

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



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

La mise en place d'un plan de maintenance
préventive sur un site de transport d'énergie
électrique

Préparé par :

ABDERRAHMANE Souria et CHERCHAB Benabad

Soutenu publiquement le : 19 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. ABED Belkacem	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. GUEMMOUR Mohamed	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. ELGUERRI Mohamed	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BEY Mohamed	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

Remercîment

En premier lieu, nous remercions « ALLAH » qui nous avait donné la santé et la volonté pour achever ce travail et d'atteindre cette réussite.

Nous remercions notre encadrant Dr. BEY Mohamed qui a proposé ce sujet et dirigé ce travail et pour ces remarques, sa patience, sa disponibilité et ces conseils,

Toute la durée de ce travail.

Nous exprimons notre gratitude aux membres de jury d'avoir consacré une partie de leur temps pour juger ce travail.

Nous remercions l'équipe pédagogique de l'Université IBN Khaldoun, ainsi que l'équipe enseignante du Département de Génie

Mécanique qui a permis de nous former avec beaucoup d'efficacité aux connaissances relative à ce cursus.

Nous remercions Dr. GUEMMOUR Boutkhil Mohamed pour son dévouement à son travail tout au long de nos années scolaires.

Enfin, nos sincères remerciements vont à nos familles : nos parents et tous nos proches et mais qui nous ont accompagnés, aidé et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail :

A nos chers pères

A nos chères mères

A nos frères et sœurs

A tous nos collègues de la promotion 2022

A tous nos amis(es) sans exception.

Liste des figures

Figure I.1 : Evolution de la maintenance depuis 1940.....	5
Figure I.2 : Les fonctions de maintenance	5
Figure I.3 : Activités de la fonction de maintenance.....	7
Figure I.4 : Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise	7
Figure I.5 : Schématisation des objectifs de la maintenance.....	8
Figure I.6 : Les types de maintenance	10
Figure I.7 : Portes OU & ET	17
Figure I.8 : Diagramme d'Ishikawa	17
Figure II.1 : Courbe de la fiabilité.....	22
Figure II.2 : Composants de la Sûreté de fonctionnement.....	23
Figure II.3 : Représentation du MTTF, du MDT, du MTBF et du MUT	25
Figure II.4 : Déroulement d'une analyse AMDEC	29
Figure II.5 : Exemple de découpage structurel	30
Figure II.6 : Causes d'une défaillance	32
Figure II.7 : Mécanisme Cause-Mode défaillance-Effet	33
Figure III.1 : Représente une ligne de transport électrique.....	37
Figure III.2 : Composants de la ligne de transport	38
Figure III.3 : Conducteur d'une ligne aérienne.....	39
Figure III.4 : Coupe d'un câble souterrain.....	39
Figure III.5 : Composants d'un conducteur	40
Figure III.6 : Modèle réduit de la liaison	41
Figure III.7 : Câbles de garde	42
Figure III.8 : Isolateur	42
Figure III.9 : Chaînes d'ancrage	43
Figure III.10 : Chaînes V	43
Figure III.11 : Chaîne droite	44
Figure III.12 : Eclateurs	44
Figure III.13 : Différentes parties d'un pylône	45
Figure III.14 : Pylônes nappe.....	45
Figure III.15 : Pylônes triangle	46
Figure III.16 : Pylône double drapeaux	46
Figure III.17 : Efforts appliqués	47

Figure IV.1 : Position de la ligne GHARDAIA-OUARGLA dans le réseau Algérien.....	54
Figure IV.2 : Schéma unifilaire de couplage de la ligne GHARDAIA-OUARGLA.....	54
Figure IV.3 : Pylône porteur de la ligne.....	55
Figure IV.4 : Découpage structurel d'une ligne de transport électrique	59
Figure IV.5 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions du conducteur	60
Figure IV.6 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions de pylône	60
Figure IV.7 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions d'isolateur.....	61
Figure IV.8 : Diagramme fonctionnel des éléments du conducteur.....	62
Figure IV.9 : Diagramme fonctionnel des éléments de pylône.....	62
Figure IV.10 : Diagramme fonctionnel des éléments d'isolateur	63
Figure IV.11 : Histogramme de nombres des causes	68
Figure IV.12 : Représentation de la criticité des causes	69

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Prise de décisions pour les stratégies de maintenance.....	13
Tableau I.2 : Les niveaux de maintenance	15
Tableau II.1 : Lois de probabilité.....	26
Tableau II.2 : Niveau de fréquence et leurs définitions	34
Tableau II.3 : Niveau de gravité et leurs définitions.....	34
Tableau II.4 : Niveau de probabilité de non détection et leurs définitions	34
Tableau II.5 : Niveau de criticité et leurs définitions	35
Tableau III.1 : Puissance et courant de court-circuit	41
Tableau III.2 : Vitesse du vent et pression dynamique en fonction de la hauteur.....	48
Tableau IV.1 : Etapes de l'élaboration.....	52
Tableau IV.2 : Caractéristique de la ligne 220KV GHARDAIA- OUARGLA.....	54
Tableau IV.3 : Groupe de travail.....	56
Tableau IV.4 : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et leur criticité.....	64
Tableau IV.5 : Liste décroissants des causes /modes selon leur criticité.....	67
Tableau IV.6 : Plan de maintenance préventive de la ligne GHARDAIA-OUARGLA....	70

Liste des symboles

BPF :	Bonnes Pratiques de Fabrication
AMDEC :	Analyse des modes de défaillance, leurs effets et leurs criticités
C_m :	Les coûts directs de maintenance
C_{mo} :	Coûts de maintenance de main d'œuvre
C_c :	Coûts de maintenance consommables
C_e :	Dépenses externalisées
C_i :	Coûts indirects d'indisponibilité
C_d :	Coût de défaillance
SdF :	La sûreté de fonctionnement
$R(t)$:	Fonction fiabilité
$\overline{R(t)}$:	Fonction défiabilité
$M(t)$:	Fonction maintenabilité
$\overline{M(t)}$:	Fonction l'immaintenabilité
$A(t)$:	Fonction disponibilité
$\overline{A(t)}$:	Fonction indisponibilité
MTTF :	(Mean time to failure) durée moyenne de fonctionnement avant défaillance
MTTR :	(Mean time to repair or restoration) durée moyenne de panne ou moyenne des temps pour la remise en état de fonctionnement
MTBF :	(Mean time between failures) durée moyenne entre deux défaillances
MUT :	(Mean up time) TMD temps moyen de disponibilité
MDT :	(Mean down time) TMI temps moyen d'indisponibilité,
MRT :	(Mean repair time) durée moyenne de réparation
$\lambda(t)$:	Taux de défaillance
$\mu(t)$:	Taux de réparation
AdD :	Arbre de Défaillance
IEC :	International Electrotechnical Commitee
HT :	Haute tension
THT :	Très haute tension
P_T :	La puissance circulant dans le câble
$I_{N,T}$:	Le courant circulant dans chaque phase du câble
S_{cc} :	Puissance de court-circuit

I_{cc} :	Courant de court-circuit
U :	Tension phase/phase
t_{cc} :	Courant durant le temps
$p_{\text{équ}}$:	Le poids équivalent
φ :	Angle d'inclinaison du câble
q :	La pression dynamique (en pascal).
q_b :	La pression dynamique de base
C_x :	Le coefficient de traînée du câble
p_c :	Portée critique
R.G.I.E :	Règlement Général Belge sur les Installations Electriques
$E_{\varphi\varphi}$:	L'écartement vertical entre phases
U_N :	La tension nominale
CFI :	Coefficient qui dépend de la nature du conducteur
F_{max} :	La flèche maximale
SL :	La longueur de la chaîne d'isolateur
$E_{\phi N}$:	La distance verticale minimale entre phases et terre
E_{Hmin} :	La distance horizontale minimale entre phases
E_{MAX} :	Le champ superficiel
DRD :	Déclenchement Réenclenchement Déclenchement
FP :	Fonction principale
FC :	Fonction complémentaire

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Les enjeux industriels de la maintenance

I.1 Introduction.....	4
I.2 Présentation de la maintenance	4
I.2.1 Définition de la maintenance	4
I.2.2 Evolution de la maintenance	4
I.3 Service maintenance	5
I.3.1 La fonction Maintenance	5
I.3.2 Activités de la fonction maintenance	6
I.3.3 Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise	7
I.4 Objectifs de la maintenance	8
I.5 Coûts de maintenance	8
I.5.1 Coûts directs de maintenance (C_m)	8
I.5.2 Coûts indirects d'indisponibilité (C_i).....	9
I.5.3 Coûts de défaillance.....	9
I.6 Les types de maintenance	9
I.6.1 Maintenance Corrective	10
I.6.1.1 Opérations de la maintenance corrective	10
I.6.2 Maintenance préventive	11
I.6.2.1 Maintenance préventive systématique	11
I.6.2.2 Maintenance préventive conditionnelle	11
I.6.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle	11
I.6.2.4 Opérations de la maintenance préventive	12
I.7 Autre approche de la maintenance	12
I.7.1 La maintenance améliorative	12
I.7.2 Opérations de la maintenance améliorative	13

I.8 Les stratégies et les décisions associées.....	13
I.9 Les niveaux de maintenance	14
I.10 Méthodologie de diagnostic	15
I.10.1 L'arbre de défaillance ou des causes.....	16
I.10.2 Méthode de diagramme d'ISHIKAWA ou 5M	17
I.10.3 Méthode de cause à effet.....	18
I.10.4 Méthode de PARETO ou 20-80 ou ABC	18
I.10.5 Méthode de l'AMDEC.....	18
I.11 Conclusion	19

Chapitre II : Outils de la maintenance préventive

II.1 Introduction	21
II.2 Etats et événements relatifs à un bien.....	21
II.2.1 La Sûreté de Fonctionnement des systèmes	21
II.2.2 Composants de la Sûreté de Fonctionnement.....	21
II.2.2.1 Fiabilité.....	22
II.2.2.2 Maintenabilité.....	22
II.2.2.3 Disponibilité	23
II.2.2.4 Sécurité	23
II.2.3 Métriques de la Sûreté de Fonctionnement	24
II.2.4 La défaillance	25
II.2.4.1 Taux de défaillance.....	25
II.2.4.2 Taux de réparation	26
II.2.5 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité	26
II.3 Principales méthodes et démarche de la Sûreté de fonctionnement	27
II.4 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)	27
II.4.1 Objectifs d'AMDEC.....	27
II.4.2 Types d'AMDEC.....	28

II.4.3 Démarche de la méthode AMDEC	28
II.4.3.1 Initialisation	29
II.4.3.2 Décomposition fonctionnelle et structurelle	30
II.4.3.3 Analyse des défaillances (analyse AMDEC).....	31
II.4.3.4 Calcul de la criticité	32
II.4.3.5 Synthèse.....	35
II.5 Conclusion	35

Chapitre III : Système étudié

III.1 Introduction	37
III.2 Définition du système.....	37
III.2.1 Lignes de transport HT.....	37
III.2.2 Lignes de transport THT	37
III.3 Les composants de la ligne de transport électrique.....	38
III.3.1 Les câbles électriques.....	38
III.3.1.1 Lignes aériennes.....	38
III.3.1.2 Lignes sous-terrain	39
III.3.1.3 La construction des conducteurs	39
III.3.1.4 Le modèle mathématique	40
III.3.2 Le câble de garde.....	41
III.3.3 Isolateurs	42
III.3.3.1 Les différents types des isolateurs.....	43
III.3.3.2 Eclateurs	44
III.3.4 Les pylônes.....	44
III.3.4.1 Les différents types des pylônes.....	45
III.3.4.2 Le modèle mathématique	46
III.4 Conclusion.....	50

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

IV.1 Introduction	52
IV.2 Analyse préalable nécessaire à la mise en place d'un plan de la maintenance préventive	52
IV.2.1 Etapes de l'élaboration.....	52
IV.3 Initialisation	53
IV.3.1 Définition du système à étudier	53
IV.3.2 Définition de la phase de fonctionnement.....	55
IV.3.3 Définition des objectifs à atteindre	55
IV.3.4 Constitution du groupe de travail.....	56
IV.3.5 Etablissement du planning	56
IV.3.6 Mise au point des supports de l'étude.....	56
IV.4 Décomposition fonctionnelle	59
IV.4.1 Découpage du système.....	59
IV.4.2 Identification des fonctions des sous-ensembles	59
IV.4.2.1 Fonctions de service du conducteur	60
IV.4.2.2 Fonctions de service de pylône	60
IV.4.2.3 Fonctions de service d'isolateur.....	61
IV.4.3 Identification des fonctions des éléments	61
IV.4.3.1 Fonctions des éléments du conducteur.....	61
IV.4.3.2 Fonctions des éléments de pylône.....	62
IV.4.3.3 Fonctions des éléments des isolateurs.....	63
IV.5 Analyse des défaillances (analyse AMDEC)	63
IV.6 Synthèse	67
IV.6.1 Hiérarchisation des défaillances.....	67
IV.6.2 Liste des points critiques.....	68
IV.6.3 Liste des recommandations	69
IV.6.3.1 Proposition des actions correctives	69

IV.7 Mise en place d'un plan de maintenance sur la ligne de transport électrique.....	70
IV.8 Conclusion	71
Conclusion générale	73
Références bibliographiques	
Résumé	

Introduction générale

Introduction générale

Au cours des deux dernières décennies et demie, l'industrie de l'énergie électrique partout dans le monde a entrepris une restructuration importante. Les services publics de transmission d'énergie doivent réduire les coûts d'exploitation tels que les coûts de maintenance, les coûts de réparation et les coûts d'alimentation électrique. Pendant ce temps, ils doivent maintenir la fiabilité du système, qui est un facteur critique pour le système électrique. Une stratégie de maintenance bien conçue pour les équipements de transport est nécessaire à cette fin. L'un des composants cruciaux des systèmes de transport d'énergie est constitué par les lignes aériennes sur lesquelles une maintenance périodique est couramment appliquée. Par exemple, Sonelgaz effectue des inspections de routine tous les deux ans et une maintenance détaillée tous les cinq ans. Cependant, même si cette approche est facile à planifier et se traduit par une disponibilité élevée du système, elle peut ne pas être rentable. Des techniques d'ordonnement de maintenance impliquant la surveillance d'état ont été proposées dans plusieurs travaux de recherche. Celles-ci incluent la maintenance préventive, qui maintient la fiabilité du système tout en réduisant les coûts de maintenance. La MP est pilotée par l'état réel d'une ligne aérienne, mais il ne tient pas compte de la manière dont le système est impacté par la défaillance de cette ligne.

L'objectif principal de ce projet est l'identification des principaux paramètres à surveiller qui permettent l'élaboration d'une stratégie de maintenance préventive optimale et efficace en fonction des conditions de fonctionnement des équipements. La mise en place d'un plan de maintenance préventive s'intègre dans une stratégie de maintenance retenue pour un coût global minimum, mais aussi pour répondre aux exigences décrites dans les Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF).

En utilisant la technique AMDEC « Analyse des modes de défaillance, leurs effets et leurs criticité », on met en évidence d'avance chaque problème lié à la sûreté de fonctionnement. Son but est l'identification et la prévention des problèmes pouvant être causés par les défaillances fonctionnelles des équipements et composants du système analysé. L'application de la méthode AMDEC à la ligne électrique s'avère très intéressante du fait de son aspect qui relève des données pratiques et réelles. Cela permet surtout de développer une expertise sur la conception, l'utilisation et la maintenance de tels équipements. Par l'application rigoureuse de cette technique, nous arriveront à décrire les éléments pouvant affecter la sûreté de fonctionnement du disjoncteur. Pour y arriver, plusieurs données et paramètres sont nécessaires.

Le travail consiste surtout à :

- Identifier d'avance chaque problème lié à la sûreté de fonctionnement ;
- Identifier les défaillances fonctionnelles des composants de la ligne électrique ;
- Quantifier et assigner un niveau de risque pour chaque mode de défaillance identifié ;
- Formuler, là où c'est applicable, des recommandations pour éviter, éliminer ou diminuer les niveaux de risque ;
- Identifier les options et les paramètres de surveillance de la ligne électrique ;
- Elaborer les opérations de maintenance systématiques et conditionnelles appropriées.

Ce mémoire débutera par une présentation du sujet : les nouveaux enjeux industriels de la maintenance. Puis seront développées, dans une seconde partie, les différentes étapes nécessaires à la mise en place d'un plan de maintenance préventive. Cette mise en place n'étant qu'un commencement pour atteindre une stratégie de maintenance optimale. Après avoir présenté le système étudié dans le troisième chapitre et sur la base d'une historique réel des interventions sur une ligne électrique 'la ligne GHARDIA-OURGLA' dans notre cas, nous verrons dans la dernière partie les indicateurs nécessaires pour le suivi afin d'établir un tel plan basé sur la méthode AMDEC. En terminera le mémoire par une conclusion générale résume les résultats obtenus.

Chapitre I

Les enjeux industriels de la

maintenance

I.1 Introduction

L'accrue de la technologie industrielle cause la complexité et la croissance du coût des équipements industriels, par conséquent la nécessité de réduire les temps d'indisponibilité de ces derniers, rends la maintenance très importante. Cette dernière s'appelle la maintenance industrielle qui a pour but d'assurer la disponibilité optimale des installations de production et de leurs annexes, impliquant un minimum économique de temps d'arrêt. Pendant longtemps, la fonction maintenance était en général, considérée comme une fonction dépannage et réparation d'équipements soumis à usage et vieillissement, mais elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et d'éviter les dysfonctionnements à moindre coût.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur la maintenance industrielle en parlant sur les différents paramètres de la maintenance, ces objectifs et le rôle qu'elle joue dans le domaine de l'industrie.

I.2 Présentation de la maintenance

I.2.1 Définition de la maintenance

Plusieurs définitions ont été présentées afin de donner une explication à la maintenance, de notre part, nous avons choisi ces deux définitions données par les normes NF EN 13306 X 60-319 [1] et : AFNOR (NF X 60-010) [2] respectivement :

Définition 1 : D'après la norme française, la définition de la maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [1].

Définition 2 : La maintenance industrielle est un ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Sur la base de cette définition, on peut définir les termes suivants [2] :

- *Maintenir* : Notion de « prévention » d'un système en fonctionnement.
- *Rétablir* : Notion de « correction » consécutive à une perte de fonction.
- *État spécifié ou service déterminé* : implique la prédétermination d'objectif à atteindre, avec quantification des niveaux.

I.2.2 Evolution de la maintenance

Dans un contexte de concurrence économique à l'échelle planétaire, la gestion de la maintenance est loin d'être stabilisée dans un environnement où l'automatisation et le processus de fabrication deviennent de plus en plus complexes. Depuis les années 1940, l'évolution de la maintenance peut être tracée à travers trois générations (figure I.1) :

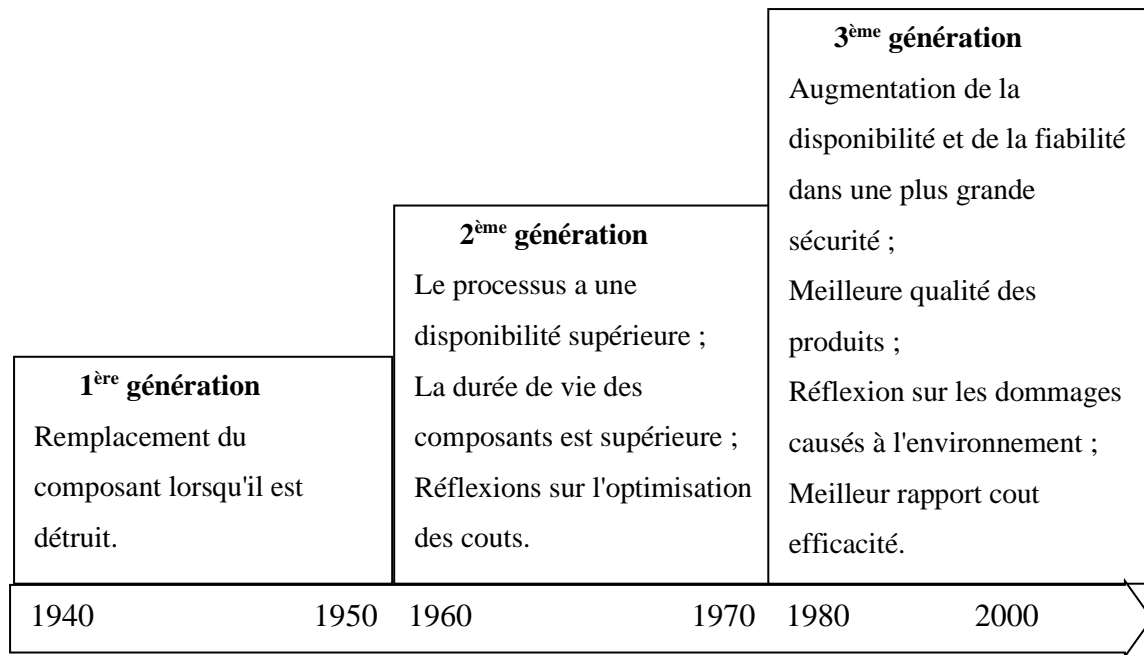


Figure I.1 : Evolution de la maintenance depuis 1940 [3]

A partir de la figure ci-dessus, on peut constater trois phases principales à l'évolution de la maintenance :

De 1940 à 1950 : 1^{ère} génération, dans cette génération, la maintenance s'est limitée au remplacement du composant lorsqu'il est défaillant.

De 1950 à 1980 : 2^{ème} génération, la maintenance est évoluée de tel sorte que le processus et la durée de vie d'un composant à une importance avec un coût optimal.

De 1980 à 2000 : 3^{ème} génération, La maintenance industrielle a un concept plus large qui inclut non seulement la disponibilité et le coût mais aussi assure la fiabilité du composant avec un meilleur rapport qualité/prix.

I.3 Service maintenance

I.3.1 La fonction Maintenance

L'entreprise est un organisme économique composé de plusieurs fonctions, parmi ces fonctions on trouve « *la fonction maintenance* ». Cette dernière est également composée des sous-fonctions lesquelles [8] :

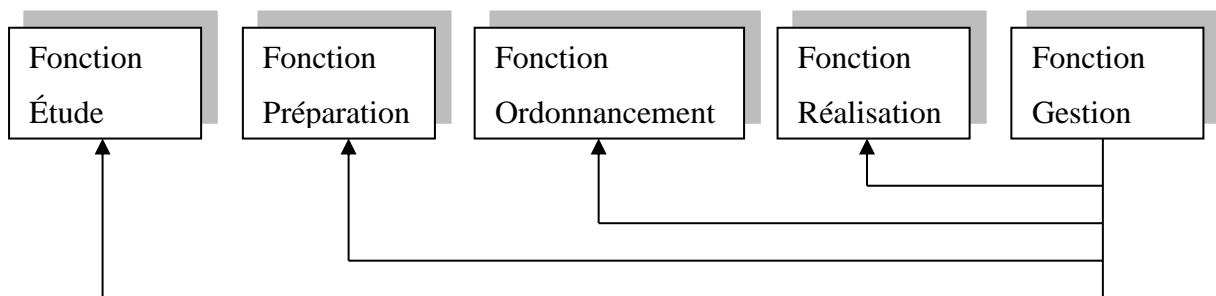


Figure I.2 : Les fonctions de maintenance

I.3.1.1 Etude

Sa mission principale est l'analyse du travail à réaliser en fonction de la politique de maintenance choisie. Elle implique la mise en œuvre d'un plan de maintenance avec des objectifs chiffrés et des indicateurs mesurables.

I.3.1.2 Préparation

La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne réalisation d'une intervention de maintenance seront ainsi prévues définies et caractérisées. Une telle préparation devra bien sûr s'inscrire dans le respect des objectifs généraux tels qu'ils sont définis par la politique de maintenance : coût, délai, qualité, sécurité, etc...

I.3.1.3 Ordonnancement

L'ordonnancement représente la fonction "chef d'orchestre". Dans un service maintenance caractérisé par l'extrême variété des tâches en nature, en durée, en urgence et en criticité, l'absence de chef d'orchestre débouche vite sur la cacophonie quel que soit le brio des solistes.

I.3.1.4 Réalisation

La réalisation consiste à mettre en œuvre les moyens définis dans le dossier de préparation dans les règles de l'art, pour atteindre les résultats attendus dans les délais préconisés par l'ordonnancement.

I.3.1.5 Gestion

La fonction gestion du service maintenance devra être capable d'assurer la gestion des équipements, la gestion des interventions, la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines et la gestion du budget.

I.3.2 Activités de la fonction maintenance

La fonction maintenance peut être présentée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion. Ces différentes activités sont représentées dans la figure I.3 [6] :

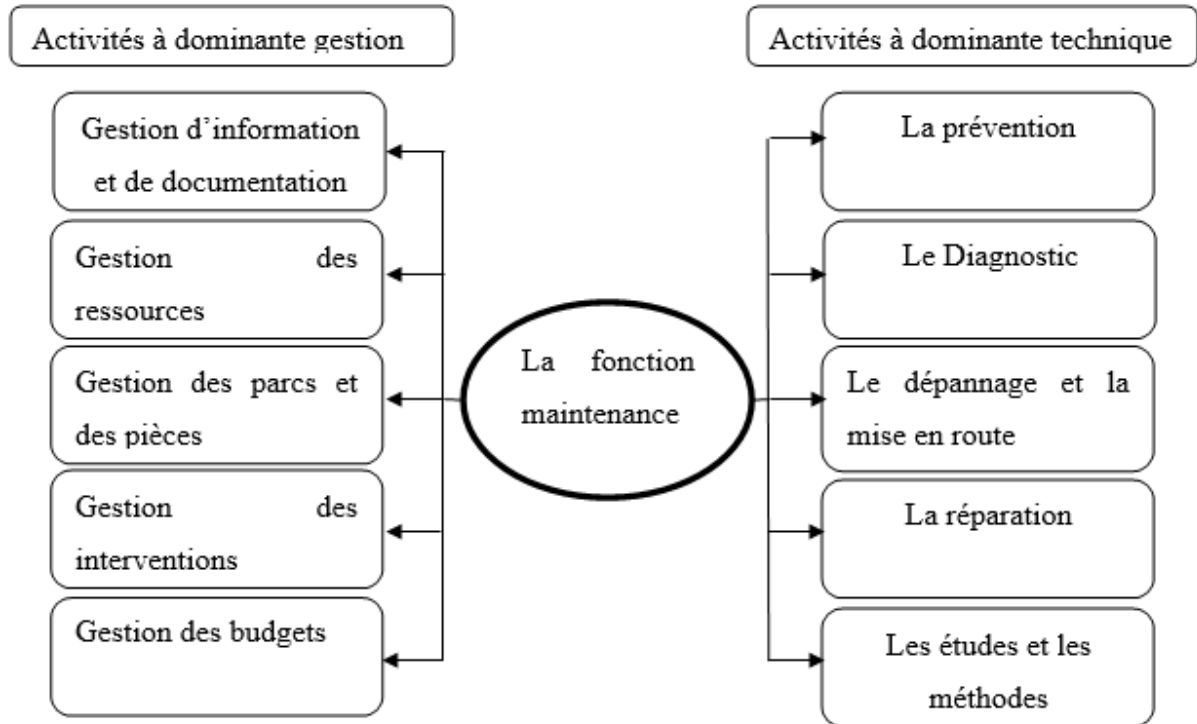


Figure I.3 : Activités de la fonction de maintenance [6]

I.3.3 Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise

Dans une entreprise industrielle, la fonction maintenance possède des interfaces de liaison avec toutes les autres fonctions qui composent l'entreprise [7].

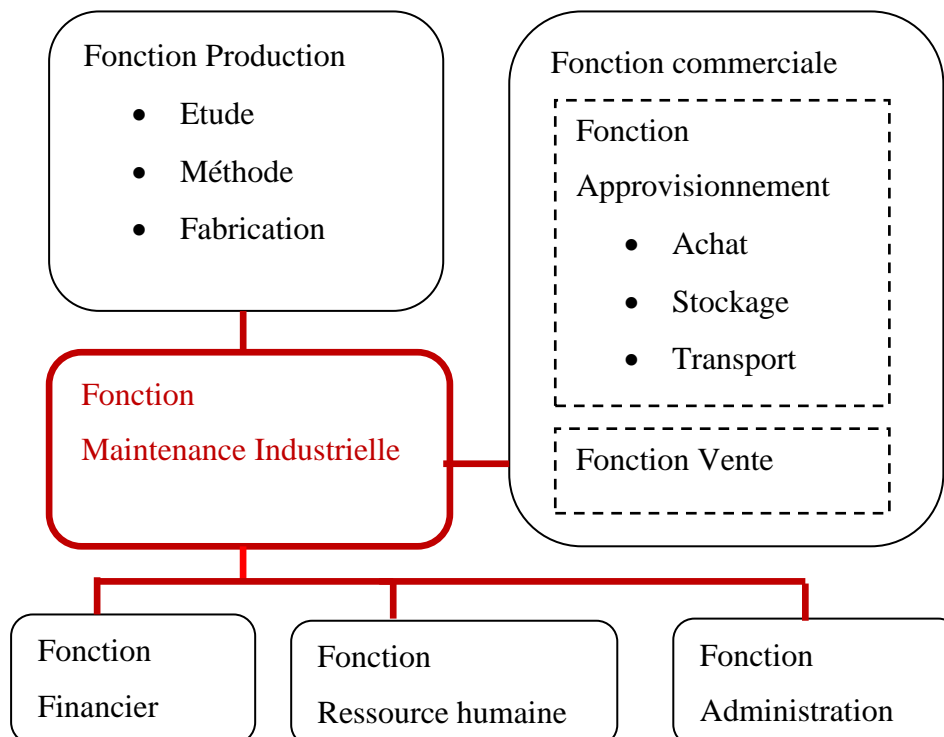


Figure I.4 : Mise en situation de la fonction maintenance dans une entreprise [7]

I.4 Objectifs de la maintenance

La mission principale de la fonction maintenance est le maintien par des actions préventives et correctives de la disponibilité de l'outil de production ; c'est-à-dire de son aptitude à accomplir une fonction requise [5]. Les objectifs de la maintenance, schématisés dans la (figure I.5), sont nombreux [6] :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués, tout en respectant les délais ;
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes) ;
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail ;
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité)

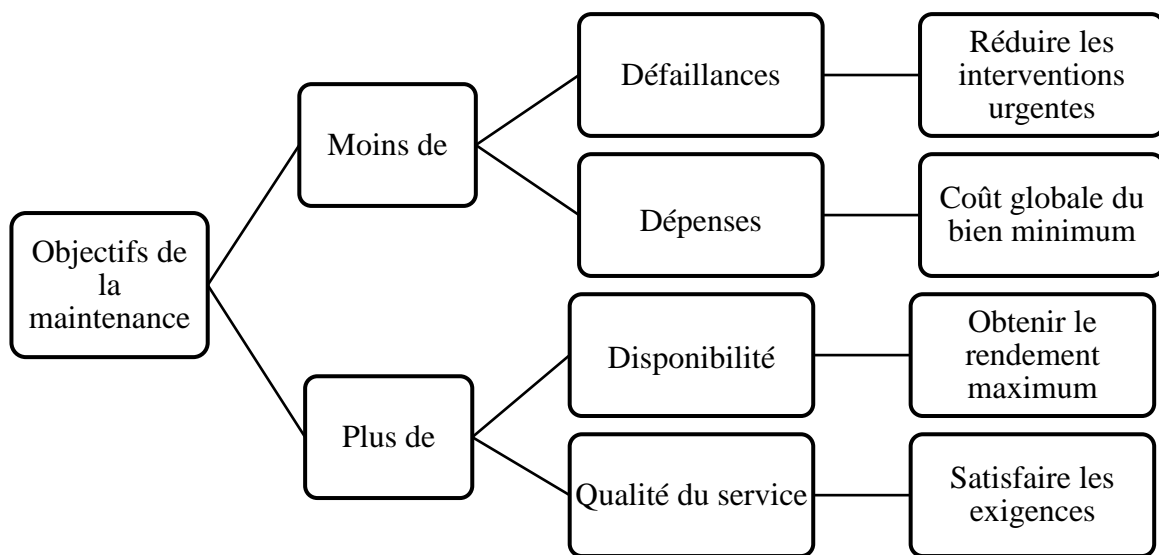


Figure I.5 : Schématisation des objectifs de la maintenance [6]

I.5 Coûts de maintenance

Les conséquences d'une maintenance insuffisamment performante peuvent être particulièrement importantes dans le fonctionnement d'une entreprise. Donc il faut bien maîtriser la maintenance afin de réduire au maximum les coûts de production [8]. Les coûts de maintenance représentent l'ensemble des dépenses engagées pour maintenir en état de fonctionnement d'un système complexe. La décomposition des coûts de maintenance est comme de suite :

I.5.1 Coûts directs de maintenance (C_m)

Concernant les interventions correctives, préventives ou externalisés, on peut les déterminer par la relation suivante [8] :

$$C_m = C_{m0} + C_f + C_c + C_e \quad (1.1)$$

Avec :

- C_{mo} : dépenses de main d'œuvre ;
- C_f : dépenses fixes du service maintenance (salaires, loyers, assurances, éclairage, reprographie, ...)
- C_c : dépenses de consommables (coûts des pièces, frais de transport, de stockage, ...)
- C_e : dépenses externalisées (c'est la facture du prestataire de service).

I.5.2 Coûts indirects d'indisponibilité (C_i)

Ce sont les conséquences induites par un arrêt propre d'un équipement, parfois nommés coûts de perte de production. Les coûts d'indisponibilité prennent en compte [8] :

- Les coûts de pertes de production incluant les coûts de non-production, la non-qualité de production provoquée par la défaillance des équipements productifs ;
- Le surcoût de production (personnel, coûts des moyens de remplacement mis en œuvre, stock supplémentaire des pièces en attente en cas de défaillance) ;
- Le manque à gagner de production (mévente et baisse du chiffre d'affaires) ;
- Les pénalités commerciales et les conséquences sur l'image de marque de l'entreprise.

I.5.3 Coûts de défaillance

Il peut être déterminé par le modèle suivant [8] :

$$C_d = C_m + C_i \quad (1.2)$$

Avec :

C_d : coût de défaillance d'un équipement ;

C_m : coût direct de maintenance (pièces et main d'œuvre) ;

C_i : coût indirect d'indisponibilité.

I.6 Les types de maintenance

Généralement, la maintenance est divisée en deux types :

- La maintenance corrective ;
- La maintenance préventive.

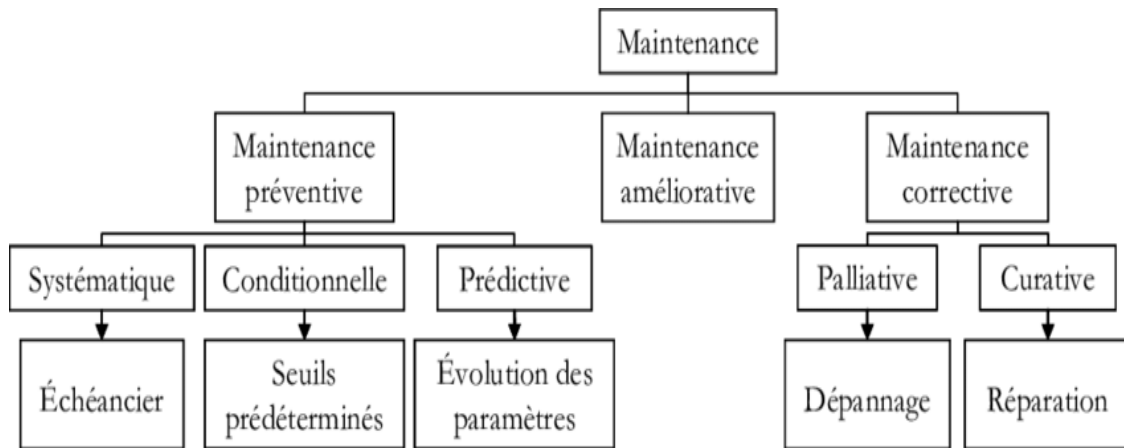


Figure I.6 : Les types de maintenance

I.6.1 Maintenance Corrective

La norme AFNOR X 60-010 définit la maintenance corrective comme une maintenance effectuée après défaillance. La maintenance corrective regroupe les opérations visant à remettre en service un service ou un système défaillant. Or une défaillance ne se produit jamais hors sollicitation du système. Le but de ces opérations est donc permettre une reprise de la production dans les meilleurs délais [4]. On distingue deux types de maintenance corrective :

- **Maintenance palliative** : qui est basé sur l'opération de dépannage, parce que la défaillance est partielle.
- **Maintenance curative** : qui est basé sur l'opération de réparation parce que la défaillance est totale.

I.6.1.1 Opérations de la maintenance corrective

Après l'apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) [3] :

1. **Test** c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence ;
2. **Détection** ou action de déceler l'apparition d'une défaillance ;
3. **Localisation** ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
4. **Diagnostic** ou identification et analyse des causes de la défaillance ;
5. **Dépannage, réparation** ou remise en état (avec ou sans modification) ;
6. **Contrôle** du bon fonctionnement après intervention ;
7. **Amélioration éventuelle** c'est à dire éviter la réapparition de la panne ;
8. **Historique** ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

I.6.2 Maintenance préventive

D'après un extrait de la norme NF EN 13306 X 60-319, la maintenance préventive c'est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien [2].

Une opération de maintenance préventive est donc une intervention prévue, préparée et programmée en fonction de différent paramètre en vue d'éviter l'apparition probable d'une défaillance identifiée [9].

On distingue là trois types de maintenance :

- Maintenance préventive systématique ;
- Maintenance préventive conditionnelle ;
- Maintenance préventive prévisionnelle.

I.6.2.1 Maintenance préventive systématique

Selon la Norme NF : X 60-010, c'est une maintenance effectuée selon un échancier établi en fonction du temps et du nombre d'unités. Elle vise à minimiser les arrêts par les opérations planifiées de remplacement, de réglage et de contrôle avant l'apparition d'une panne catalectique.

Par cette politique, on arrive à réduire le nombre de défaillance catalectique (et donc de leur coût) et à améliorer la disponibilité de l'équipement, sa sécurité et sa durée de vie [10].

I.6.2.2 Maintenance préventive conditionnelle

Cette maintenance est basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découle [2].

Les paramètres significatifs de la dégradation peuvent être soit des mesures de caractéristiques physiques du système (épaisseur d'un matériau, degré d'érosion, température, pression, etc.), soit des informations sur la durée de vie résiduelle (on parle alors de maintenance prédictive). La planification des interventions repose sur l'existence et la détermination des seuils critiques pour ces paramètres de dégradation. On parle alors de seuil de décision [1].

I.6.2.3 Maintenance préventive prévisionnelle

C'est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien [11]. Improprement appelée « *maintenance prédictive* », la maintenance prévisionnelle est une approche relativement récente qui repose, comme la maintenance conditionnelle, sur plutôt que le simple franchissement des seuils prédéterminés. Ainsi, par une surveillance dictée par la

progression d'une dégradation. Il est possible de mieux planifier ou retarder des interventions. La maintenance prévisionnelle est particulièrement adaptée aux dégradations progressives dont on ignore les seuils [4].

I.6.2.4 Opérations de la maintenance préventive

Les opérations munies par ce type de maintenance sont [3] :

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).
- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.
- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau 4.

I.7 Autre approche de la maintenance

I.7.1 La maintenance améliorative

L'amélioration des biens d'équipements qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration. Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences

d'interventions ; l'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance), l'augmentation de la sécurité du personnel et autres [2].

I.7.2 Opérations de la maintenance améliorative

La rénovation : Inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes.

La reconstruction : Remise en état défini par le cahier de charge initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes.

La modernisation : Remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien [2].

I.8 Les stratégies et les décisions associées

Les stratégies de maintenance permettent de définir des règles de décision et de déterminer le contexte informationnel qui détermine un espace de décision de maintenance [11] :

- **Pourquoi ?** pour savoir la raison d'être d'une action de maintenance ;
- **Quand ?** pour savoir le moment de réaliser l'action de maintenance ;
- **Quoi ?** pour savoir la nature de cette action de maintenance ;
- **Où ?** pour localiser l'équipement objet de cette action de maintenance ;
- **Comment ?** pour savoir la façon de l'action de la maintenance ;
- **Combien de temps ?** pour savoir la durée de cette action de maintenance.

Le tableau I.1 ci-dessous, représente-la récapitule des stratégies des différents types de maintenance cité ci-dessous :

Tableau I.1 : Prise de décisions pour les stratégies de maintenance [11]

	Pourquoi	Quand	Où	Quoi
Maintenance Corrective	Corriger une défaillance	Après le constat de la défaillance	Composant défaillant (résultat de diagnostic)	Dépannage ou réparation
Maintenance préventive	Eviter une défaillance	Avant la défaillance qui est déterminée	Composant associé à un indicateur ou	Défini par le plan de

		par le franchissement d'un seuil représentatif de la défaillance par un indicateur	résultat d'un diagnostic	maintenance ou par l'expert
Maintenance systématique	Eviter une défaillance	Un indicateur d'usage atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur d'usage	Défini par le plan de maintenance
Maintenance conditionnelle	Eviter une défaillance en optimisant le risque d'action superflue	Un indicateur surveillé atteint un seuil représentatif d'un niveau de dégradation	Composant associé à l'indicateur surveillé ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance
Maintenance prévisionnelle	Eviter une défaillance en agissant au meilleur moment vis-à-vis de la dégradation et des performances du composant ou système	Un indicateur prédit de dégradation atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur prédit au résultat d'un diagnostic	Issue d'un processus d'aide à la décision rationalisant les performances du composant ou système

I.9 Les niveaux de maintenance

La norme AFNOR X 60-000 proposait une classification des actions de maintenance en cinq niveaux de complexité selon le tableau suivant [12] :

Tableau I.2 : Les niveaux de maintenance [12]

Les niveaux	Les actions de maintenance selon la norme AFNOR standard	Définitions simplifiées
Niveau 1	<ul style="list-style-type: none"> -Discours par simple réglage, assuré par le constructeur -Remplacement des consommables -Echange du matériel accessible en toute sécurité -Récupération modeste (peinture) 	L'action est effectuée sur l'équipement
Niveau 2	<ul style="list-style-type: none"> - Dépannage par échange standard - Vérification du bon fonctionnement - Intervention pour maintenance préventive mineure 	
Niveau 3	<ul style="list-style-type: none"> - Intervention hors équipement réalisée dans l'atelier habituel Identification et diagnostic des pannes - Réparation par échange de composants fonctionnels - Réparation mécanique mineure - Programmation d'éléments simples 	L'action est en cours à l'extérieur de l'équipement
Niveau 4	<ul style="list-style-type: none"> - Discours par type spécialisé - Réglage d'instruments de mesure - Vérification de normes - Travaux importants de maintenance corrective ou préventive 	
Niveau 5	<ul style="list-style-type: none"> -Rénovation importante ou reconstruction - Retour en usine ou en atelier central pour maintenance - Intervention de gros entretien Remise à neuf 	Intervention de grande maintenance

I.10 Méthodologie de diagnostic

Après avoir rappelé les différentes problématiques liées aux enjeux de la maintenance industrielle et défini les différents types de maintenance, cette partie montre les bénéfices d'une stratégie de maintenance pour maintenir le niveau de sécurité et réduire les temps d'arrêt et les coûts de maintenance. Il s'avère que l'analyse par retour d'expérience des pannes et dégradations, des données de surveillance et d'inspection est essentielle. En effet, cette analyse permettra dans un premier temps de diagnostiquer l'état du système étudié, puis de faire un pronostic sur son comportement futur, nous citons donc quelques méthodes utilisées actuellement pour résoudre ce problème. Ces derniers s'appuient principalement sur les connaissances disponibles issues du retour d'expérience (données historiques, données mesurées), de l'expertise et de la fiabilité ou des modèles de comportement physique. Enfin, il convient de noter que ces méthodes font l'objet de nombreux travaux de recherche.

I.10.1 L'arbre de défaillance ou des causes

L'arbre de défaillance est un outil de recensement de toutes les causes et défauts entraînant l'apparition d'un événement indésirable. Il a pour objectif d'analyser et réduire les risques. Pour chaque défaillance potentielle, l'arbre de défaillance est construit comme suit [5]:

1. Rechercher les causes immédiates provoquant directement l'événement indésirable ;
2. Classer les événements intermédiaires en trois classes (événements de base, défauts de conception et défauts de système) ;
3. Analyser les défauts des composants : chercher la défaillance première puis la défaillance seconde ;
4. Répéter la méthode précédente jusqu'à obtention des événements d'origine.

Le modèle montre graphiquement comment un événement peut trouver son origine dans des faits très éloignés géographiquement et temporellement [10]. Les composants graphiques permettent d'indiquer certaine information sur les événements eux-mêmes et sur les limites de l'arbre [4].

a) Les événements de base

Un événement de base est situé à l'origine d'une branche de l'arbre et il n'est pas développé. Deux événements de base au minimum produisent, avec un opérateur logique et un événement intermédiaire.

b) Les événements intermédiaires

Un événement intermédiaire est le résultat d'au moins deux autres événements de base ou intermédiaire(s) reliés par un opérateur logique.

c) Les événements indésirables

Un événement indésirable se produit lorsqu'un système (ou une organisation) ne remplit pas une de ses fonctions externes, internes ou globale.

d) Les opérateurs logiques

Les opérateurs logiques sont à considérer comme des portes permettant les liaisons conditionnelles entre événements [13].

- **Porte logique OU** : la perte de fonction est liée à l'apparition d'un seul événement de base.
- **Porte logique ET** : la perte de fonction est liée à l'apparition de tous les événements de base rattachés à cette porte.

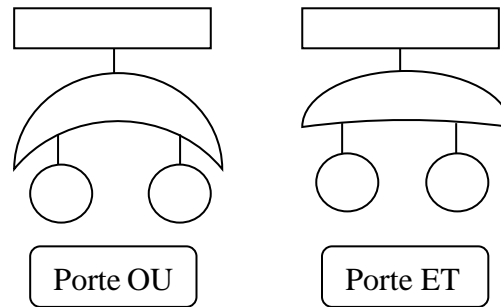


Figure I.7 : Portes OU & ET

e) Symboles utilisés [13]

○	: Événement de base résultant d'une défaillance possible ; il est à l'entrée d'une porte logique.
□	: Événement induit, il est la conséquence de plusieurs événements de base, il est à la sortie d'une porte logique.
◇	: Événement neutre sans conséquence pour le calcul de la fiabilité prévisionnelle.

I.10.2 Méthode de diagramme d'ISHIKAWA ou 5M

Le diagramme d'Ishikawa est un outil graphique qui permet d'identifier les causes possibles d'un effet constaté et donc de déterminer les moyens pour y remédier. Cet outil se présente sous la forme d'arêtes de poisson classant les catégories de causes inventoriées et ainsi on peut déterminer les moyens à mettre en œuvre pour remédier au problème [10].

Il est utilisé comme un outil de la qualité puisqu'il offre la possibilité d'une réflexion de groupe pour la résolution d'un problème. Il peut également être utilisé comme un outil d'aide au diagnostic [13].

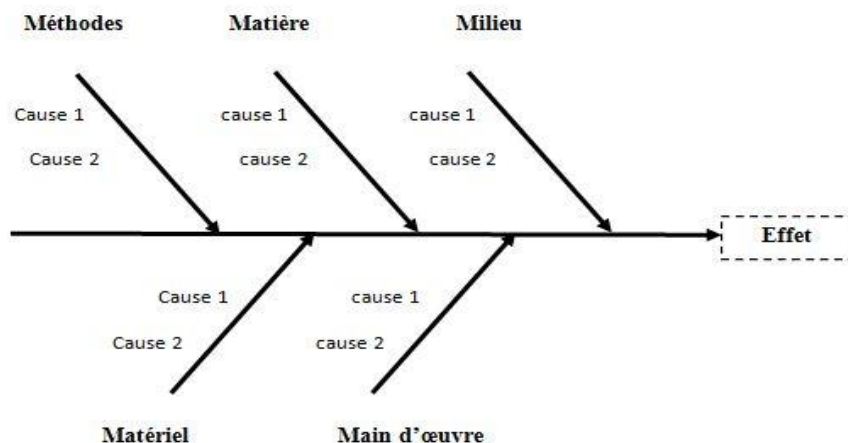


Figure I.8 : Diagramme d'Ishikawa

I.10.3 Méthode de cause à effet

C'est une méthode de diagnostic est bien adaptée quand les causes possibles sont peu nombreuses [10]. Il se présente sous la forme d'un tableau à deux entrées : les effets sont des événements constatables liés au fonctionnement et les causes les faits à partir desquels se produit où se manifeste l'effet. Il est préférable, en maintenance, d'agir sur la cause plutôt que sur l'effet [13].

I.10.4 Méthode de PARETO ou 20-80 ou ABC

Un économiste Italien, *Wilfred PARETO*, en étudiant la répartition des impôts a constaté que 20% des contribuables payaient 80% de la recette de ces impôts. D'autres répartitions analogues ont pu être constatées, ce qui a permis d'en tirer la loi des 20-80 ou loi de PARETO. Cette loi peut s'appliquer à beaucoup de problèmes, c'est un outil efficace pour le choix et l'aide à la décision.

La méthode ABC, issue de la loi de PARETO, est simple à appliquer et la courbe facile à tracer pour autant que l'on suive de la méthodologie.

L'allure de courbe permet de définir trois zones appelées respectivement zones A, B et C d'où le nom de la méthode dont il faut :

- a) Déterminer le cadre de l'étude ;
- b) Déterminer les critères représentatifs ;
- c) Déterminer la période la plus représentative ;
- d) Etablir le tableau de classement ;
- e) Traçage de la courbe.

En général la courbe possède deux cassures, ce qui permet de définir trois zones [13] :

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

I.10.5 Méthode de l'AMDEC

Le mot **AMDEC** signifie l'**A**nalyse des **M**odes de **D**éfaillances de leurs **E**ffets et de leur **C**riticité, l'AMDEC est un outil d'analyse de tous types de systèmes quels qu'ils soient, complexes ou non, et qui s'intéresse à la manière dont un constituant peut être le siège d'une dérive (le mode de défaillance), de la conséquence de celle-ci (les effets) et de son importance qualitativement chiffrée (la criticité) [4].

I.11 Conclusion

Le domaine de la maintenance représente actuellement une discipline plus intéressante et inévitable pour les entreprises manufacturières. De ce fait nous avons fait une étude bibliographique sur les notions de base liées à la maintenance, à savoir ces différents types qui existent actuellement ainsi que les différentes activités, stratégies et techniques utilisées, du quelle nous avons découverts qu'il existe actuellement de nombreux modèles qui illustrent les différentes hypothèses posées sur l'équipement, son mode de défaillance, de dégradation, les exigences et les objectifs de la maintenance.

D'une façon générale, ce chapitre souligne l'impact de la maintenance sur les performances d'un système en termes de disponibilité, de sûreté et de coûts, garantissant un niveau tolérable de fiabilité, Ce qui a contribué à améliorer le domaine industriel et sa productivité à notre époque.

Chapitre II

Outils de la Maintenance

Préventive

II.1 Introduction

La sûreté de fonctionnement est un domaine d'activité qui propose des moyens pour augmenter la fiabilité et la sûreté des systèmes dans des délais et avec des coûts raisonnables. Pour atteindre cet objectif, des méthodes d'analyse doit être bien maîtrisées et utilisées par le service de maintenance dans l'entreprise. Il y a plusieurs méthodes d'analyse des défaillances telle que : Le diagramme de Pareto, la méthode Ishikawa, l'arbre de défaillance et la méthode AMDEC.

Dans ce chapitre, deux parties seront abordées, la première décrit la notion de la sûreté de fonctionnement, qui devenue un enjeu crucial dans le domaine industriel [14]. Dans la deuxième partie de ce chapitre la méthode AMDEC choisi dans notre cas d'étude en vue d'établir un plan de maintenance préventive d'une ligne aérienne sera exposée en détaille.

II.2 Etats et événements relatifs à un bien

Appelons sûreté de fonctionnement, la validation de la fiabilité des composants mécaniques et leur maintenabilité ce qui assure la disponibilité de la machine ou l'objet, tous sa montrent des préoccupations importantes sur le plan économique des entreprises.

II.2.1 La Sûreté de Fonctionnement des systèmes

La sûreté de fonctionnement (SdF) est une notion générale qui se caractérisée comme la science des défaillances, l'analyse de risque, ou bien fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité [14].

Elle englobe la connaissance des défaillances, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise et se déterminée à la fois par les études structurelles statiques et dynamiques des systèmes, non seulement du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental, en tenant compte des aspects probabilistes et des conséquences induites par les défaillances techniques et humaines [14].

La Sûreté de Fonctionnement est basée sur :

- Des méthodes et des outils servant à caractériser et à maîtriser les effets des aléas, des pannes et des erreurs.
- La quantification des caractéristiques de composants et de systèmes pour exprimer la conformité dans le temps de leurs comportements et de leurs actions [14].

II.2.2 Composants de la Sûreté de Fonctionnement

Quand on parle de la sûreté de fonctionnement d'un bien, il faut exploiter les points suivants :

II.2.2.1 Fiabilité

Selon la norme "NF X 60-500", on définit la fiabilité d'une entité "E" comme son "aptitude à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné" [15].

En terme probabiliste, la fiabilité d'une entité E est tel que :

$$R(t) = P(E \text{ non défaillante sur } [0, t]) \quad (2.1)$$

L'aptitude contraire de la fiabilité est la dé-fiabilité dont l'expression probabiliste à l'instant t est la suivante :

$$\overline{R}(t) = 1 - R(t) \quad (2.2)$$

Dans ce contexte, deux types de fiabilité existent [15]:

- **La fiabilité intrinsèque** : qui est propre à un matériel, selon un environnement donné ; elle ne dépend que de la qualité de ce matériel.
- **La fiabilité extrinsèque** : qui résulte des conditions d'exploitation et de la qualité de la maintenance ; elle est relative à l'intervention humaine

La fiabilité est une fonction décroissante du temps (voir figure II.1), de telle manière que lorsque $t_2 > t_1$ nous avons donc $R(t_1) > R(t_2)$.

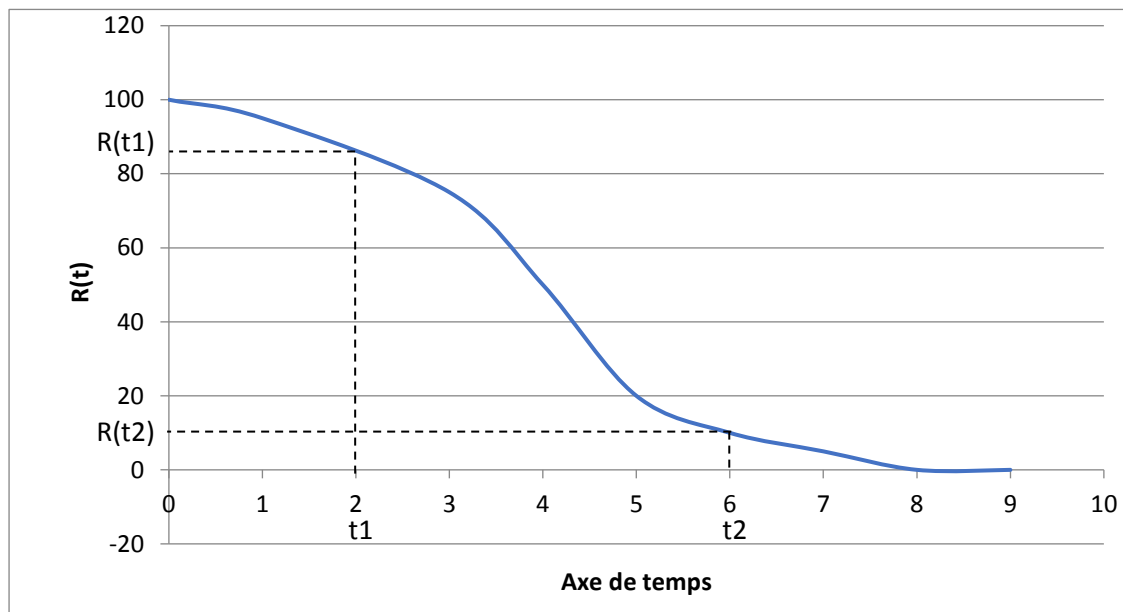


Figure II.1 : Courbe de la fiabilité [14]

II.2.2.2 Maintenabilité

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie sur un intervalle de temps donné dans un état dans lequel, elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits [16].

La maintenabilité est caractérisée par une probabilité $M(t)$, que la maintenance d'une entité "E" accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que E est défaillante au temps $t = 0$;

$$M(t) = P(\text{la maintenance de E est achevée au temps } t) \quad (2.3)$$

$$M(t) = 1 - P(\text{E non réparée sur } [0, t]) \quad (2.4)$$

L'immanabilité correspond à la probabilité contraire, soit :

$$\overline{M}(t) = 1 - M(t) \quad (2.5)$$

II.2.2.3 Disponibilité

« Aptitude à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soient assurées », s'appelle disponibilité, ce qui définit par la norme X 60-500.

En terme probabiliste elle est définie en général comme suit à un instant t :

$$A(t) = P(\text{E non défaillant à l'instant } t) \quad (2.6)$$

L'aptitude contraire de la disponibilité est l'indisponibilité qui définit par :

$$\overline{A}(t) = 1 - A(t) \quad (2.7)$$

La disponibilité d'une entité est en général une fonction non croissante du temps t et donc, l'indisponibilité est une fonction non décroissante du temps t [15].

II.2.2.4 Sécurité

La sécurité restant un terme très général, il n'existe pas actuellement de consensus pour une normalisation. La définition de la probabilité associée reste donc dépendante des approches. Une définition est donnée par la référence "AFNOR 88" comme :

L'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [16].

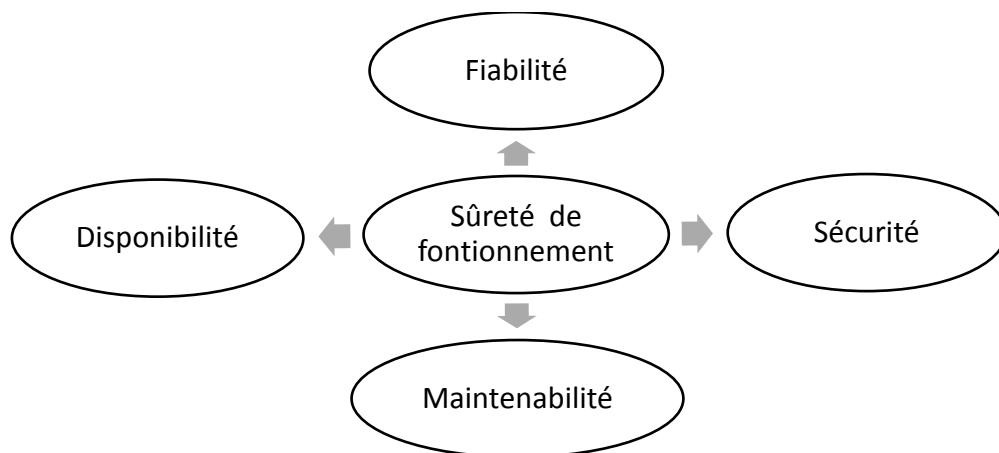


Figure II.2 : Composants de la sûreté de fonctionnement

II.2.3 Métriques de la Sûreté de Fonctionnement

Les différents temps caractérisant la SdF se définissent en fonction de leur état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance, entre défaillance et réparation, etc...

Ces temps dépendent des probabilités d'occurrences des divers événements comme les défaillances et les réparations des composants. Ce sont des variables aléatoires que l'on cherche à caractériser par leurs espérances mathématiques [17].

- **MTTF** (mean time to failure)

C'est la durée moyenne de fonctionnement avant défaillance, espérance mathématique de la durée de fonctionnement avant défaillance. La définition du MTTF est :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (2.8)$$

- **MTTR** (mean time to repair or restoration)

Durée moyenne de panne ou moyenne des temps pour la remise en état de fonctionnement, espérance mathématique de la durée de panne. *MTTR_{rep}* est associé à la réparation du composant et *MTTR_{res}* à sa restauration. La différence entre les deux est liée au fait que l'on considère ou non le temps mis pour remettre en service l'équipement, le *MTTR_{res}* l'incluant.

Le **MTTR** s'obtient par la relation suivante :

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t))dt \quad (2.9)$$

- **MTBF** (mean time between failures)

La durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparée.

$$MTBF = MUT + MDT \quad (2.10)$$

- **MUT** (mean up time) ou TMD

Temps moyen de disponibilité, espérance mathématique de la durée de disponibilité.

- **MDT** (mean down time) ou TMI

Temps moyen d'indisponibilité, espérance mathématique de la durée d'indisponibilité.

- **MRT** (mean repair time)

Durée moyenne de réparation, espérance mathématique de la durée du temps de réparation.

Les métriques de la sûreté de fonctionnement sont décomposées en plusieurs phases lesquelles sont montrées par la figure II.3 [17].

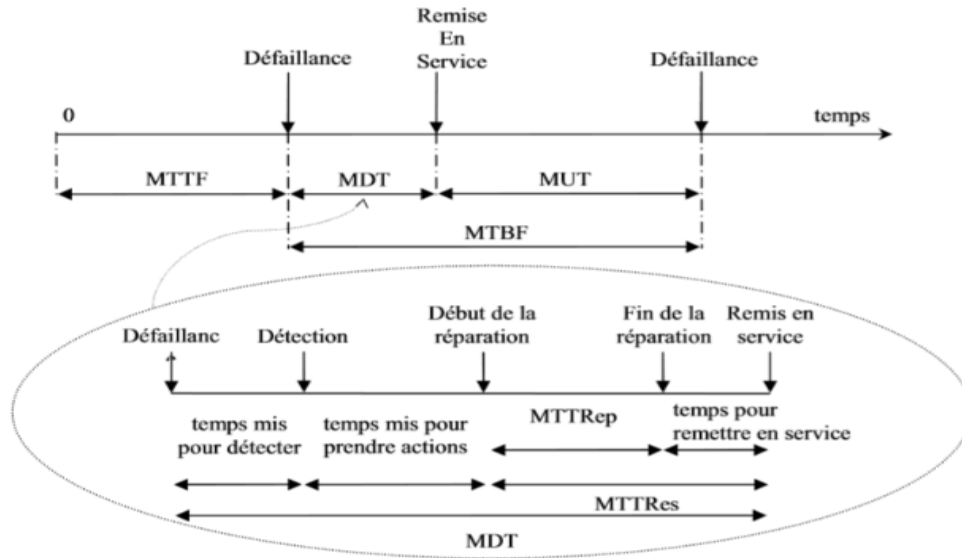


Figure II.3 : Représentation du MTTF, du MDT, du MTBF et du MUT [17]

II.2.4 La défaillance

« Altération ou cessation d'un bien à accomplir une fonction requise » [4]. Après une défaillance le bien est en panne, totale ou partielle.

Panne : Etat d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures [18].

Une défaillance est un évènement à distinguer d'une panne qui est un état. On peut distinguer plusieurs familles de défaillances [18] :

- **Défaillance soudaine** : qui ne peut être prévue ;
- **Défaillance par usure** : due à l'augmentation de la durée d'utilisation ;
- **Défaillance par vieillissement** : apparaissent au cours de temps ;
- **Défaillance due à une cause commune** : plusieurs biens sont défaillants par la même cause ;
- **Défaillance primaire** : défaillance qui ne dépend pas d'une autre défaillance ;
- **Défaillance secondaire** : défaillance qui dépend d'une autre défaillance ;
- **Défaillance Précoce** : défaillances dont le taux décroît dans le temps ;
- **Défaillance aléatoire** : défaillances dont le taux est constant dans le temps.

II.2.4.1 Taux de défaillance

Pour un ensemble de système, le taux de défaillance représente une proportion ramenée à l'unité de temps d'éléments qui ayant survécu à un instant arbitraire " t ", ne sont plus en vie à l'instant " $t + dt$ ".

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ s'exprime en 'pannes/heurs'. En quelque sorte, il quantifie la rapidité de survenue des pannes, sa forme générale est [4] :

$$\text{taux de défaillance} = \frac{\text{Nombre de défaillances}}{\text{durée d'usage}} \quad (2.11)$$

Le taux moyen de défaillance s'obtient également par la relation [4] :

$$\lambda(t) = \frac{1}{MTBF} \quad (2.12)$$

II.2.4.2 Taux de réparation

C'est un indicateur de l'aptitude d'un bien à être dépanné et/ou réparé et de l'efficacité de la maintenance. La norme "AFNOR" lui a donné la définition suivante :

« Dans des conditions données d'utilisation, aptitude d'un dispositif à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir sa fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données avec des procédures et des moyens prescrits. »

Le taux de réparation $\mu(t)$ s'obtient par la relation [4].

$$\mu(t) = \frac{1}{MTTR} \quad (2.13)$$

II.2.5 Principales lois de probabilité utilisées en fiabilité

Le tableau II.1, représente les lois de probabilité discrète ou continue, les plus utilisées en fiabilité et maintenabilité [14].

Tableau II.1 : Lois de probabilité [14]

Type de variable aléatoire	Nom de loi	Application
Discrète	Loi binomiale	Défaillance à la sollicitation
	Loi de Poisson	Défaillance à la sollicitation, lorsque le nombre d'expériences est élevé et quand l'espérance mathématique de la variable aléatoire est constante
Continue	Loi de Weibull	Taux de défaillance décroissant, croissant ou constant
	Loi exponentielle	Taux de défaillance constant

II.3 Principales méthodes et démarche de la Sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement est une discipline qui s'appuie sur un support méthodologique applicable aux systèmes technologiques tout au long de leur cycle de vie : Expression du besoin, conception, industrialisation, production, utilisation, diffusion, maintenance, voire même retrait de service.

Ces démarches bénéficient du support de méthodologies rigoureuses et d'outils pratiques et puissants. Les méthodes de la sûreté de fonctionnement ont toutes au moins trois points communs, qui peuvent être résumés en trois types d'action :

- Identifier les processus pouvant affecter la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité ou la sécurité ;
- Modéliser ces différents processus afin de faciliter la compréhension des mécanismes semis en jeu ;
- Valoriser les résultats des analyses en utilisant les modèles obtenus pour apprécier le niveau de sûreté de fonctionnement du système étudié, en relever les éventuelles insuffisances par rapport aux objectifs de performances poursuivis, en hiérarchiser les points forts et les points faibles.

Parmi les méthodes utilisées on peut citer : l'Arbre de Défaillance (AdD), Diagramme d'ISHIKAWA et l'Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs Criticité (AMDEC).

Dans notre projet de fin d'étude on s'intéresse par ce dernier puisque c'est l'outil le plus souvent utilisé dans les études de fiabilité des équipements industriels [14].

II.4 Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

L'AMDEC comme outil d'analyse est très largement utilisé à diverses étapes des cycles de développement en sécurité fonctionnelle, l'association française de normalisation (AFNOR) définit l'AMDEC comme étant : « une méthode inductive qui permet de réaliser une analyse qualitative et quantitative de la fiabilité ou de la sécurité d'un système ». La méthode consiste à examiner méthodiquement les défaillances potentielles des systèmes (analyse des modes de défaillance), leurs causes et leurs conséquences sur le fonctionnement de l'ensemble (les effets). Après une hiérarchisation des défaillances potentielles, basée sur estimations du niveau de risque de défaillance, soit la criticité, des actions prioritaires sont déclenchées et suivies [21].

II.4.1 Objectifs d'AMDEC

Quel que soit le type d'AMDEC pratiqué, l'objectif est de concevoir ou d'exploiter un produit adapté à des besoins identifiés. Cela se traduit en fait par des exigences de qualité et de

fiabilité à atteindre, la méthode AMDEC permet de générer ainsi une base d'information puissante qui va servir le support permanent, pour améliorer les produits [22].

On peut généraliser le but de l'AMDEC comme suivant :

- Réduire le nombre des défaillances ;
- Prévention des pannes ;
- Améliorer la maintenance préventive ;
- Amélioration de la qualité et de la fiabilité du produit ;
- Réduire les temps d'indisponibilité après défaillance ;
- Prise en compte de la maintenabilité dès la conception ;
- Améliorer la maintenance corrective ;
- Améliorer la sécurité.

II.4.2 Types d'AMDEC

Il existe plusieurs types d'AMDEC, parmi eux, les plus importants mentionnons :

- **L'AMDEC produit** ou **l'AMDEC projet** : est utilisé pour étudier en détail la phase de conception du produit ou d'un projet. Si le produit comprend plusieurs composants, on applique AMDEC composants.
- **L'AMDEC processus** : s'applique à des processus de fabrication. Elle est utilisée pour analyser et évaluer la criticité de toutes les défaillances potentielles d'un produit engendrées par son processus. Elle peut être aussi utilisée pour les postes de travail.
- **L'AMDEC moyen** : s'applique à des machines, des outils, des équipements et appareils de mesure, des logiciels et des systèmes de transport interne.
- **L'AMDEC service** : s'applique pour vérifier que la valeur ajoutée réalisée dans le service corresponde ou attentes des clients et que le processus de réalisation de service n'engendre pas de défaillances.
- **L'AMDEC sécurité** : s'applique pour assurer la sécurité des opérateurs dans les procédés où il existe des risques pour ceux-ci [21].

II.4.3 Démarche de la méthode AMDEC

L'AMDEC obéit à un processus très structuré dont la démarche a été défini notamment par la norme française NF X60-510, cette dernière donne [22] :

- La définition ;
- Les termes utilisés et leur signification ;
- La procédure à suivre pour réaliser une AMDEC ;
- Les principes de base.

La démarche générale se résume sous la forme de l'organigramme suivant :

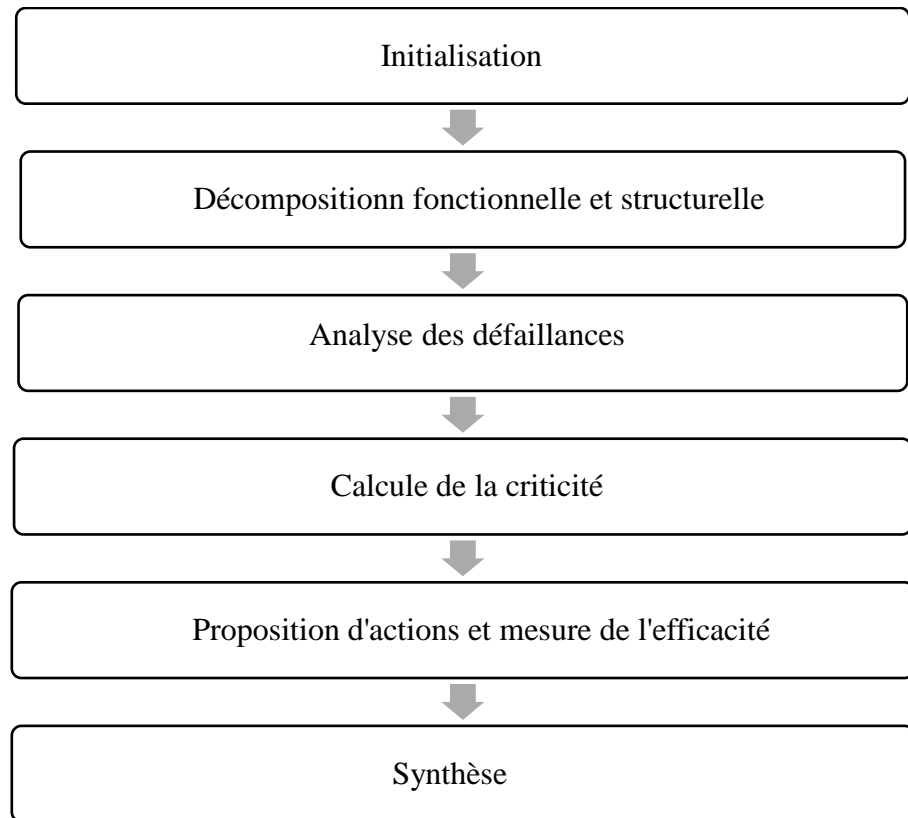


Figure II.4 : Déroulement d'une analyse AMDEC [18]

II.4.3.1 Initialisation

Cette étape consiste à décrire le problème, à définir le système à étudier, que ce soit la machine complète ou un sous-ensemble, son fonctionnement, la mission à accomplir et les objectifs à atteindre (par exemple, l'amélioration de la fiabilité, de la maintenabilité, de la disponibilité, de la sécurité ou de la maintenance), puis à réunir les documents d'information nécessaires (plans, description du processus, notices de fonctionnement, procédures d'utilisation) [23].

Il faut déterminer comment et à quelle fin l'AMDEC sera exploitée et définir les moyens nécessaires, l'organisation et les responsabilités associées. Il faut donc choisir le sujet de l'étude, définir les objectifs, déterminer les limites de l'action et constituer un groupe de travail qui aura comme buts [23] :

- D'identifier les causes de défaillances ;
- D'identifier leurs effets ;
- De hiérarchiser les défaillances par une notation ;
- De déterminer des actions correctives préventives.

II.4.3.2 Décomposition fonctionnelle et structurale

La décomposition fonctionnelle et structurale du système étudié en identifiant les fonctions de chaque sous-ensemble et les éléments contribuant à la réalisation de ces fonctions [18]. Le but de l'analyse fonctionnelle est de déterminer :

- Les fonctions principales pour lesquelles le système a été conçu ;
- Les contraintes qui répondent aux relations avec le milieu extérieur ;
- Les fonctions élémentaires des différents composants élémentaires du système.

Pour réaliser l'analyse fonctionnelle, on doit définir le besoin et les fonctions qui correspondent au besoin, c'est-à-dire :

- Décrire le besoin ;
- Décrire la façon dont il est satisfait ;
- Décrire comment il pourrait ne pas l'être ;
- Définir l'utilité de la fonction ;
- Déterminer qui est le client ;
- Déterminer la défaillance potentielle de la fonction ;
- Établir un arbre fonctionnel en définissant les sous-fonctions ou l'ensemble des fonctions élémentaires sous forme de blocs fonctionnels ou d'ordinogramme [23].

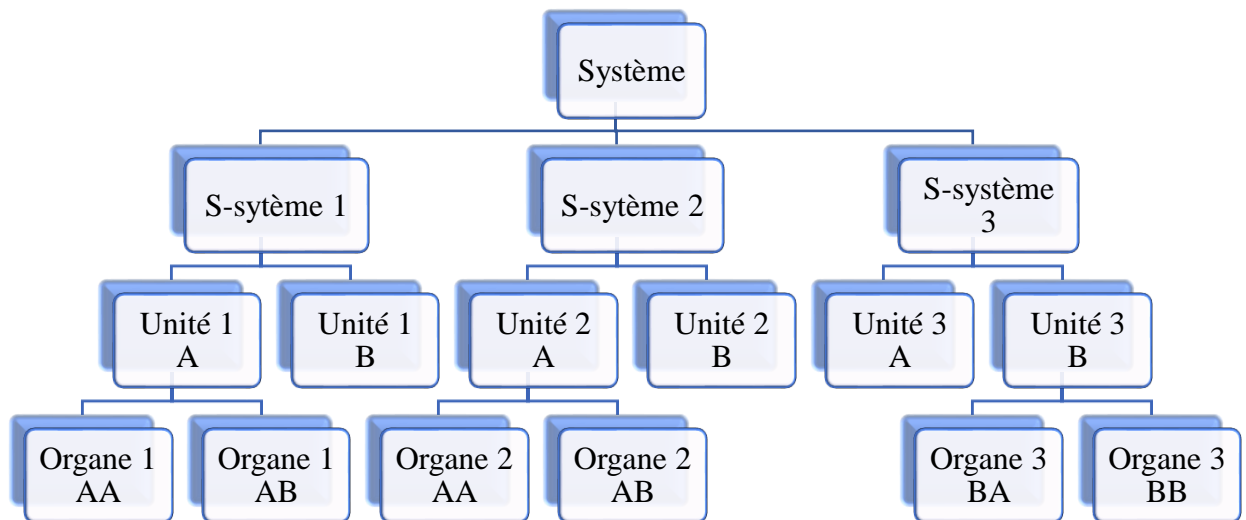


Figure II.5 : Exemple de découpage structurel [10]

II.4.3.3 Analyse des défaillances (analyse AMDEC)

L'analyse consiste à envisager et répertorier pour chaque fonction du système, les différents modes de défaillance possibles, leurs causes ainsi que leurs conséquences sur le fonctionnement général du système et à évaluer la criticité à partir des échelles « F ou O », « G » et « D » pour ensuite hiérarchiser les causes de défaillance [10].

a) Identification des modes de défaillance

Un mode de défaillance est la manifestation d'un type de défaillance pour un matériel donné. C'est la façon par laquelle est constatée l'incapacité d'un bien à remplir une fonction requise. C'est donc le processus qui, à partir d'une cause intérieure ou extérieure au bien, entraîne la défaillance du bien considéré. Le mode de défaillance est relatif à une fonction.

De façon très générale, un mode de défaillance a un des quatre effets suivants sur un système [24] :

- Fonctionnement prématuré ;
- Ne fonctionne pas au moment prévu ;
- Ne s'arrête pas au moment prévu ;
- Défaillance en fonctionnement.

b) Recherche des causes de défaillance

La norme définit la cause de défaillance par «les circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance» [16].

Bien évidemment détecter une défaillance est capitale pour éviter une éventuelle perte de la fonction d'un processus industriel, mais il est encore plus important de connaître et de prévenir à temps une défaillance en suivant l'évolution d'une dégradation d'un élément matériel [16].

Les causes de défaillance du système peuvent être externes ou internes [24] :

➤ Causes externes

- Matière d'œuvre (absente, non conforme) ;
- Energie (absente, non conforme) ;
- Conditions d'exploitation : conduite et réglage non conformes ;
- Maintenance (absente, non conforme) ;
- Perturbation (environnement).

➤ Causes internes

- Les causes internes au système sont des éléments du système remplissant une fonction (composants, liaisons) ;

- Alimenter en énergie, traiter les informations et assurer la sécurité sont des fonctions communes. La défaillance de l'une de ces fonctions entraîne la défaillance des autres fonctions.

Les causes sont regroupées en familles dont le nombre est limité à cinq par le « diagramme d'ISHIKAWA » (mentionné dans le chapitre I).

Machine : relatif à l'équipement ;

Main d'œuvre : concerne le personnel de production et de maintenance ;

Matière : concerne les consommables ;

Méthode : relatif aux procédures d'utilisation et de maintenance ;

Milieu : relatif à l'environnement.

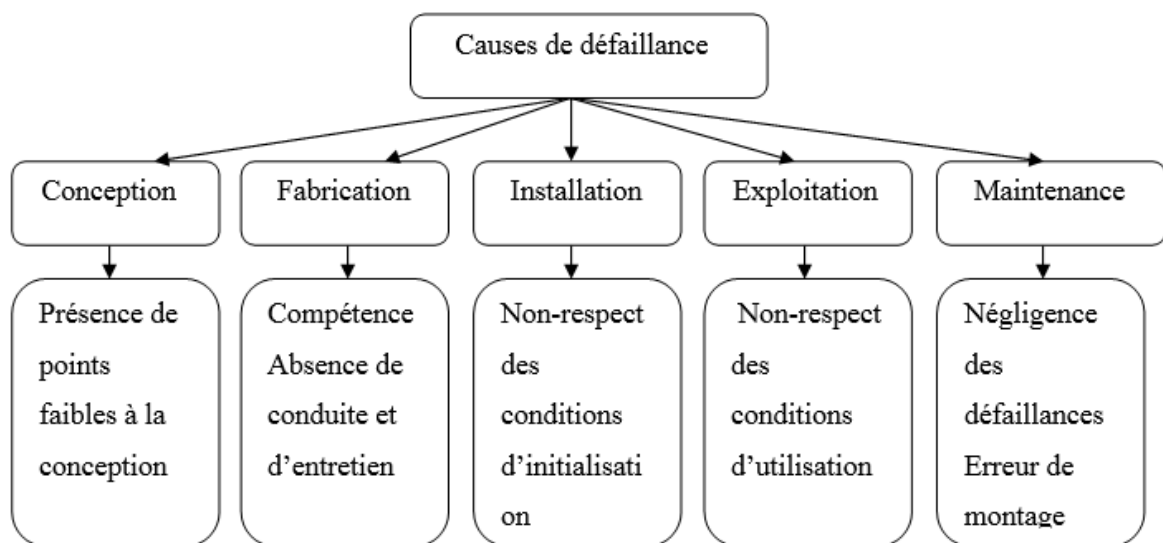


Figure II.6 : Causes d'une défaillance [24]

c) Recherche des effets de défaillance

L'effet d'une défaillance est par définition, la conséquence subie par l'utilisateur. Il est associé au couple mode-cause de la défaillance et correspond à la perception finale de celle-ci.

Exemple : arrêt de production, détérioration d'équipement, pollution, etc... [6]

d) Recensement des détections

Le mode de détection est la manière par laquelle un utilisateur est susceptible de détecter la présence d'une défaillance, détection visuelle, élévation de température, odeurs, bruits et ainsi de suite [6]

II.4.3.4 Calcul de la criticité

Le calcul de la criticité qui définit la gravité des conséquences d'une défaillance par la prise en compte de :

- **La fréquence** d'apparition des défaillances caractérisées par un taux de défaillance ;

- **La probabilité** de non détection des causes de défaillance ;
- **La gravité** des effets de la défaillance pour la sécurité des personnes et des biens et l'importance des coûts de défaillance.

A chaque critère est associé un coefficient dans un échel de valeur préalablement établie ; pour la fréquence **F**, la non détection **D** et la gravité **G**. La criticité **C** s'exprime par leur produit [18] :

$$C = F \times D \times G \quad (2.14)$$

On peut déterminer la relation entre les mécanismes d'une défaillance et la criticité dans la figure (II.7) ci-dessous :

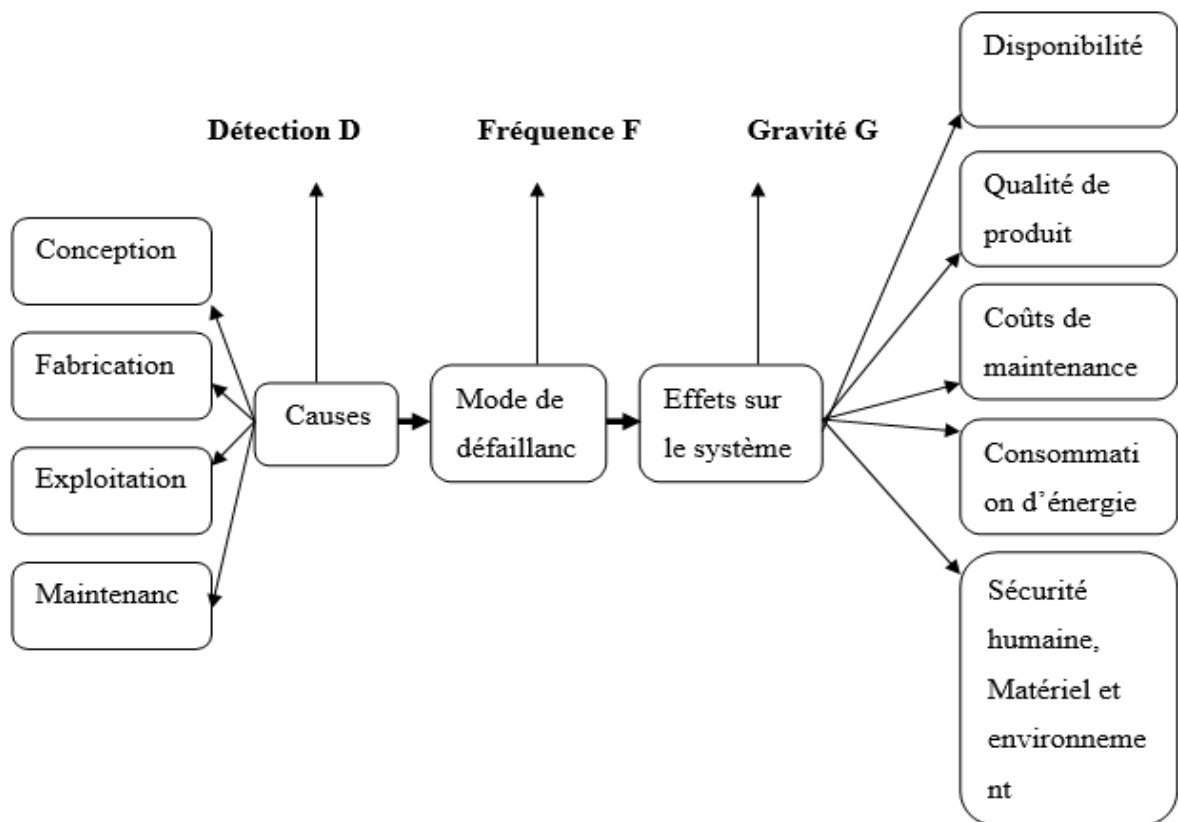


Figure II.7 : Mécanisme Cause-Mode défaillance-Effet [10]

Il est fondamental de bien définir ces échelles avec le groupe de travail, ce sont elles qui permettront de mettre en évidence les points critiques. Il est d'usage d'avoir une cotation de 1 à 4 ou de 1 à 5 (l'évènement noté 4 ou 5 est le plus grave) [22].

- **Echelle de fréquence F**

On présente l'échelle de fréquence d'une défaillance dans le tableau II.2 ci-dessous :

Tableau II.2 : Niveaux de fréquence et leurs définitions

Niveau de fréquence	Indice	Définition
Fréquence très faible	1	Défaillance rare : Défaillance maxi par an
Fréquence faible	2	Défaillance possible : Défaillance maxi par trimestre
Fréquence moyenne	3	Défaillance fréquente : Défaillance maxi par moi

- **Echelle de gravité G**

On présente l'échelle de gravité d'une défaillance dans le tableau II.3 ci-dessous :

Tableau II.3 : Niveaux de gravité et leurs définitions

Niveau de gravité	Indice	Définition
Gravité très faible	1	Sans influence : Pas d'arrêt de la production
Gravité faible	2	Peut critique : Arrêt \leq 1 heure
Gravité moyenne	3	Critique : 1 heure \leq Arrêt \leq 1 jour
Gravité catastrophique	4	Très critique : Arrêt $>$ 1 jour

- **Echelle de non détection D**

On présente l'échelle 'D' d'une défaillance dans le tableau II.4 ci-dessous :

Tableau II.4 : Niveaux de probabilité de non détection et leurs définitions

Niveau de probabilité de non détection	Indice	Définition
Détection évidente	1	Visite par opérateur
Détection possible	2	Détection aisée par un agent de maintenance
Détection improbable	3	Détection difficile
Détection impossible	4	Indésirable

- **La criticité C**

Elle permet de discriminer les actions à entreprendre et de les calculer à partir de la gravité, la fréquence et la probabilité de non détection.

Tableau II.5 : Niveaux de criticité et leurs définitions

Niveau de criticité	Définition
$1 \leq C < 10$ Criticité négligeable	Aucune modification Maintenance corrective
$10 \leq C < 18$ Criticité moyenne	Amélioration Maintenance préventive systématique
$18 \leq C < 27$ Criticité élevé	Surveillance particulière Maintenance préventive conditionnelle
$27 \leq C < 64$ Criticité interdite	Remise en cause complète de l'équipement

II.4.3.5 Synthèse

Cette étape consiste à effectuer un bilan de l'étude, de lister les points critique et de fournir les éléments permettant de définir et de lancer par ordre de priorité, les actions correctives et recommandations telles que [10] :

- L'amélioration de la fiabilité aux points sensibles en renforcent par la redondance ou une technologie plus fiable du composant ou du sous-système ;
- Une maintenance préventive systématique rigoureuse ;
- Maintenance préventive conditionnelle et contrôle non destructif pour la surveillance des points névralgiques ;
- Commande prévisionnelle des pièces de sécurité en gestion de stock ;
- Une recherche rationnelle de causes de défaillance.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés l'étude de la Sûreté de Fonctionnement en déterminant ses composants, ses caractéristiques et les méthodes utilisées dans cette étude. Parmi ces méthodes nous avons précisé la méthode AMDEC, c'est une méthode d'analyse prévisionnelle de la Sûreté de Fonctionnement et on a déterminé les différentes étapes de mise en place d'un plan de maintenance préventive par cette méthode, depuis l'analyse des équipements de production jusqu'à la rédaction de la documentation.

Chapitre III
Systeme étudie

III.1 Introduction

Le choix de la ligne comme le système étudié est très loin d'être aléatoire, tellement l'importance de ce système considéré comme la pierre angulaire de la vie quotidienne, car l'électricité constitue aujourd'hui un facteur indispensable dans tous les secteurs.

Dans le présent chapitre, le système choisi pour notre étude qui est la ligne de transport électrique aérienne sera bien détaillé par ces différents composants, caractéristique et modèle mathématique.

III.2 Définition du système

La ligne de transport électrique est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques et le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité. Elle permet le transport de l'énergie électrique, des centrales électriques vers les réseaux de distribution qui alimentent les consommateurs selon leurs besoins [25].

L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final [26].

Il existe deux types de transport d'électricité :

III.2.1 Lignes de transport HT

Les lignes haute tension acheminent l'électricité sur des distances plus courtes et relient les régions et les agglomérations entre elles. Selon la norme IEC (International Electrotechnical Committee) le niveau de tension de transport **HT (HV)** comprises entre 33 kV et 220 kV [26].

III.2.2 Lignes de transport THT

Les lignes THT permettent de transporter des quantités d'électricité très importantes sur de longues distances avec des pertes minimales. Elles relient les régions et les pays entre eux et alimentent directement certaines grandes zones industrielles. Selon la norme IEC le niveau de tension de transport **THT (VHV)** supérieures à 220 kV [26].



Figure III.1 : Ligne de transport électrique

III.3 Les composants de la ligne de transport électrique

Une ligne de transport se compose des câbles d'électricité, des isolateurs et souvent d'un câble de garde, voire la figure (III.2). Les lignes de transports reliaent sont souvent portées sur des pylônes en acier, en bois ou en béton renforcé, ces lignes ont ces propres emprises (Right Of Way). Les pylônes en acier peuvent être à circuit. Les pylônes en acier à multi circuit ont été déjà réalisés, ces pylônes supportant trois à dix lignes de 69 kV sur une largeur d'emprise donnée [25].

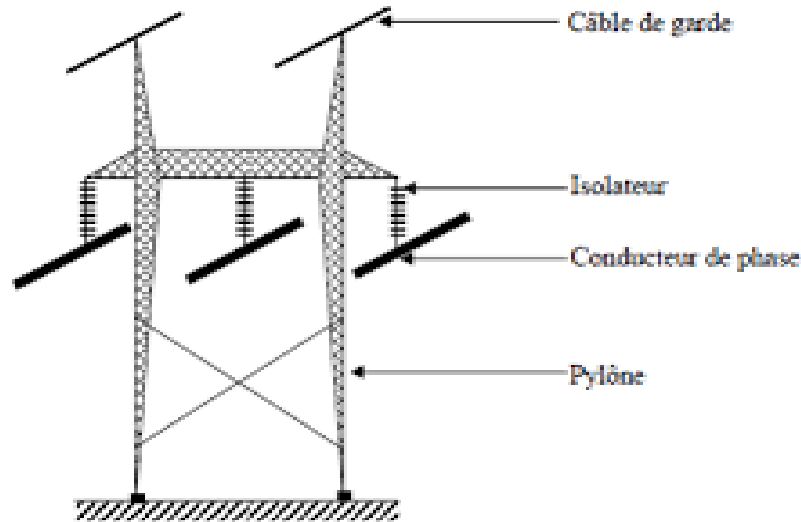


Figure III.2 : Composants de la ligne de transport électrique

III.3.1 Les câbles électriques

Les câbles électriques assurant le transport et la distribution de l'énergie. Ils peuvent être des câbles nus constituant des lignes aériennes ou des câbles souterrains isolés.

III.3.1.1 Lignes aériennes

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs qui sont portés par les pylônes. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois câbles (ou faisceaux de câbles) conducteurs par circuit. Les lignes sont soit simples (un circuit), soit doubles (deux circuits par file de pylônes). Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Les câbles conducteurs sont « nus » c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension.

Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium figure (III.3) [27].



Figure III.3 : Conducteur d'une ligne aérienne [27]

III.3.1.2 Lignes sous-terrain

Un câble électrique à haute tension est un câble utilisé pour le transport d'électricité, que ce soit en courant alternatif ou en courant continu. Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principales sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, entouré d'une couche semi-conductrice interne, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonne propriété mécaniques et le protéger des agressions extérieures figure III.4 [27].

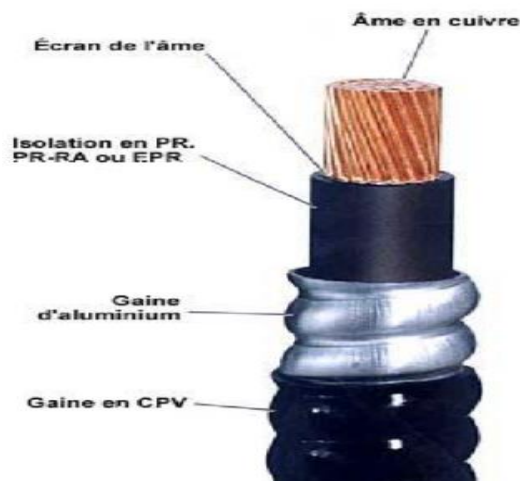


Figure III.4 : Coupe d'un câble souterrain [27]

III.3.1.3 La construction des conducteurs

Un conducteur est un ensemble formé d'une âme conductrice et de son enveloppe isolant.

- **L'âme** pour rôle de conduire le courant électrique, elle doit présenter une résistivité très faible pour réduire les pertes par effet Joules (Pertes en chaleur : Thermique). Elle peut être soit en cuivre ou en aluminium.

- **L'enveloppe isolant** c'est la matière qui entoure l'âme, elle permet d'isoler les conducteurs et de protéger contre les contacts directs et les défauts d'isolement. Elle doit posséder des propriétés bien précises.

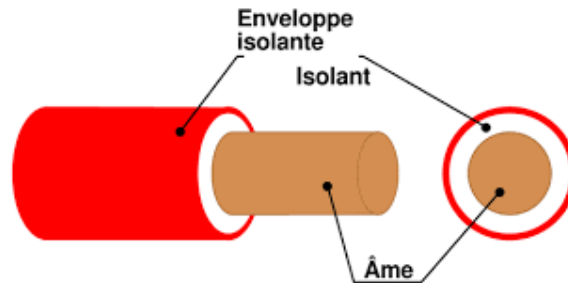


Figure III.5 : Composants d'un conducteur

III.3.1.4 Le modèle mathématique

Au niveau mécanique, le calcul de la résistance des conducteurs est soumis aux réglementations internationales. Les conditions climatiques doivent être connues (givre, températures, intensité du vent, etc...).

On détermine les critères électriques permettant le dimensionnement de la section des conducteurs des lignes aériennes [28].

- **Critère de courant nominal**

Nous devons vérifier que le câble supporte le courant nominal sur toute sa durée de vie. Vu $P_{départ}$ et a donnés, nous déterminons tout d'abord la puissance circulant dans le câble :

$$P_T = P_{départ} \cdot (1 + a)^T \quad [MW] \quad (3.1)$$

Nous en déduisons le courant circulant alors dans chaque phase du câble :

$$I_{N,T} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)} \quad [A] \quad (3.2)$$

- **Critère du courant de court-circuit**

Nous déduisons directement ce courant de la formule donnant la puissance de court-circuit

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U} \quad [A] \quad (3.3)$$

La puissance de court-circuit S_{cc} est fonction du réseau environnant la ligne étudiée, mais du point de vue dimensionnement, nous retenons souvent les valeurs suivantes en fonction des principales tensions caractéristiques [28] :

Tableau III.1 : Puissance et courant de court-circuit [28]

Tension phase/phase U [kV]	Puissance de court-circuit S _{cc} [MVA]	Courant de court-circuit I _{cc} [kA]
150	8000	30.8
70	2500	20.6
15	350	13.5
6	120	11.6

Afin de trouver la section minimum permettant de supporter ce courant durant le temps t_{cc} , nous disposons de la formule suivante, où a est un facteur dépendant du type de matériau constituant le câble :

$$S = \frac{I_{cc} \cdot \sqrt{t_{cc}}}{a} \quad (\forall t < 5 \text{ sec}) \quad [mm^2] \quad (3.4)$$

Cette nouvelle valeur du courant conduit alors au choix d'une nouvelle section normalisée

- **Critère de la chute de tension**

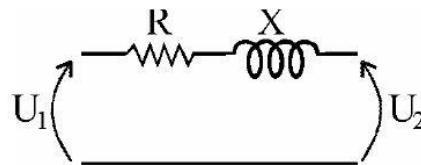


Figure III.6 : Modèle réduit de la liaison [28]

$$\frac{\Delta U}{U} \cong \sqrt{3} \cdot \frac{I_N}{U_N} \cdot (R'_{70^\circ C} \cdot I \cdot \cos(\varphi) + X' \cdot I \cdot \sin(\varphi)) \quad (3.5)$$

Où

$$\Delta U = |U_2| - |U_1| \neq |U_2 - U_1| \quad [V] \quad (3.6)$$

Nous pouvons alors déterminer la résistance maximale de la ligne à 20°C.

III.3.2 Le câble de garde

Au plus haut de la ligne est disposé un câble appelé câble de garde, dont le rôle est de protéger des coups de foudre afin d'éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs et transport des courants homopolaires et harmoniques. Le plus souvent leur choix dépend de la nature et du choix des conducteurs mais, l'on peut aussi noter que leur dimensionnement est plus délicat que celui des conducteurs car [25] :

- Sur le plan mécanique, ils doivent résister aux mêmes contraintes que les autres conducteurs pourtant ils sont de section plus faible.

- Sur le plan électrique, ils doivent assurer un écoulement rapide du courant du sommet du pylône jusqu'à la terre des supports par le biais des pylônes ou des masses métalliques et comme tous les autres conducteurs ils doivent être capables de résister à des surcharges [29].

Il existe deux types de câble de garde :

- Des câbles alu-mécan-acier normaux ;
- Des câbles alu-mécan-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.



Figure III.7 : Câbles de garde

III.3.3 Isolateurs

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige. Les isolateurs ont deux fonctions principales [26] :

- Ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes ;
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône.



Figure III.8 : Isolateur

Les grandeurs électriques les plus utiles pour définir une chaîne d'isolateurs ou un isolateur sont :

- La tension tenue spécifiée au choc à sec ;
- La tension tenue spécifiée à fréquence industrielle sous pluie ;
- En outre la tension tenue sous pollution est une valeur déterminante pour le choix de l'isolateur.

Les grandeurs mécaniques pour définir le choix d'une chaîne d'isolateurs sont :

- La résistance mécanique à la traction ;
- La résistance mécanique à la flexion.

III.3.3.1 Les différents types des isolateurs

- **Chaînes d'ancrage**

Les chaînes d'ancrage sont utilisées dans le cas de pylône d'ancrage. Ce type de chaîne se distingue par sa position quasi horizontale [26].



Figure III.9 : Chaînes d'ancrage [26]

- **Chaînes V**

Les chaînes d'isolateurs en V sont utilisées pour les pylônes de suspension lorsque que l'on souhaite limiter le balancement latéral des conducteurs [26].



Figure III.10 : Chaînes V [26]

- **Chaîne droite**

Les chaînes de suspension droite sont la solution de base pour les pylônes de suspension. Ce type d'isolation est le plus fréquemment utilisé [26].



Figure III.11 : Chaîne droite [26]

III.3.3.2 Eclateurs

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes [26].



Figure III.12 : Eclateurs

III.3.4 Les pylônes

Un pylône électrique est un support vertical portant les conducteurs d'une ligne à haute tension. Le plus souvent métallique, il est conçu pour supporter un ou plusieurs câbles aériens et résister aux aléas météorologiques et sismiques.

Les pylônes ont pour fonction de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent de leur environnement (conditions climatiques) et des contraintes mécaniques (terrain) auxquelles ils sont soumis. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs [29].

Tous les pylônes de façon générale peuvent être décomposés en trois parties à savoir : la tête, le fût et les pieds.

- **La tête** est constituée des consoles et du chevalet de câble de garde ;
- **Le fût** composé du tronc, des extensions et des pieds.

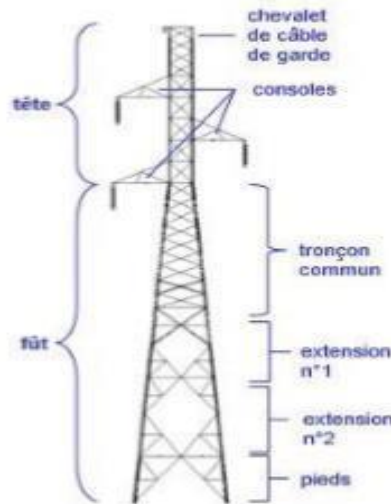


Figure III.13 : Différentes parties d'un pylône

III.3.4.1 Les différents types des pylônes

- **Pylônes nappe**

C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110kV à 735kV. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement [26].



Figure III.14 : Pylônes nappe

- **Pylônes triangle**

Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110kV à 315kV. Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres [26].



Figure III.15 : Pylônes triangle

- **Pylône double drapeaux**

Courant sur le réseau 400 kV installé depuis les années 1960 [26].



Figure III.16 : Pylône double drapeaux

III.3.4.2 Le modèle mathématique

- **Poids équivalent et angle d'inclinaison du câble**

Le poids équivalent « $p_{\text{équi}}$ »

$$p_{\text{équi}} = p \cos(\varphi) + F \sin(\varphi) \quad (3.7)$$

Angle d'inclinaison du câble

$$\varphi = \arctang \left[\frac{F}{p} \right] \quad (3.8)$$

La projection Selon

$$X : p_{\text{équi}} = p \cos(\varphi) + F \sin(\varphi)$$

$$Y : p \sin(\varphi) = F \cos(\varphi)$$

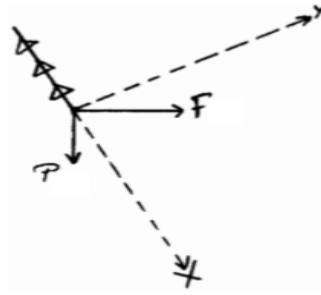


Figure III.17 : Efforts appliqués [28]

Avec :

$$F = c \times q \times A \quad [\text{N/m}] \quad (3.9)$$

« **F** » effort du vent ;

« **c** » c'est le coefficient aérodynamique d'ensemble dans la direction du vent ;

« **A** » la surface en m² des pleins que l'élément présente au vent, perpendiculairement à la direction dans laquelle il souffle ;

« **q** » est la pression dynamique (en pascal).

Cette dernière se déduit de la pression dynamique de base « **q_b** » donnée, en fonction de la vitesse du vent (fonction de la hauteur au-dessus du sol), dans le tableau III.2.

Elle se calcule par la formule :

$$q_b = \frac{aV^2}{2g} \quad (3.10)$$

« **a** » représente le poids spécifique de l'air (1,2 kg/m³) ;

« **V** » est la vitesse du vent (en m/s) ;

« **g** » est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²).

L'équation (3.9) peut se réécrire, dans le cas des lignes comme suit :

$$F = C_x \times q \times d \quad (3.11)$$

« **C_x** » est le coefficient de traînée du câble ;

« **d** » son diamètre.

Pour les conducteurs actifs, de garde et de terre, la hauteur à prendre en considération est la hauteur du point d'attache aux isolateurs ou au support.

La pression dynamique « **q** » se déduit de « **q_b** » par l'application d'un facteur correctif :

$$q = f_c \times q_b \quad (3.12)$$

Les valeurs de ce facteur « **f_c** » sont les suivantes :

- Pour le calcul de l'effort du vent sur les supports, traverses, isolateurs :
- 0,8 pour le vent horizontal maximum normal ;

- 1,6 pour le vent horizontal maximum exceptionnel.
- Pour le calcul de l'effort du vent sur les conducteurs actifs, de garde et de terre :
 - Pour les portées inférieures à 100 m :
 - 0,7 pour le vent horizontal normal ;
 - 1,4 pour le vent horizontal exceptionnel.
 - Pour les portées supérieures à 100 m :
 - 0,5 pour le vent horizontal normal ;
 - 1 pour le vent horizontal exceptionnel.

Tableau III.2 : Vitesse du vent et pression dynamique en fonction de la hauteur [28]

Hauteur au-dessus du sol [m]	Vitesse du vent [m/s]	Pression dynamique de base (qb) [Pa]
Jusque 25	35	750
De 25 à 50	36.6	800
De 50 à 75	37.25	850
De 75 à 100	38.36	900
De 100 à 125	39.41	950
De 125 à 150	40.43	1000
De 150 à 175	41.43	1050
De 175 à 200	42.21	1100

- **Portée critique et choix de la constante « a »**

Portée critique

Pour chaque type de conducteur, il existe une portée critique en dessous de laquelle l'hypothèse hiver sera plus défavorable, tandis qu'au-dessus ce sera l'hypothèse été qui conduira aux contraintes les plus élevées. Cette portée critique se calcule à l'aide de l'équation d'état (dite de Blondel) en exprimant que les tensions dans le conducteur doivent être égales pour les deux hypothèses en utilisant la tension maximale admissible, c'est-à-dire un tiers de la tension de rupture. Nous avons alors [28] :

$$p_c = \sqrt{\frac{24 \times \alpha \times (\theta_{été} - \theta_{hiver}) \times T_{max}^2}{p_{équ,été}^2 - p_{équ,hiver}^2}} \quad [m] \quad (3.13)$$

Avec $T_{max} = 1/3$ TRUPTURE (imposé par le R.G.I.E.).

Choix de la constante « a »

Dans le cas où la portée moyenne est inférieure à la portée critique, c'est la constante a associée à l'hypothèse hiver qui sera retenue, sinon ce sera celle associée à l'hypothèse été. Pour la calculer, c'est encore l'équation d'état que nous utiliserons [28] :

$$a = \frac{p_{\text{équi}}^2 \times P^2}{24 \times T^2} - \frac{T}{E \times S} - \alpha \times \theta \quad (3.14)$$

« **p_{équi}** » est le poids équivalent dans l'hypothèse retenue [N/m] ;

« **P** » la portée moyenne [m] ;

« **T** » TMAX l'effort de traction maximal admissible [N] ;

« **E** » est le module de Young [n/mm²] ;

« **S** » la section [mm²] ;

« **α** » le coefficient de dilatation thermique [°C⁻¹] ;

« **θ** » la température dans l'hypothèse retenue [°C].

Ceci donne un paramètre « a » adimensionnel.

• **Distance phase/phase et phase/terre**

L'écartement vertical entre phases, $E_{\phi\phi}$ vaut :

$$E_{\phi\phi} = \frac{U_N}{150} + CFI \times \sqrt{F_{\text{max}} + SL} \quad [\text{m}] \quad (3.15)$$

U_N est la tension nominale [kV] ;

CFI coefficient qui dépend de la nature du conducteur ;

F_{max} la flèche maximale [m] ;

SL la longueur de la chaîne d'isolateur [m].

La distance verticale minimale entre phases et terre vaut :

$$E_{\phi N} = \frac{U_N}{150} \quad [\text{m}] \quad (3.16)$$

Pour des pylônes d'angle quelconque « β », la distance horizontale minimale entre phases, imposée par le RGIE, est donnée par la formule suivant :

$$E_{Hmin} \geq EV \times \frac{0.8}{\cos(\frac{\beta}{2})} \quad [\text{m}] \quad (3.17)$$

• **Effet couronne**

L'effet couronne est un phénomène difficile à quantifier et une littérature abondante sur ce sujet est disponible dans les bibliothèques. Le critère souvent utilisé consiste à vérifier que le champ superficiel reste bien inférieur à 18 kV_{eff}/cm. Ce champ « E_{MAX} » se calcule par la formule (3.18) :

$$E_{min} = \frac{V_{eff}}{r \times \ln \left(\frac{2 \times H_{min} \times EPH}{r \times \sqrt{4 \times H_{min}^2 + EPH^2}} \right)} \quad [\text{kVeff/cm}] \quad (3.18)$$

EPH représente l'écartement entre phases et H_{min} la distance minimale entre un conducteur et le sol [28].

- **Calcul des efforts en tête de pylône**

L'appui est soumis à trois moments :

M1 = moment dû au poids propre de l'ensemble formé par les conducteurs, les chaînes d'isolateurs et la ferrure.

M2 = moment dû à la force aérodynamique du vent s'exerçant sur les conducteurs.

M3 = moment dû à la force aérodynamique appliquée de façon répartie sur le support.

Pour obtenir l'effort en tête résultant, il suffit de diviser le moment résultant par la hauteur hors-sol.

Ces moments sont déterminés aisément à partir de la connaissance des conditions météorologiques dimensionnantes hiver ou été, permettant le calcul de la constante « a » de Blondel, de la tension de la ligne et des angles d'application des efforts [28].

- **Evaluation du coût des supports**

La fonction coût du pylône s'exprime comme une fonction de la hauteur et de l'effort en tête. Nous y incorporons le coût des fondations. Nous devons y ajouter le prix des chaînes de suspension ou des chaînes d'ancrage et obtenir finalement le coût des supports. Dans ce coût, nous ne tenons pas compte des différents obstacles géographiques qui modifient les proportions entre pylônes d'alignement, d'angle et d'ancrage, ainsi que la garde au sol. Nous avons également omis le prix de la ferrure [28].

III.4 Conclusion

L'énergie électrique se stocke difficilement, elle doit être disponible à tout instant, depuis les sources de production jusqu'aux zones de consommation.

En vue de préparer le terrain pour notre étude qui sera évoqué le chapitre suivant, alors dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la ligne électrique en parlant sur les différents composants de la ligne, ces modèles mathématiques et son rôle dans les réseaux électriques.

Chapitre IV
Etablissement d'AMDEC
d'une ligne de transport
électrique

IV.1 Introduction

Après avoir abordé la définition de la maintenance industrielle et de ses types, ainsi que les méthodes utilisées pour améliorer cette dernière, puis la présentation générale du système cible de l'étude, dans ce chapitre, nous appliquerons la méthode AMDEC comme été la meilleure méthode par rapport aux autres sur la ligne de transmission électrique à haute tension.

Pour cette raison, nous avons recherché l'historique des dysfonctionnements de la ligne de transport d'électricité, ou la ligne Ghardaïa-Ouargla 220kV a été identifiée pour étudier le cas en raison de sa grande importance, considérant la région comme le cœur de l'économie algérienne.

IV.2 Analyse préalable nécessaire à la mise en place d'un plan de la maintenance préventive

IV.2.1 Etapes de l'élaboration

En vue d'exploiter nos prés-requis acquis durant notre cursus universitaire, l'élaboration de l'AMDEC sur la ligne 220kV Ghardaïa- Ouargla sera faite selon les étapes présentées dans le tableau suivant IV.1 :

Tableau IV.1 : Etapes de l'élaboration

INITIALISATION	Définition du système à étudier
	Définition de la phase de fonctionnement
	Définition des objectifs à atteindre
	Constitution du groupe de travail
	Etablissement du planning
	Mise au point des supports de l'étude
DECOMPOSITION FONCTIONNELLE	Décomposition fonctionnelle
	Identification des fonctions des sous-ensembles
	Identification des fonctions des éléments
AMDEC	Analyse des mécanismes de défaillance
	Identification des modes de défaillances
	Recherche des causes des défaillances
	Recherche des effets des défaillances

		Recensement des détections
	Evaluation de la criticité	Estimation du temps d'intervention
		Evaluation des critères de cotation
		Calcul de la criticité
	Proposition d'actions correctives	Recherche des actions correctives
		Calcul de la nouvelle criticité
SYNTHESE		Hierarchisation des defaillances
		Liste des points critiques
		Liste des recommandations

IV.3 Initialisation

IV.3.1 Définition du système à étudier

La ligne 220kV GHARDAIA-OUARGLA est une ligne très importante et stratégique en Algérie à cause de favorise et facilite l'alimentation des bases pétrolières et des usines industrielles de cette région critique.

L'interconnexion : Avec deux lignes 220kV, ce poste assure une interconnexion entre Laghouat et Hassi-Messaoud. De plus, il assure l'interconnexion entre les différentes parties de Ghardaïa avec les lignes 60 kV (Tilghmet) (voir figure IV.1 et IV.2).

Le poste a été construit dans les années 1990 avec deux travées réserves sous une tension de 220kV. Le réseau électrique a besoin de ces deux travées, d'une part pour alimenter le poste construit à Hassi-Rmel par une ligne de longueur 40km qui sera utilisée pour la plupart du temps comme départ, d'autre part pour avoir une connexion à un poste blindé 400kV / 220kV à Tilghmet à 105Km de distance.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux.

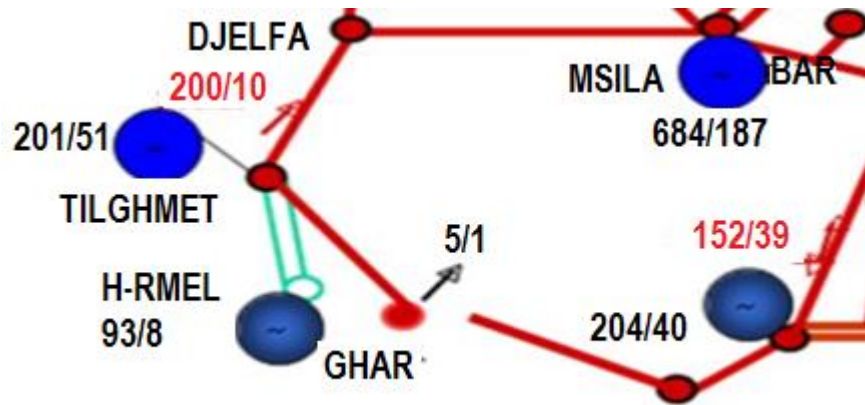


Figure IV.1 : Position de la ligne GHARDAIA-OUARGLA dans le réseau Algérien

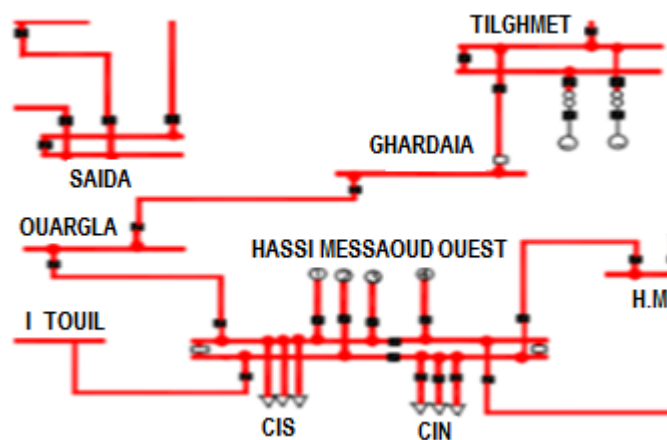


Figure IV.2 : Schéma unifilaire de couplage de la ligne GHARDAIA-OUARGLA

Le tableau IV.2 montre les différentes caractéristiques principales de la ligne.

Tableau IV.2 : Caractéristique de la ligne 220KV GHARDAIA- OUARGLA

Longueur	180km
Section	1*411 mm ²
Nombre des pylônes	427
Tension	220kV
Matériau	Alu/Ac (Aluminium/Acier)
Nombre d'isolateurs	12 à 14
Câbles de garde	Almélec-acier normaux
Pylônes	Treillis d'acier

Les caractéristiques des pylônes utilisées dans le tracé de la ligne sont les suivantes :

- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 1 et 4 est de 41.8m ;
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 2 et 5 est de 31.8m ;
- La hauteur de suspension des conducteurs des phases 3 et 6 est de 22.6m ;

- Les écartements horizontaux entre le centre du pylône et les phases considérées sont mentionnés sur la figure ;
- Chaque phase est constituée en faisceau de deux conducteurs de section 500 mm² chacun maintenus par des entretoises de 40cm ($2 \times 500 \text{ mm}^2$) ;
- Le diamètre de chaque conducteur constituant le faisceau est égale à 31.5mm ;
- La résistance électrique à 200c : $R_{200} = 0.059 \text{ } \Omega/\text{km}$.

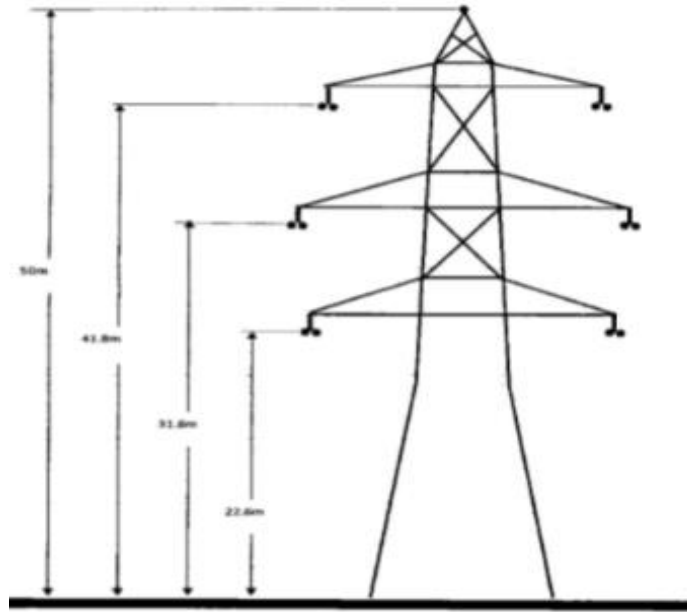


Figure IV.3 : Pylône porteur de la ligne

IV.3.2 Définition de la phase de fonctionnement

La fonction générale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusqu'aux consommateurs. Parmi les composants d'un réseau de transport électrique on trouve les lignes de transmission qui transmet cette énergie à travers des conducteurs portés par des supports sur de longues distances. Ces lignes ont donc une mission très importante en matière de continuité de fonctionnement. Une ligne de transmission est la colonne vertébrale du système électrique. Les conséquences d'une défaillance de ce composant sont très lourdes du point de vue financier.

IV.3.3 Définition des objectifs à atteindre

L'objectif de notre étude est de faire une analyse préventive pour prédire les défaillances de la ligne de transport électrique en étudiant toutes les sources possibles de défaillances des composants de notre système ainsi en déterminant les effets de ces défaillances sur le comportement et la sécurité du système. Doit mettre en évidence tous les risques potentiels.

IV.3.4 Constitution du groupe de travail

L'AMDEC étant une méthode participative qui se pratique en groupe de travail pluridisciplinaire, Le groupe travail sera composé de :

Tableau IV.3 : Groupe de travail

N°:	Nom & prénom	Qualité
01	ABDERRAHMANE Souria	Etudiante / chargé de l'étude
02	CHERCHAB Benabad	Etudiant / chargé de l'étude
03	BEY Mohammed	Dirigeant d'étude
04	LAZIZI Ismail	Coordinateur

IV.3.5 Etablissement du planning

Le travail était fait durant une période de 4 mois (01/02/2022 à 11/05/2022), un planning flexible était établi pour avoir notre objectif.

IV.3.6 Mise au point des supports de l'étude

Le tableau IV.4 suivant résume l'historique des pannes de la ligne GHARDAIA – OUARGLA de l'année 2019/2020.

Tableau IV.4 : Historique des pannes de la ligne GHARDAIA OUARGLA [30]

N°	Défaillances	Date de début de panne	Date de fin de Panne	Temps d'arrêt (h)	Cause	Conséquence
01	Pollution de la ligne	05/01/2019	17/01/2019	93	Tempête de sable	Coupure d'électricité Métlili et Mansourah Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
02	Manque accessoire ligne (entretoise, contre poids ...)	29/01/2019	29/01/2019	03	Possibilité de vol	Sans effet
03	Dégradation peinture pylônes	02/02/2019	02/02/2019	04	Condition climatique	Risque de Corrosion des pylônes
04	Mauvaise résistance de	10/02/2019	11/02/2019	07	Durée de l'installation	Risque d'électrification

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

	terre de quelques pylônes					
05	Isolateurs cassée ou amorcés	02/03/2019	02/03/2019	06	Surcharge (demande d'électricité élevée)	Coupure d'électricité Zelfana
06	Câble conducteur blessé	14/03/2019	14/03/2019	05	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa
07	Amorçage corbeaux ou nids de corbeau	21/03/2019	21/03/2019	06	Oiseaux	Coupure d'électricité Bordj chandez
08	Déclenchements suite défauts ligne	29/03/2019	29/03/2019	04	Court-circuit biphasé	Coupure d'électricité Zelfana
09	Isolateurs cassée ou amorcés	20/04/2019	21/04/2019	08	Surcharge (demande d'électricité élevé)	Coupure d'électricité Métlili et Mansourah
10	Dégradation peinture pylônes	04/05/2019	06/05/2019	06	Condition climatique	Risque de Corrosion des pylônes
11	Bretelles de continuité électrique abimées ou lâchées	15/05/2019	16/05/2019	10	Mauvaise serrage	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
12	Pollution de la ligne	18/05/2019	30/05/2019	94	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
13	Isolateurs amorcés suite pollution	08/06/2019	21/06/2019	101	Tempête de sable	Coupure d'électricité Zelfana Arrêt de la ligne

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

14	Mauvaise résistance de terre de quelques pylônes	01/07/2019	01/07/2019	04	Durée de vie de l'installation	Risque d'électrification
15	Câble blessé	09/07/2019	20/07/2019	84	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
16	Manque cornières pylônes	11/08/2019	14/08/2019	15	Possibilité de vol	Sans effet
17	Amorçage corbeaux ou nids de corbeau	20/08/2019	22/08/2019	07	Oiseaux	Coupure d'électricité Ain Moussa
18	Dégradation peinture pylônes	06/09/2019	06/09/2019	02	Condition climatique	Risque de Corrosion des pylônes
19	Câble conducteur blessé	08/10/2019	10/10/2019	06	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa
20	Manque accessoire ligne (entretoise,	01/11/2019	01/11/2019	07	Possibilité de vol	Sans effet
21	Déclenchements suite défauts ligne	03/12/2019	04/12/2019	09	Court-circuit biphasé	Coupure d'électricité moummou
22	Chute de pylône	10/12/2019	12/12/2019	48	Forte vent	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
23	Déclanchement Réenclenchèrent Déclanchement	16/12/2019	16/12/2019	01	Pollution d'isolateur	Coupure d'électricité N'Goussa

24	Chute d'un conducteur de deux lignes	24/12/2019	25/12/2019	24	Fort vent	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne
----	--------------------------------------	------------	------------	----	-----------	---

IV.4 Décomposition fonctionnelle

Avant de se lancer dans la réalisation proprement dite de l'AMDEC, il faut bien connaître précisément le système et son environnement.

IV.4.1 Découpage du système

On s'appuie sur l'analyse fonctionnelle d'une fonction pour réaliser un découpage fonctionnel du système et choisir celui sur lequel se portera l'étude et pour lequel on dispose d'historiques. Il faut dresser autant d'arbres fonctionnels qu'il y a d'états du système (mode de fonctionnement, etc...). Il est recommandé de s'appuyer sur un schéma simplifié du système complet pour réaliser l'analyse.

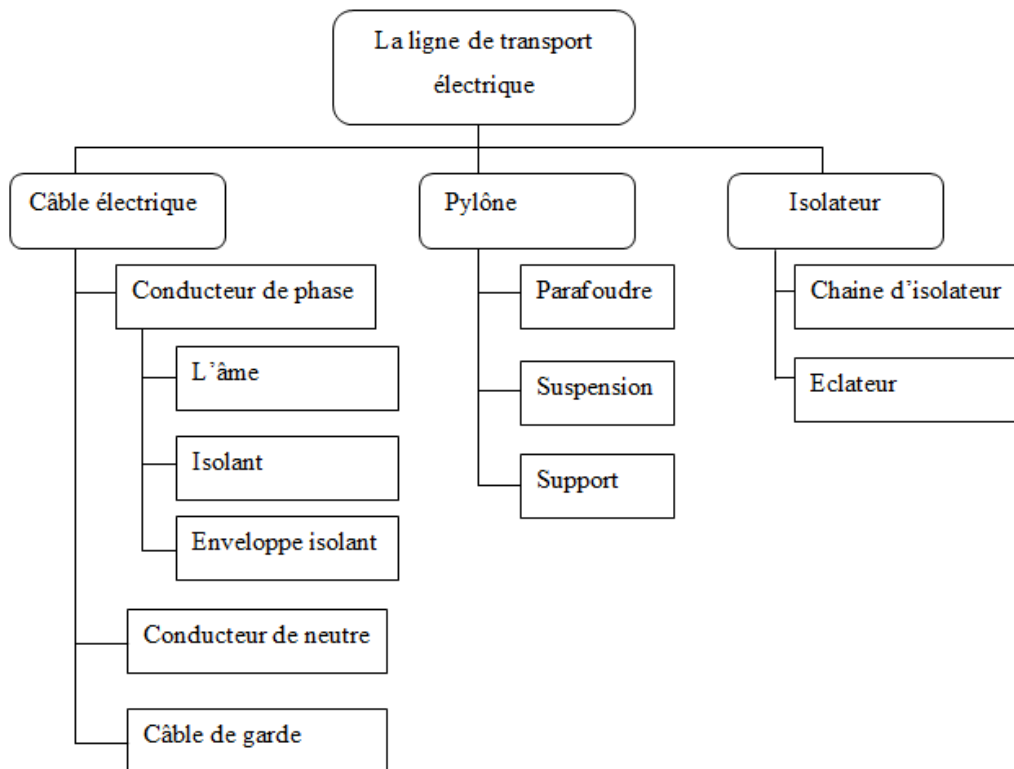


Figure IV.4 : Découpage structurel d'une ligne de transport électrique

IV.4.2 Identification des fonctions des sous-ensembles

Cette étape consiste à identifier la fonction de chaque sous-ensemble qui forme le système global en vue de simplifier l'étude et faciliter l'établissement d'AMDEC.

IV.4.2.1 Fonctions de service du conducteur

Le premier sous-ensemble est le conducteur, qui représente l'élément essentiel de notre cas d'étude, dans la figure IV.5, on peut voir le digramme de pieuvre (méthode utilisée) schématiser les fonctions du conducteur.

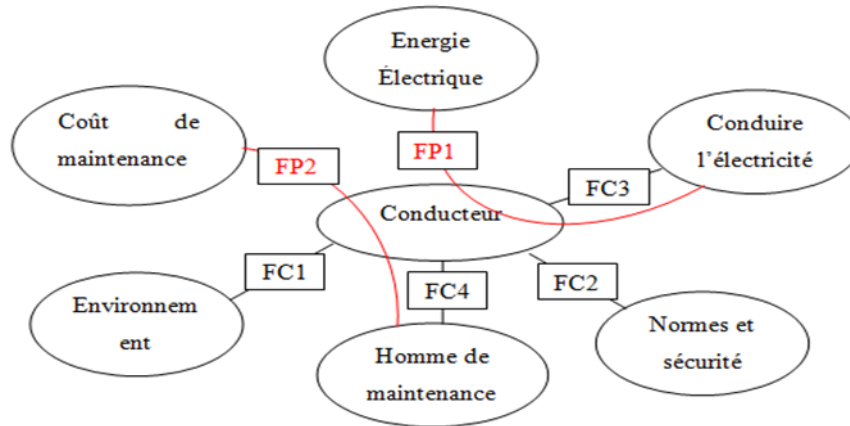


Figure IV.5 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions du conducteur

FP1 : Conduire l'énergie électrique ;

FP2 : Diminuer le coût de maintenance par l'homme de maintenance ;

FC1 : Doit résister les conditions environnementales ;

FC2 : Doit respecter les normes de sécurité de fonctionnement et les interventions ;

FC3 : Assurer la continuité d'électricité ;

FC4 : Donner l'accès à l'homme de maintenance.

IV.4.2.2 Fonctions de service de pylône

De même façon que le conducteur, le deuxième sous-ensemble est le pylône porteur du conducteur.

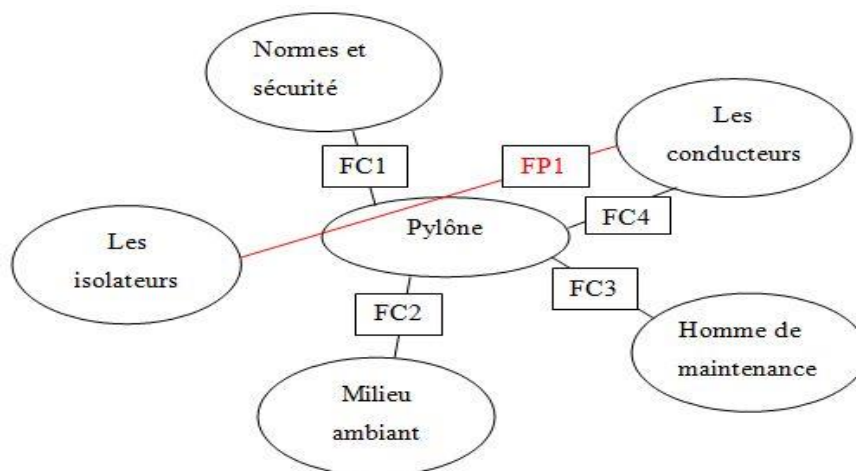


Figure IV.6 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions de pylône

FP1 : Supporter les conducteurs et les isolateurs ;

FC1 : Doit respecter les normes de sécurité de fonctionnement et les interventions ;

FC2 : Résister au milieu ambiant ;

FC3 : Permettre l'accès à l'homme de maintenance ;

FC4 : Transporter le courant électrique en air.

IV.4.2.3 Fonctions de service d'isolateur

Les fonctions de service de l'isolateur sont représentées par la figure IV.7 ci-dessous :

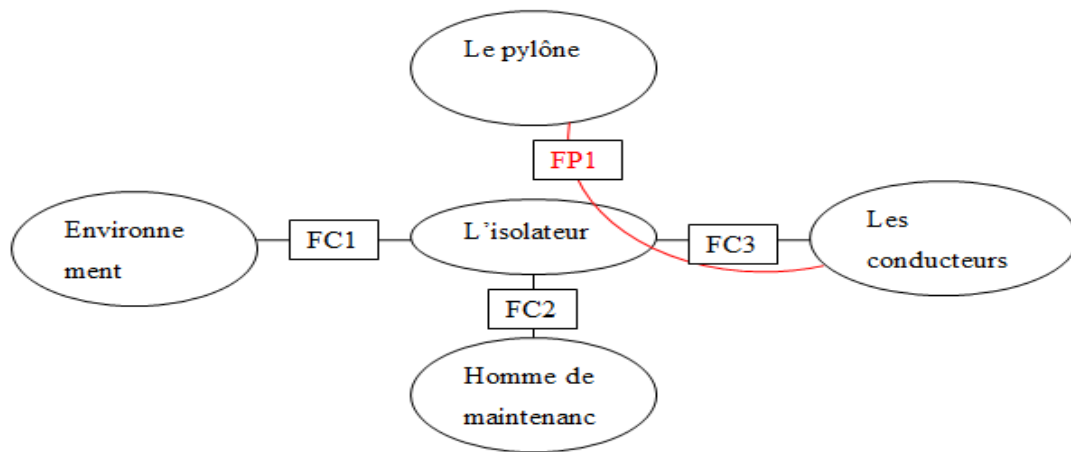


Figure IV.7 : Diagramme des inter-acteurs des fonctions d'isolateur

FP1 : Assurer l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports ;

FC1 : Résister aux conditions environnementales (les effets du vent, de la neige...) ;

FC2 : Permettre l'intervention en cas de défaillance ;

FC3 : Accrocher les conducteurs de phase au pylône.

IV.4.3 Identification des fonctions des éléments

Il s'agit d'identifier clairement les éléments à étudier et leurs fonctions / phases à étudier, le but étant d'analyser, pour chaque élément, les risques des défaillances peuvent subir.

IV.4.3.1 Fonctions des éléments du conducteur

Commençant toujours par le conducteur, les différentes fonctions de cet élément présentées par la figure IV.8 ci-dessous :

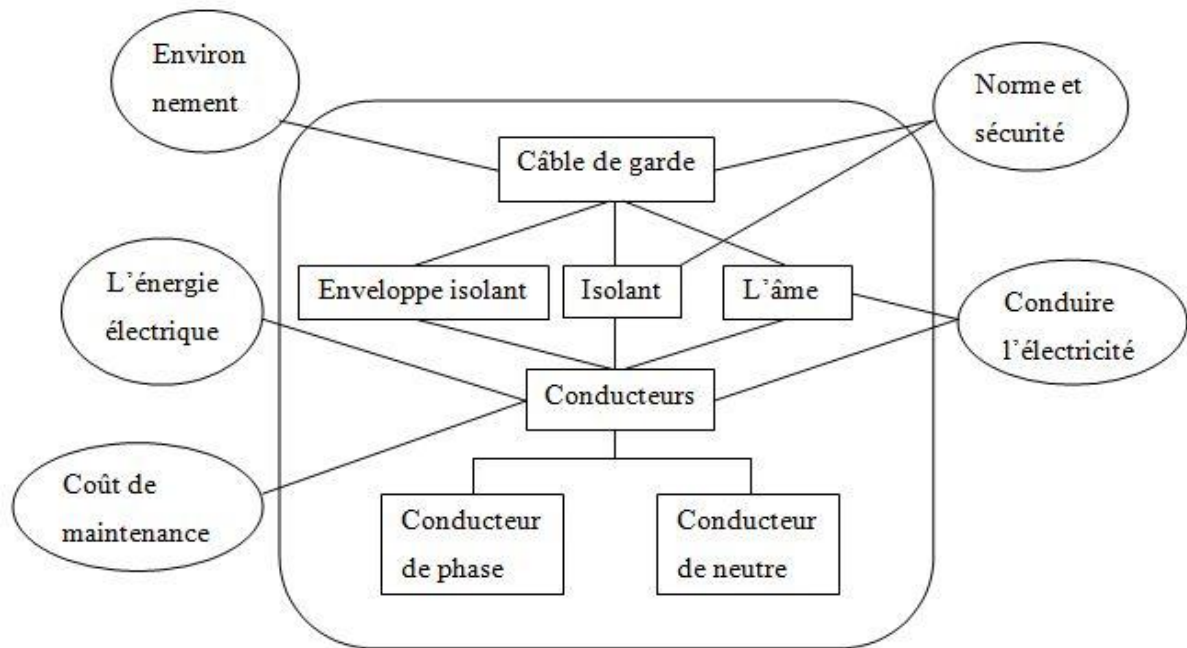


Figure IV.8 : Diagramme fonctionnel des éléments du conducteur

IV.4.3.2 Fonctions des éléments de pylône

La figure IV.9 représente les différentes fonctions de pylône.

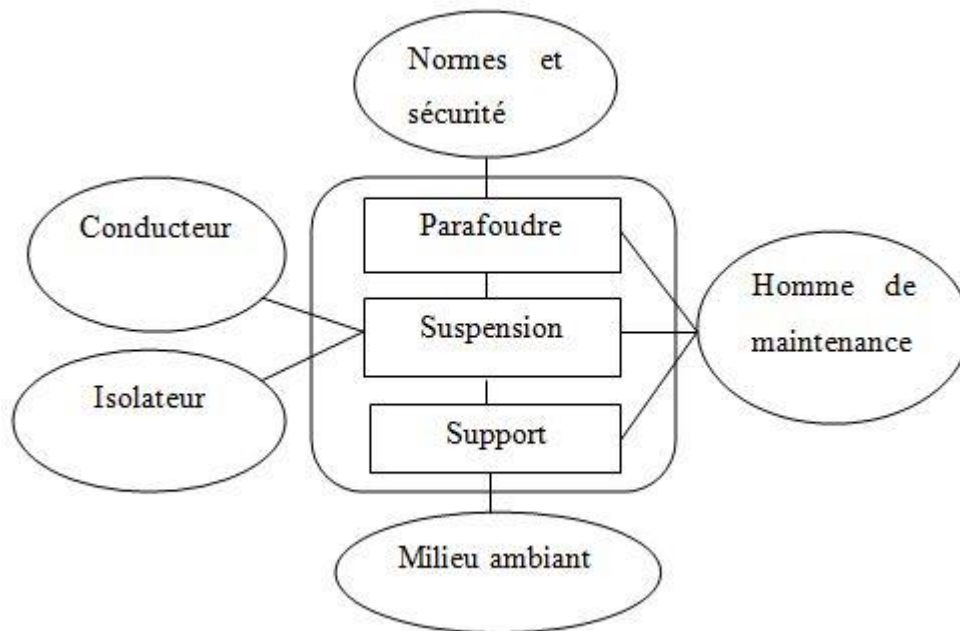


Figure IV.9 : Diagramme fonctionnel des éléments de pylône

IV.4.3.3 Fonctions des éléments des isolateurs

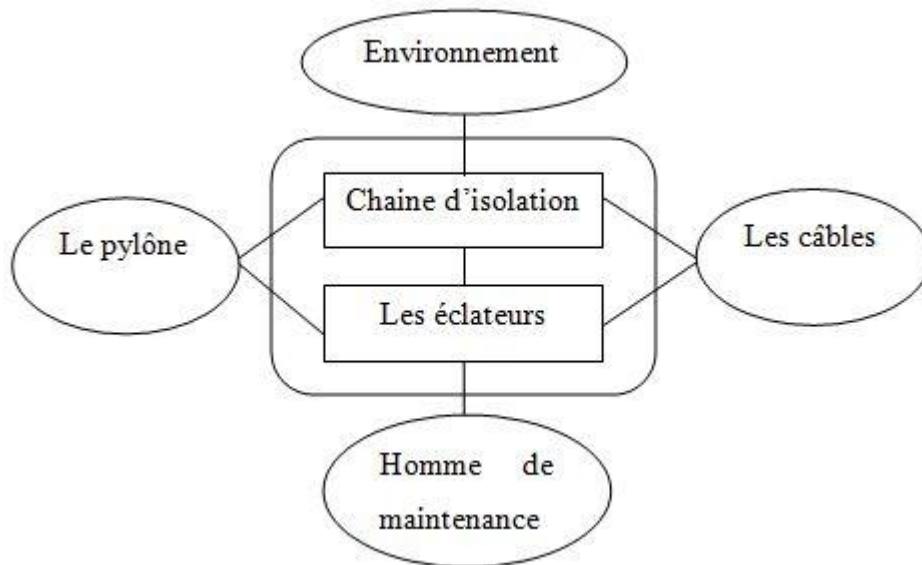


Figure IV.10 : Diagramme fonctionnel des éléments d'isolateur

IV.5 Analyse des défaillances (analyse AMDEC)

Après avoir suivi les étapes détaillées qui ouvrent la voie à l'élaboration AMDEC de la ligne étudiée, en fonction des différentes pannes et de leur récurrence, nous avons créé un tableau prévisionnel des pannes et calculé toutes les transactions liées au tableau AMDEC, ce que nous avons expliqué en détail comment calculer chaque paramètre dans le deuxième chapitre.

Le tableau IV.4 représente l'analyse des modes de défaillance de leurs effets et leur criticité pour la ligne électrique haute tension Ghardaïa- Ouargla.

Tableau IV. 4 : Analyse des modes de défaillance de leurs effets et leur criticité

Date de l'analyse	AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ							Phase de fonctionnement :	Page :
	Système : la ligne électrique			Organe : pylône, conducteur et isolateur					Nom :
Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effet de la défaillance	Détection	Criticité				Action Corrective	
				F	G	N	$C = F * G * N$		
01	Pollution de la ligne	Tempête de sable	Coupure d'électricité Métlili et Mansourah, Arrêt d'approvisionnement par cette ligne Coupure d'électricité N'Goussa ; Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Visuelle	02	04	01	08	Aucune modification Maintenance corrective
02	Manque accessoire ligne (entretoise, contre poids ...)	Possibilité de vol	Sans effet	Visuelle	02	03	01	06	Aucune modification Maintenance corrective
03	Dégradation peinture pylônes	Conditions climatique	Risque de corrosion des pylônes	Visuelle	02	03	01	06	Aucune modification Maintenance corrective
04	Mauvaise résistance de terre de quelques pylônes	Durée de l'installation	Risque d'électrification	Détection difficile	02	03	03	18	Surveillance particulière Maintenance préventive conditionnelle

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

05	Isolateurs cassée ou amorcés	Surcharge (demande d'électricité élevée)	Coupure d'électricité Zelfana	Par agent de maintenance	03	03	02	18	Surveillance particulière Maintenance préventive conditionnelle
			Coupure d'électricité Métlili et Mansourah						
06	Câble conducteur blessé	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa	Par agent de maintenance	02	03	02	12	Amélioration Maintenance préventive systématique
			Coupure d'électricité N'Goussa						
07	Amorçage corbeaux ou nids de corbeau	Oiseaux	Coupure d'électricité Bordj chandez	Visuelle	02	03	01	06	Aucune modification Maintenance corrective
			Coupure d'électricité Ain Moussa						
08	Déclenchements suite défauts ligne	Court-circuit biphase	Coupure d'électricité Zelfana	Visuelle	02	03	01	06	Aucune modification Maintenance corrective
			Coupure d'électricité Ain Moussa						
09	Bretelles de continuité électrique abimées ou lâchées	Mauvais serrage	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Par opérateur	01	03	01	03	Aucune modification Maintenance corrective

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

10	Isolateurs amorcés suite pollution	Tempête de sable	Coupure d'électricité Zelfana Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Visuelle	01	04	01	04	Aucune modification Maintenance corrective
11	Manque cornières pylônes	Possibilité de vol	Sans effet	Visuelle	01	03	01	03	Aucune modification Maintenance corrective
12	Chute de pylône	Forte vent	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Visuelle	01	04	01	04	Aucune modification Maintenance corrective
13	Déclanchement Reenclenchement Déclanchement	Pollution d'isolateur	Coupure d'électricité N'Goussa	Visuelle	01	02	01	02	Aucune modification Maintenance corrective
14	Chute d'un conducteur de deux lignes	Forte vent	Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Visuelle	01	04	01	04	Aucune modification Maintenance corrective
15	Câble blessé	Tempête de sable	Coupure d'électricité N'Goussa ; Arrêt d'approvisionnement par cette ligne	Par agent de maintenance	01	04	02	08	Aucune modification Maintenance corrective

IV.6 Synthèse

Dans cette partie finale de l'AMDEC, nous devons décider les actions correctives qu'il va mener face à toutes les défaillances que nous avons identifiées dans le tableau AMDEC (voir Tableau IV.4).

IV.6.1 Hiérarchisation des défaillances

Selon le tableau IV.5 qui montre la hiérarchisation des défaillances, on trouve que le mode lié à la résistance de la mise à terre ainsi les isolateurs sont les modes les plus critiques par une criticité de 18, suivi par le mode câble blessé avec $C = 12$,

D'autre part, le manque d'un cornier et les DRD sont les modes les moins critiques.

Tableau IV.5 : Liste décroissants des causes /modes selon leur criticité

Les modes	Criticité	Les causes
Mauvaise résistance de terre de quelques pylônes	18	Durée de l'installation
Isolateurs cassée ou amorcés	18	Surcharge
Câble conducteur blessé	12	Tempête de sable
Pollution de la ligne	08	Tempête de sable
Câble blessé	08	Tempête de sable
Manque accessoire ligne (entretoise, contre poids ...)	06	Possibilité de vol
Dégradation peinture pylônes	06	Conditions climatique
Amorçage corbeaux ou nids de corbeau	06	Oiseaux
Déclenchements suite défauts ligne	06	Court-circuit biphasé
Isolateurs amorcés suite pollution	04	Tempête de sable
Chute de pylône	04	Forte vent
Chute d'un conducteur de deux lignes	04	Forte vent
Bretelles de continuité électrique abimées ou lâchées	03	Mauvais serrage
Manque cornières pylônes	03	Possibilité de vol
Déclanchement Reenclenchement Déclanchement	02	Pollution d'isolateur

En vue de bien exploiter les résultats des criticités et donné une vision plus large, nous avons tracé un histogramme de nombre des causes par ordre croissant, d'où on obtient l'histogramme montré par la figure IV.11 ci-dessous :

Criticité	02	03	04	06	08	12	18
Causes	01	02	03	04	02	01	02

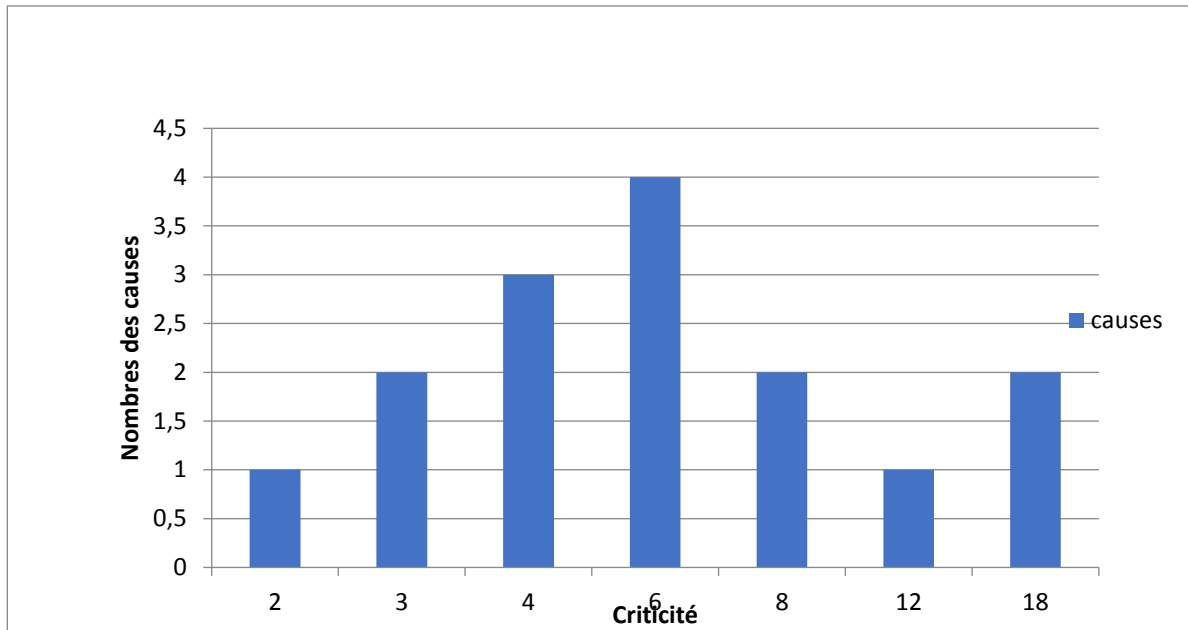


Figure IV.11 : Histogramme de nombres des causes

IV.6.2 Liste des points critiques

La figure IV.12 ci-dessous, montre une représentation des criticités des causes, a partir de cet histogramme, on constate qu'il y'a 3 catégories :

- Première catégorie : Représente 80% des causes qui ont une criticité $1 \leq C < 10$;
- Deuxième catégorie : Représente 6.66% des causes qui ont une criticité $10 \leq C < 18$;
- Troisième catégorie : Représente 13.33% des causes qui ont une criticité $18 \leq C < 27$.

Avec 80% des causes dont leur criticité est strictement inférieure à 10, mais on remarque clairement que les cause de ces résultats sont les plus élevés par 12 causes. Contrairement au premier cas, les cause critiques c.-à-d. la criticité est supérieure ou égale à 18 sont peu avec 13.33% causés par 2 causes. Pour les causes médianes, une seule cause est enregistrée avec très peu de criticité (6.66%)

Criticité	$1 \leq C < 10$	$10 \leq C < 18$	$18 \leq C < 27$
Causes	12	01	02
Pourcentage	80%	6.66%	13.33%

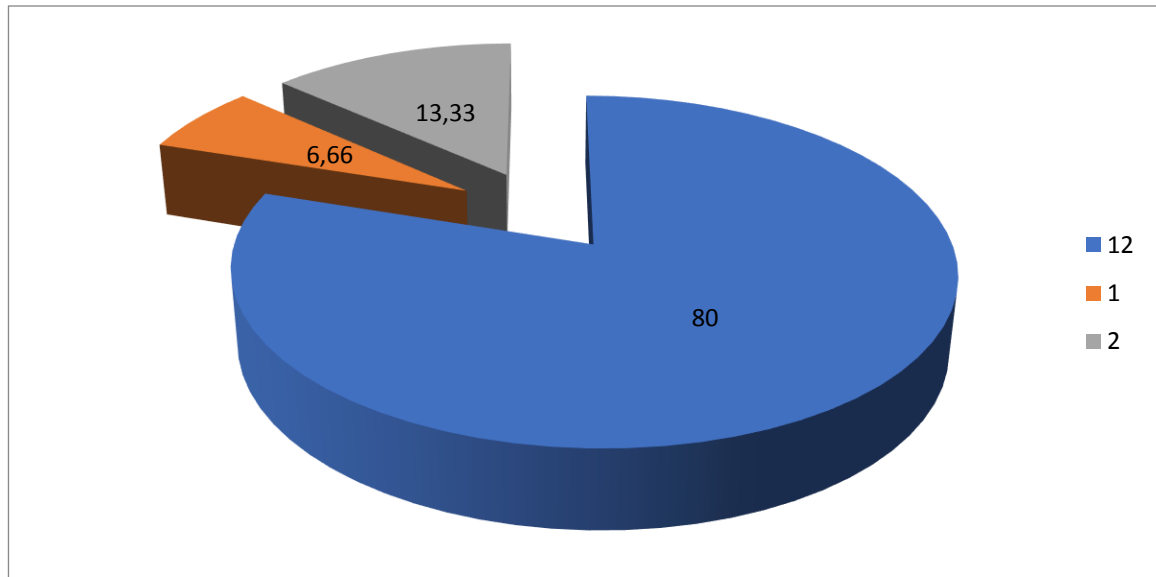


Figure IV.12 : Représentation de la criticité des causes

- **Interprétation**

On se basant sur le tableau IV.5 qui représente la liste décroissante, on trouve 02 causes de défaillances qui sont critiques.

	Causes critiques	Criticité
01	Durée de l'installation	18
02	Surcharge (demande d'électricité élevée)	18

IV.6.3 Liste des recommandations

IV.6.3.1 Proposition des actions correctives

En se basant sur la classification des défaillances suivant les valeurs des criticités, nous proposons des actions correctives générales et qui sont les suivantes :

- **Changement d'un organe ou de l'un de ses composants :**

Les organes influant sur la continuité du fonctionnement du système nécessitent un changement total.

Exemple 01 : Isolateurs cassée ou amorcés à criticité grave (C=18), Il nécessite d'être changé juste après la détection de la défaillance.

Exemple 02 : Chute des pylônes, des précautions intensives soient prises lors de l'érection et de l'installation des tours (correction de la pente, remplissage des trous débouchés, serrage des boulons, soudage par points, rectitude des membres de la tour, etc.). Dans les zones sujettes au vol, la fréquence des patrouilles doit être augmentée et l'assistance de la population locale doit être sollicitée pour éviter la défaillance des tours.

• **Contrôle et vérification d'un organe ou de l'un de ses composants**

Dans le cas d'un organe difficile à contrôler par l'opérateur et qui induit une défaillance critique, le contrôle nécessite des actions spéciales ; démontage, appareillage, ...etc. Ce qui induit à une période de contrôle grande.

Exemple 01 : Mauvaise résistance de terre de quelques pylônes, à criticité (C=18), l'installation des pylônes doit être soumise à des contrôles et des vérifications systématiques des fondations.

Exemple 02 : Câble conducteur blessé, ce mode de défaillance avec criticité (C=12) peut induire des problèmes énormes dans le système (Coupure d'électricité...), ce qui nécessite un contrôle difficile par des appareils.

Dans le cas d'un organe qui facile à contrôler par l'opérateur (détection facile) Le contrôle doit être fait périodiquement.

Exemples : Manque accessoire ligne (entretoise, contre poids ...), dégradation peinture pylônes, Amorçage corbeaux ou nids de corbeau

• **Nettoyage**

La pollution de l'isolateur ou des lignes complètement à cause de tempête de sable peut induire des défauts dans le fonctionnement de la ligne, ce qui nécessite des opérations de nettoyage.

IV.7 Mise en place d'un plan de maintenance sur la ligne de transport électrique

Après avoir terminé l'analyse de dysfonctionnement de la ligne de transport électrique GHARDAIA-OUARGLA nous avons établis la liste des opérations de maintenance préventive mensuelle, semestrielle et annuelle à effectuer sur cet équipement :

Tableau IV. 6 : Plan de maintenance préventive de la ligne GHARDAIA-OUARGLA

Système : Ligne de transport électrique Atelier : GRTE										
N	Opérations	Durée (h)	Intervenant	Périodicité						Observation
				J	H	M	T	S	A	
01	Assurer l'installation des pylônes et contrôler les fondations	48	Ingénieurs						×	Consulter des ingénieurs de génie civil avant l'installation des pylônes

Chapitre IV : Etablissement d'AMDEC d'une ligne de transport électrique

02	Vérification des isolateurs	24	Opérateurs			×			Changer l'isolateur en cas de défaillance
03	Nettoyage de la ligne de transport électrique.	24	Opérateurs				×		Coupure de l'électricité avant le nettoyage
04	Contrôler par des appareils pour les câbles conducteurs	12	Techniciens			×			Changer les câbles blessés
05	Vérification de la pente, des corniers pylônes, des trous, serrage des boulons, soudage par points, rectitude des membres de la tour et la dégradation de la peinture	10	Opérateurs			×			Prendre en considération le milieu extérieur et les conditions climatiques
06	Contrôle des bretelles de continuité électrique	5	Opérateurs				×		Changement en cas de défaillance

IV.8 Conclusion

Avec l'aide de l'historique des pannes de la ligne 220kV GHARDAIA-OUARGLA et en appliquant l'une des méthodes de sûreté de fonctionnement nous avons réussi à effectuer un plan de maintenance préventive par l'analyse AMDEC qui se base sur des différents modes de défaillances potentielles d'après les indices de Criticité, ce qui nous a permis de déterminer les défaillances les plus critiques et de proposer un ensemble des actions afin d'améliorer la maintenance et le fonctionnement de notre système.

Conclusion générale

Conclusion générale

À la suite des études réalisées, mise en place d'un plan d'actions avec identification des défaillances d'une ligne électrique haute tension dans notre cas la ligne 220kV GHARDIA-OUARGLA de leurs causes, leur effet et criticités, ce qu'on appelle la méthode AMDEC, différentes déductions, remarques et recommandations ont été enregistrés dont l'objectif et d'améliorer la maintenabilité et la disponibilité de cette ligne importante, parmi eux on peut citer les suivants :

La méthode AMDEC, malgré sa complexité, demande d'historique détaillé sur le système étudié, montre sa puissance dans la mise des plans de maintenance préventive efficace.

La ligne électrique étudiée montre deux cause critiques qu'il faut faire attention aux ces deux derniers.

Enfin, des recommandations ont été proposées à la fin du dernier chapitre en vue de minimiser la criticité des causes, tel que le changement des isolateurs dès que la détection de la défaillance pour éviter les causes critiques liées à cet élément.

Sans aucun doute, cette étude nécessite encore d'autres études pour confirmer les résultats obtenus et ainsi donner plus d'efficacité au plan de maintenance préventive proposé selon la méthode AMDEC.

Sur cette base, nous suggérons ce qui suit :

- Étudiez la ligne électrique d'autres manières, telles que Pareto et FMD, et comparez les résultats obtenus avec celles obtenus ici ;
- S'appuyer sur une longue archive de défauts de la ligne électrique ;
- La coordination se poursuit avec l'entreprise chargée d'entretenir les lignes et d'essayer de mettre en œuvre les résultats sur le terrain.

Ces points ne sont que des suggestions qui peuvent être approfondies

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] DELOUX Estelle, « *Politiques de maintenance conditionnelle pour un système à dégradation continue soumis à un environnement stressant* », Thèse de Doctorat en Automatique et Informatique Appliquée, Université de Nantes, l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes, France, 2008.

[2] M. BENZAOUI, « *Maintenance des systèmes industriels* », support de cours de masters : Génie Industriel, Université de Batna2, Algérie, 2020.

[3] BENAICHA Halima, « *Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle* », Thèse de Doctorat En-sciences, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf, Algérie, 2015.

[4] JEAN-MARIE Auberville, « *Maintenance Industrielle de L'entretien de base à l'optimisation de la sûreté* », Hermès, Paris, 1995.

[5] DJAMEL Halimi, « *Contribution à l'amélioration de la maintenance préventive des machines dynamiques dans l'industrie des hydrocarbures* », Thèse de Doctorat En Fiabilité et Maintenance industrielle, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, Algérie, 2014.

[6] LAURENS Jérémy, « *Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique* », Thèse de Docteur en Pharmacie, Université Joseph Fourier, Faculté De Pharmacie De Grenoble, France, 2011.

[7] SAAD Mohamed, « *Méthode et organisation de la maintenance* », Support de cours de master maintenance industrielle, Université Ibn Khaldoun, Tiaret, Algérie, 2020.

[8] A. Belhomme, « *Stratégie de maintenance* », support de cours, 2010/2011. Disponible En ligne : <http://btsmiforges.free.fr/>

[9] ABDALLAH Mohammed, « *Optimisation de la maintenance préventive de système de production incorporant la dépendance par les méta-heuristique* », Thèse de Doctorat En Génie Des Systèmes Industriels, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbes, Algérie, 2015.

[10] CHAFAI Mahfoud, « *Management de la maintenance industrielle* », Edition LAVOISIER, 2006.

[11] PIERRE Cochetoux, « *Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels* », Thèse de Doctorat En Automatique, Traitement du signal et des images, Génie informatique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2010.

[12] RACHIDI Abdelhafid, TALBI Abdennebi et KHATORY Abdellah, « *The industrial maintenance: a function by mutation and the skills in evolution* », International Journal of

[13] F. Castellazzi, Y. Gangloff et D. Cogniel, « *Mémotech maintenance industrielle* », Editions CASTEILLA-25, Paris 1998.

[14] GUETARNI Islam Hadj Mohamed, « *Analyse Quantitative des Risques : Application sur les Bacs de Stockage* », Thèse de Doctorat En Sécurité Industrielle et Environnement Université d'Oran 2, Algérie, 2019.

[15] KOSSI PELOPE Adzakpa, « *Maintenance des systèmes distribués : méthodes d'aide à la décision temps-réel* », Thèse de Doctorat en Optimisation et Sûreté Des Systèmes, L'université De Technologie De Troyes, France, 2004.

[16] GILLES Zwingelstein, « *Diagnostic des défaillances* » Edition Hermès, Paris 1995.

[17] GABRIEL ANTONIO Perez Castaneda, « *Evaluation par simulation de la Sûreté de fonctionnement de systèmes en contexte dynamique hybride* », Thèse de Doctorat en automatique et traitement du signal, Institut National polytechnique de Lorraine, France, 2009.

[18] PASCAL Denis, PIERRE Boye et ANDRE Bianciotto, « *Guide de la maintenance industrielle* », Edition DELAGRAVE – 2008.

[19] AHMED bellaouar et SALIMA Beleulmi, « *Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité* », support de cours, Université Constantine 1, Faculté des sciences de la Technologie Département Génie des transports, Algérie, 2014.

[20] JEAN Héng, « *Pratique de la maintenance préventive* », 3^{ème} Edition Dunod, 2002.

[21] JOSEPH Kelada « *L'AMDEC* » Ecole des Hautes Etudes Commerciales, centre d'étude en qualité totale, 1994.

[22] PATRICK Lyonnell, « *Ingénierie de la fiabilité* », Edition LAVOISIER, 2006.

[23] MARC Thomas, « *Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines* », Presses de l'Université du Québec, 2012.

[24] TALEB Mounia, « *Surveillance, détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant L'analyse fonctionnelle* », Thèse de Doctorat en Electromécanique, Université du 20 Août 1955 Skikda, Algérie 2018.

[25] MERAHI Amir, « *Analyse des réseaux de transport et de distribution* », support de cours de Ecole Supérieur en Génie Electrique et Energétique d'Oran, département de Génie Electrique, 2018/2019.

[26] BENALI Abdelkrim, « *Réseaux Electriques* », support de cours, Nour El Bachir El Bayadh Algérie, 2017 /2018, Disponible En ligne : https://www.cu-elbayadh.dz/ar/wp-content/uploads/2018/01/Polycopie-R%C3%A9seaux-Electriques_corr-1.pdf.

[27] AOUZELLAG LAHAÇANI Narimen, « *réseaux électriques* », support de cours de licence électrotechnique, Université A. MIRA-BEJAIA, Algérie, 2017.

[28] LILIEEN Jean-Louis, « *Transport et distribution de l'énergie électrique* », manuel de travaux pratiques destiné au cours, Université de Liège Faculté des Sciences Appliquées, 2012.

[29] TEFEGUIM Vanilli Sandra, « *étude de la construction d'une ligne électrique haute tension 90kv PA-WONA* » Mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, génie électrique et énergétique, Burkina Faso, 2013/2014.

[30] Document interne de l'entreprise (historique des pannes 2019)

الملخص

أنظمة إنتاج الطاقة الحالية فعالة للغاية ولها أنظمة أمان لا مثيل لها. ومع ذلك ، فهي تتطلب الكثير من الصيانة والاهتمام الخاص فيما يتعلق بإدارتها وسياسة الصيانة المطبقة عليها. هذه الوثيقة عبارة عن أطروحة نهاية الدراسات التي نقدم فيها عمل تحليلي تم إجراؤه على خطوط نقل التيار المتردد للطاقة الكهربائية لغرداية ورقلة. كان الغرض من هذا FMEA التحليل هو وضع خطة صيانة وقائية تعتمد على تقنية

: الكلمات الدالة

، الصيانة ، الموثوقية ، التوفر ، أوضاع الفشل ، التحليل الوظيفي ، الأهمية FMEA

Résumé

Les systèmes de production d'énergie actuels sont très performants et possèdent des systèmes de sécurité hors-pairs. Cependant ils demandent beaucoup d'entretien et une attention particulière en ce qui concerne leur gestion et la politique de maintenance qui leur est appliquée. Le présent document est un mémoire de fin d'études dans lequel nous présentons un travail d'analyse effectué sur les lignes de transport en courant alternatif de l'énergie Electrique du GHARDAIA-OUARGLA. Cette analyse a eu pour but d'établir un plan de maintenance préventive basé sur la technique AMDEC.

Mots Clés :

AMDEC, Maintenance, Fiabilité, Disponibilité, Modes de défaillances, Analyse fonctionnelle, Criticité

Abstract

Existing power generation systems are highly efficient and have unparalleled safety systems. However, it requires a lot of maintenance and special attention to its management and maintenance policy applied to it. This document is a dissertation in which we present an analysis work carried out on the alternating current transmission lines for electrical energy in GHARDAIA-OUARGLA. The purpose of this analysis was to develop a preventive maintenance plan based on FMEA technology.

Key words :

FMEA, Maintenance, Reliability, Availability, Failure Modes, Functional Analysis, Importance.
