problématique de la défaillance du four électrique à induction. En étudiant son historique de pannes sur une période de fonctionnement.

Les fours électriques à induction jouent un rôle crucial dans l'industrie en raison de leur importance dans le processus de fabrication et de transformation des métaux. Ils permettent de réaliser des opérations de fusion précises, contrôlées et efficaces, ce qui les rend indispensables dans des nombreux secteurs. Pour que son fonctionnement soit bon et sûr, il nécessite une évaluation efficace et opportune de son état, pour cela, il est essentiel de mettre en place une maintenance préventive régulière, une isolation thermique, régulez la température pour minimiser les pertes de chaleurs inspectez, testez les systèmes électriques et vérifiez les connexions permettent de prévenir les surcharges et les risques de court-circuit entretenez les composants mécaniques ,surveillez les vibrations, les bruits anormaux .Enfin, effectuez une maintenance préventive des systèmes hydrauliques(pompes, vannes..) et attention aux fuites et à la pression...etc. Ces mesures permettront de détecter les défauts potentiels, d'optimiser les problèmes potentiels, d'optimiser les performances, de minimiser les temps d'arrêt et de réduire les coûts de maintenance, assurant ainsi une exploitation fiable et efficace de ses fours.

Avant tout on a présenté une mise en valeur de la maintenance comme impérativement nécessaire à une meilleure garantie de la disponibilité des équipements toujours faveurs de l'amélioration de l'efficacité de la production et de l'économie, défaillances en maintenance et diagnostic avec ses différentes méthodes.

Deuxièmement, nous avons discuté d'une explication de l'une des méthodes de diagnostic, qui est l'arbre de défaillance, son principe de fonctionnement, sa représentation graphique, et sa démarche et construction dans le cadre qualitatif et quantitatif pour au moins donner une image sur cette technique et comment nous avons l'appliquer dans le diagnostic des défauts.

➤ Le troisième et dernier chapitre est au cœur de ce travail. Il est entièrement consacré au diagnostic de défauts par la méthode de l'arbre de défaillances du

four à induction, ce qui nous a permis de constater que ces fours ont un problème de :

- *défaillance mécanique*, due aux vibrations et autre facteur, l'usure et la corrosion des composants de four.
- *Défaillances électriques*, des surintensités par surcharge électrique, instabilité de tension, induit par le contact direct entre les conducteurs, problème de câblage et d'alimentation.
- *Défaillances thermiques*, due à l'échauffement résultant à cause de diminution de liquide de refroidissement.
- *Défaillances hydrauliques*, due au mauvais refroidissement à cause des fuites et des impuretés.

Afin d'améliorer encore le rendement, la qualité et l'efficacité du service maintenance, aussi d'augmenter la production .les résultats de notre travail peuvent être utilisés comme références au futur pour assurer la disponibilité des systèmes.

Références Bibliographiques

- [1] GUEMMOUR Mohamed Boutkhill, cours master 1« Chapitre 01 : La fonction maintenance». UNIVERSITE IBN KHALDOUN DE TIARET, 2020
- [2] Larousse, Éditions. « Définitions : maintenance - Dictionnaire de français Larousse ». <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/maintenance/48704>. Consulté le 24 avril 2023.
- [3] L.BENALI. « Maintenance Industrielle » Office des Publications Universitaires, 2006
- [4] S.BENSAADA, D.FELIACHI, « *la maintenance industrielle* », Office des Publications Universitaires, 2015
- [5] <https://escal.jimdofree.com/la-maintenance-industrielle/maintenance-g%C3%A9n%C3%A9ralit%C3%A9/>. Consulté le 07 avril 2023.
- [6] JEAN-MARIE AUBERVILLE, « *Maintenance industrielle* », L'ouvrage (niveau B), Ellipses Edition Marketing S.A., 2004 32, rue Bague 75740 paris cedex 15
- [7] HORKOUS Younes et KHOUIDMI Ahmed, « Diagnostic des pannes des machines par la technique de l'arbre de défaillance », Mémoire de Master Université Ibn Khaldoun de Tiaret ,2021
- [8] TATIANA.K.H, « *surveillance des procédés basé de méthode de classification : conception d'un outil d'aide pour détection et le diagnostic des défaillances*», Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2004.
- [9] CLAUDIA.V.N, « *Diagnostic Par Technique d'apprentissage Floues, Concept d'une Méthode De Validation Et d'optimisation Des Partitions*», Thèse de doctorat université de Toulouse, 2007.
- [10] M.MRABET, « *Contribution A La Conception D'un Outil D'aide Diagnostic Des Systèmes De Production*», Mémoire de master, Université AboubkrBelkaid de Tlemcen, 2017.
- [11] T.ALIANE, « *Introduction Au Diagnostic Des Défaillances*», laboratoire A2SI-ESIEE-Paris, 2006.
- [12] M.H.MAZOUNI, « *Pour Meilleure Approche Du Management Des Risque...*», Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine, 2008.
- [13] <http://www.previnfo>

- [14] KASSAS BACHIR, Application de l'arbre de défaillance « FaultTrees», université Badji Mokhtar, [en ligne], Annaba, 2017, Disponible sur : <http://biblio.univ-annaba.dz>
- [15] Arbre de défaillance, cours, chapitre 06, université de msila [en ligne].Disponible sur : <http://elearning.univ-msila.dz>
- [16] MICHAEL HAVBRO FABER, « *Statistics and Probability: Theory In Pursuit of Engineering Decision Support* », Springer, London, 2012.
- [17] F.ZOHRA, « *Utilisation des réseaux bayésiens pour calculer la fiabilité des systèmes*», Mémoire de Magister, université de SAAD DAHLAB-BLIDA, 2010.
- [18] M. BENADDA Abdellah & M. BENAHMED Abderrazzak , « Contribution à l'étude demaintenance d'un transformateur MT/BT au niveau de l'entreprise SNVIC.I.T Aïn-bouchekif Tiaret »,mémoire de fin d'étude Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2020.
- [19] M.STAMATELATOS & W.VESELY “*FaultTreeHandbookwith Aerospace Applications* », NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington, 2002.
- [20] NIKOLAOS LIMNIOS, « FaultTrees», ISTE Ltd, United State, 2007.
- [21] La norme **CEI61025**
- [22]A.KHEDHER, « *Méthodes Du Diagnostic-Cours*», Institut supérieur des sciences appliquées et technologies de GAFSA, 2018.
- [23] Vesely, W.E., Goldberg,F.F,U.S NuclearRegulatoryCommission, Roberts, N.H.,University ofWashington,Haasl,D.F,Institute of system Sciences,Inc,« FaultTreeHandbook.» , January 1981.
- [24] MAARADJI Farouk Abdeldjalil&HOUARI Nadhir «Analyse FMD d'un four à induction », Mémoire Master Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022
- [25] MAMMERI Toufik« contribution à l'étude théorique d'un four à induction »Mémoire de Magister Matériaux électrotechnique 2012
- [26] LOUIS CHAZE, Fusion de la fonte au cubilot : Principes, technologie, aspects technico-économiques, CTIF 1998.
- [27] RINDRA HARIVÉLO Nicole « *étude de champ magnétique et de température créés par un four à induction* » mémoire de master de l'université d'Antananarivo sciences et

Technologies physique et applications laboratoire de thermodynamique thermique et combustion Madagascar 2018.

[28] M. Toufik « *Contribution à l'étude théorique d'un four à induction* », Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université de Batna, 2012

[29] FOUAGUIG D, DAIS O « *Evaluation du FMD d'un four à arc électrique au niveau l'entreprise d'ALFET Tiaret* », Mémoire Master Université Ibn Khaldoun de Tiaret ,2017

[30] FOUAGUIG D, DAIS O « *Evaluation du FMD d'un four à arc électrique au niveau l'entreprise d'ALFET Tiaret* », Mémoire Master2017

[31] Rahmani Nedjma & Zerrouk Lalia «*Mise en place d'un plan de maintenance préventive d'un four à induction au niveau de l'entreprise ALFET*», Mémoire Master Université Ibn Khaldoun de Tiaret ,2018

[32] Documents techniques de l'entreprise ALFET

ANNEXE A1 : CONCEPTS ET TERMINOLOGIE

Dans premier temps, nous rappelons que les principaux termes utilisés en diagnostic reposent principalement sur le travail effectué par [1].

Les terminologies les plus utilisées dans le domaine du diagnostic sont les suivantes :

- **Fonctionnement normale d'un système** le fonctionnement d'un système est dit normal lorsque le système est capable de fournir les fonctions pour lesquelles il a été conçu.
- **Anomalie** permet de décrire tout ce qui n'est pas conforme à une référence.
- **Dégradation** une perte de performances des fonctions assurées par le système.
- **Défaut** est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence.
- **Défaillance** définit une anomalie fonctionnelle au sein d'un système physique, c'est-à-dire caractérise son incapacité à accomplir certaines fonctions qui lui sont assignées
- **Dysfonctionnement** signifie trouble, anomalie dans le fonctionnement, défaut, mauvais état de travail. Le terme peut s'employer pour parler aussi bien d'une machine, équipement, ou groupe d'hommes (personnels).
- **Panne** lorsque plus aucune fonction n'est assurée, le terme panne est employé à la place de défaillance.
- **Signe** un défaut est perceptible au travers d'un signe, caractère manifestant un état comportemental anormal. Un signe est caractérisé par un ensemble d'observations en provenance d'un système physique et est révélateur de la présence d'un défaut.
- **Symptôme** un symptôme est un phénomène qui survient sur un dispositif et qui révèle un dysfonctionnement. Il est également fréquent de regrouper les symptômes en fonction du dysfonctionnement auxquels ils sont liés : on parle alors de syndrome.

L'apparition de symptômes cause une défaillance.

La distinction entre les termes symptôme et signe s'apparente donc à différence entre notions de défaut et de défaillance. Un symptôme révélateur d'une défaillance est nécessairement un signe, alors qu'un défaut se manifeste au travers de signes qui ne sont pas nécessairement des symptômes.

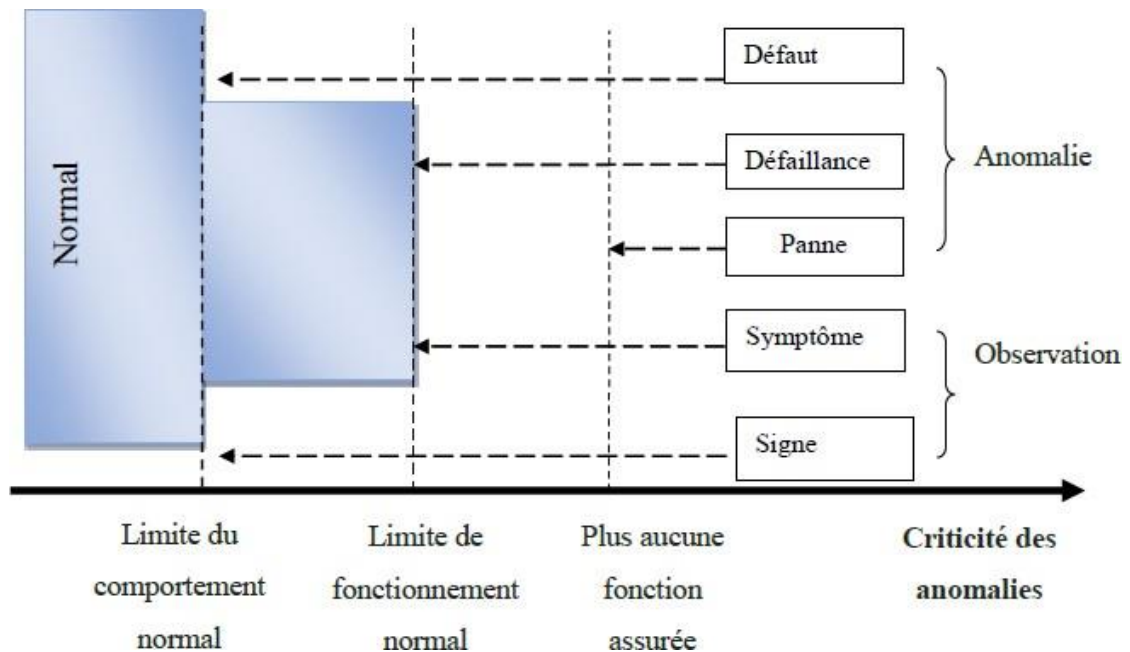


Figure 1 : Ordonnement des anomalies selon leur criticité

- **Faute** c'est une action, volontaire ou non, dont le résultat est le non prise en compte correcte d'une directive ou d'une contrainte exprimée par le cahier des charges.
- **Erreur** c'est une partie du système ne correspondant pas ou correspondant incomplètement au cahier des charges. une erreur est la conséquence d'une faute. l'erreur est latente tant que la partie erronée du système n'est pas sollicitée. Elle devient effective au moment de la sollicitation de la partie erronée.
- **Résidu** communément appelé indicateur de défaut ou variable d'écart, est un signal conçu comme indicateur d'anomalies comportementales ou fonctionnelles

- ***L'incertitude*** est le fait de ne pas connaître ou prévoir l'état de la réalité pour déterminer la valeur de vérité d'une proposition.
- ***L'imprécision*** fait référence à la description incomplète d'un état de la réalité par une proposition.

ANNEXE A2 : 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

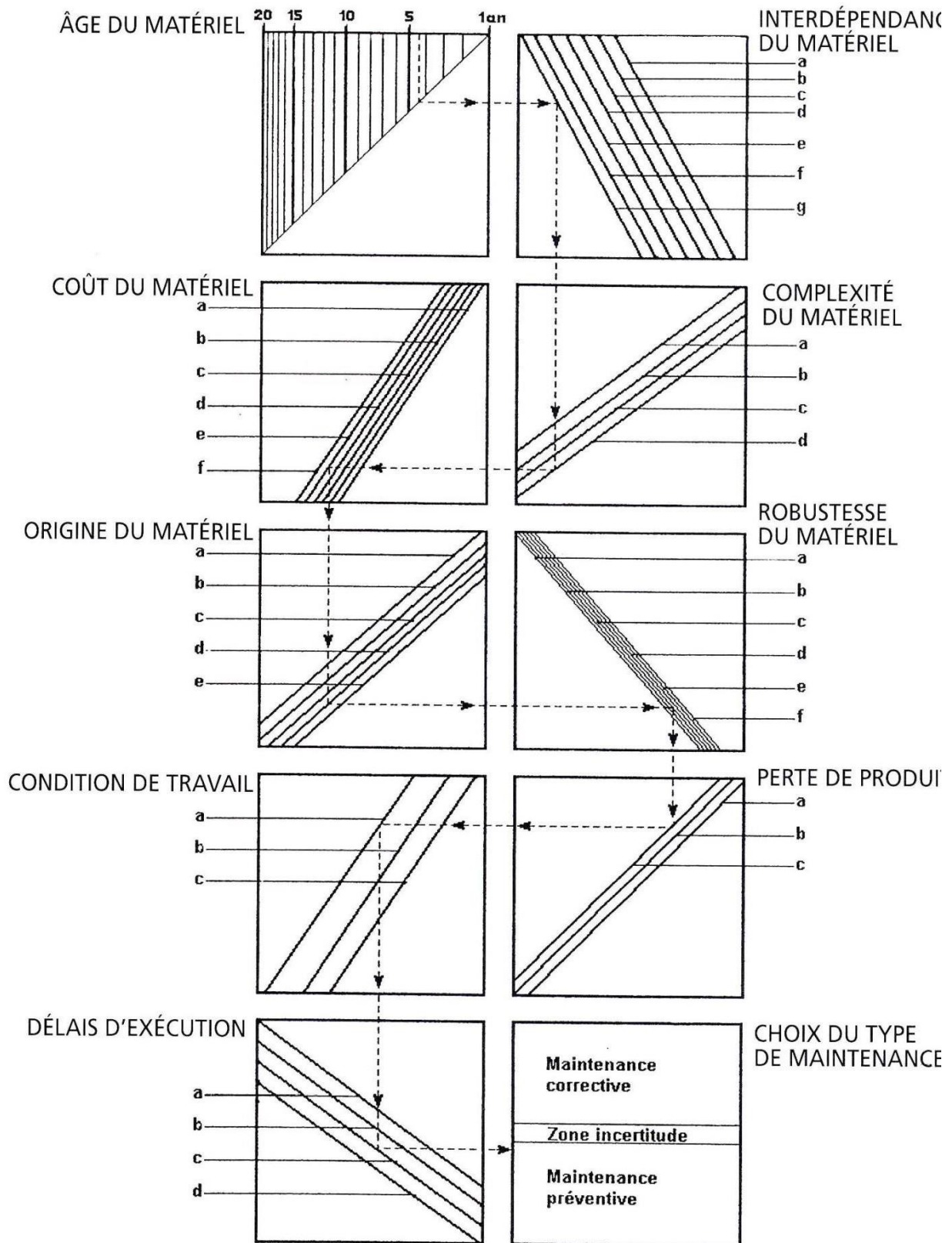
b : Délais serrés

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*



Abaque de Noiret

Annexe A3 : Tableau de coefficient

Désignation critères	NB PTS	COEF	Désignation critères	NB PTS	COEF
LES CONDITIONS DE TRAVAIL			COUT 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			

Résumé.

Ce mémoire de master se concentre sur le diagnostic des défauts d'un four électrique à induction en utilisant la méthode de l'arbre de défaillance. Les fours électriques à induction sont largement utilisés dans l'industrie pour la fusion des métaux. Cependant, ces équipements peuvent rencontrer divers types de défaillances, ce qui entraîne des temps d'arrêt coûteux et des perturbations de la production. Dans ce mémoire, une approche basée sur l'arbre de défaillance est proposée pour analyser et diagnostiquer les défauts potentiels du four électrique à induction. L'arbre de défaillance permet de modéliser les relations causales entre les défaillances et les conséquences, ce qui facilite l'identification des causes profondes des problèmes. Une étude expérimentale est réalisée pour valider l'efficacité de l'approche proposée. Les résultats montrent que la méthode de l'arbre de défaillance peut être un outil précieux pour le diagnostic des défauts des fours électriques à induction.

Mots clés : Diagnostic ; Arbre de Défaillance ; four électrique à induction

Abstract.

This masters thesis focuses on the diagnosis of faults in an induction electric furnace using the fault tree analysis method. Induction electric furnaces are widely used in the industry for metal melting. However, these equipment can experience various types of failures, leading to costly downtime and production disruptions. In this thesis, an approach based on fault tree analysis is proposed to analyze and diagnose potential faults in the induction electric furnace. The fault tree analysis allows modeling the causal relationships between failures and consequences, facilitating the identification of root causes of problems. An experimental study is conducted to validate the effectiveness of the proposed approach. The results show that the fault tree analysis method can be a valuable tool for diagnosing faults in induction electric furnaces.

Keywords: Diagnoses; Fault Tree; induction electric furnace

الملخص

تتركز أطروحة الماستر هذه على تشخيص الأعطال في فرن الحث الكهربائي باستخدام طريقة شجرة الأعطال. تستخدم أفران الحث الكهربائي على نطاق واسع في الصناعة لصهر المعادن. ومع ذلك، يمكن أن تواجه هذه المعدات أنواعًا مختلفة من الإخفاقات، مما يؤدي إلى توقف الإنتاج المكلف وتعطل الإنتاج. في هذه الأطروحة، تم اقتراح نهج قائم على شجرة الأعطال لتحليل وتشخيص الأعطال المحتملة لفرن الحث الكهربائي. تُستخدم شجرة الأعطال لنمذجة العلاقات السببية بين حالات الفشل والنتائج، مما يسهل تحديد الأسباب الجذرية للمشاكل. تم إجراء دراسة تجريبية للتحقق من فعالية النهج المقترح. تظهر النتائج أن طريقة شجرة الأعطال يمكن أن تكون أداة قيمة لتشخيص أعطال أفران الحث الكهربائي.