

---

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



---

## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

### Thème

***ANALYSE ET DIAGNOSTIC D'UN ALTERNATEUR  
POUR GROUPE ELÉCROGÈNE***

Préparé par :

***AOUAD Mohamed Amine et BELFEDHAL Yaakoub***

Soutenu publiquement le : **20/06/2024**, devant le jury composé de :

<i>M. ATHMANI Houari.</i>	<i>Maître assistant "A" (Université de Tiaret)</i>	<i>Président</i>
<i>M. NEGADI Karim</i>	<i>Professeur (Université de Tiaret)</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. BOUREGUIG Kada</i>	<i>Maître de conférences "A" (Université de Tiaret)</i>	<i>Examineur</i>
<i>M. ARARIA Rabah</i>	<i>Maître de conférences "B" (Université de Tiaret)</i>	<i>Encadrant</i>
<i>M. GUEMMOUR Mohamed</i>	<i>Maître de conférences "B" (Université de Tiaret)</i>	<i>Co-Encadrant</i>

*Année universitaire : 2023 - 2024*

---

## Remerciements

---

On tient avant tout à remercier chaleureusement Monsieur GUEMMOUR Mohamed Boutkhalil, Maître de conférences classe "B" à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret et Monsieur ARARIA Rabah, Maître de conférences classe "B" de nous avoir encadré et assuré le suivi de notre travail. En nous faisant confiance depuis le début de nos travaux, ils ont su diriger ce travail tout en nous laissant une complète autonomie. On les remercie non seulement pour leur qualité d'encadrement mais également pour l'inestimable qualité humaine dont ils ont toujours fait preuve. On est reconnaissant de l'honneur que nous ont fait Monsieur NEGADI Karim Professeur à l'université de Tiaret et Monsieur BOUREGUIG Kada Maître de conférences classe "A" à l'université de Tiaret pour avoir accepté de prendre part au jury. On les remercie vivement d'avoir accepté la tâche d'évaluer notre mémoire en qualité d'examineurs, en consacrant de leur précieux temps à l'examen, à l'évaluation de notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail. On les remercie aussi pour la patience et la pertinence dont ils ont fait preuve à la lecture de ce document afin de l'expertiser et estimer sa valeur scientifique. On remercie tout autant Monsieur ATHMANI Houari, Maître assistant classe "A" à l'université Ibn Khaldoun de tiaret, pour avoir accepté de prendre part au jury, de le présider et de proclamer le résultat de la délibérations du jury notre soutenance. Aussi, nous n'oublions pas Monsieur MATMATI Mohamed Technicien supérieur chez la Société de Distribution d'électricité et gaz du groupe SONELGAZ qui nous a beaucoup aidés à accomplir ce travail.

Enfin, on tient aussi à remercier l'équipe pédagogique, constituée de l'ensemble des enseignants permanents et vacataires qui ont assurés notre formation durant notre cycle de master, ainsi que l'équipe de formation, constituée du responsable de filière et du responsable de la spécialité qui ont assurés la promotion de la spécialité maintenance industrielle, sans oublier le staff administratif du département de génie mécanique qui a veillé à l'organisation, la planification, le contrôle et le suivi des activités pédagogiques .

# Table des matières

---

Remerciements	i
Table des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Acronymes	viii
Nomenclature	1
Introduction Générale	3
1 Introduction générale . . . . .	3
<b>I OUTILS D'ANALYSE ET DE DIAGNOSTIC DES SYSTÈMES TECHNIQUES</b>	<b>5</b>
1 Introduction . . . . .	6
2 ANALYSE FONCTIONNELLE . . . . .	6
2.1 Définition . . . . .	6
2.2 Analyse fonctionnelle externe . . . . .	6
2.3 Outils d'analyse fonctionnelle externe . . . . .	7
2.3.1 Méthode APTE . . . . .	7
2.3.2 Diagramme des prestations . . . . .	7
2.4 Diagramme des interacteurs . . . . .	8
2.5 Démarche : . . . . .	9
3 Analyse fonctionnelle interne (AFI) ou analyse fonctionnelle technique . . . . .	10
3.1 Outil FAST : . . . . .	11
3.2 Outil SADT : (Structured Analysis Design Technic) . . . . .	12
4 ANALYSE DYSFONCTIONNELLE . . . . .	13
4.1 Outils statiques . . . . .	13
4.1.1 Arbre de défaillance (AdD) . . . . .	13
4.1.2 Outil AMDEC . . . . .	14
4.2 Les outils dynamiques . . . . .	18
4.2.1 Outil pétri . . . . .	18
4.2.2 Chaines de Markov . . . . .	19
5 CONCLUSION . . . . .	22
<b>II INTRODUCTION AUX ALTERNATEURS POUR GROUPES ÉLECTROGÈNES</b>	<b>23</b>

1	Introduction	24
2	Groupe électrogène	24
3	ALTERNATEUR	25
3.1	Loi de Faraday	26
3.2	Principe de fonctionnement	26
3.3	Description des constituants d'un alternateur	27
3.4	La technologie des générateurs synchrones et asynchrones	27
3.5	Le stator :	28
3.5.1	Construction	29
3.6	Rotor	29
3.6.1	Construction	29
4	Classification des alternateurs	30
4.1	Alternateurs monophasés	30
4.1.1	Fonctionnement	30
4.1.2	Conception	31
4.1.3	Applications	31
4.1.4	Avantages et inconvénients	32
4.2	Alternateurs triphasés	32
5	Mode de défaillance	35
5.1	Diagramme Ishikawa (causes-effet)	35
5.2	Recherche des causes avec la méthode Ishikawa	36
6	Conclusion	37
<b>III ÉTUDE DE CAS : ARBRE DE DÉFAILLANCE D'UN ALTERNATEUR DE GE</b>		
1	Introduction	39
2	ARBRE DE DEFAILLANCE	39
2.1	Définition	39
2.2	Objectifs	40
2.3	Représentation graphique	40
2.4	Portes logiques	41
2.5	Principe	42
2.6	Démarche et construction de l'AdD	42
2.7	Analyse qualitative	43
2.8	Analyse quantitative :	44
2.9	Caractéristiques	44
2.10	Construction d'un arbre de défaillance	44
2.11	Conditions	46
3	APPLICATION	46
3.0.1	Identification de l'évènement redouté et les évènements probables	46

3.1	Logiciel de simulation . . . . .	49
3.1.1	Netica . . . . .	49
3.1.2	Objectifs de Netica . . . . .	49
3.1.3	Interface de Netica . . . . .	50
3.2	Interprétation et discussion . . . . .	54
4	Conclusion . . . . .	54
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>57</b>
5	Conclusion général . . . . .	57
	<b>Bibliographie</b>	<b>60</b>

# Table des figures

---

Figure. I.1 : Aperçu du diagramme des prestations [1]. . . . .	8
Figure. I.2 : Exemple du diagramme des prestations [1]. . . . .	8
Figure. I.3 : Illustration de diagramme des interacteurs. . . . .	9
Figure. I.4 : Diagramme des interacteurs du monte-charge [2]. . . . .	10
Figure. I.5 : Diagramme FAST. . . . .	12
Figure. I.6 : Diagramme d'activité, d'action sur la matière d'œuvre [3]. . . . .	13
Figure. I.7 : Diagramme d'activité, d'action sur la matière d'œuvre [3]. . . . .	14
Figure. I.8 : L'organigramme de la démarche AMDEC [4] . . . . .	17
Figure. I.9 : Exemple d'un réseau de Petri [5] . . . . .	19
Figure. I.10 : chaine Markov d'un composant unique [6]. . . . .	20
Figure. I.11 : chaine Markov d'un deux composant [6]. . . . .	21
Figure. I.12 : chaine Markov d'un deux composant [7]. . . . .	21
Figure. II.1 : Une configuration typique de groupe électrogène. . . . .	25
Figure. II.2 : principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. . . . .	26
Figure. II.3 : principe de fonctionnement d'un rotor et un stator . . . . .	27
Figure. II.4 : alternateur STAMFORD 4 pôles 15 kVA (20, 39HP) [8] . . . . .	27
Figure. II.5 : Différents types de stators d'un alternateur [19]. . . . .	29
Figure. II.6 : Rotor d'un alternateur[19]. . . . .	30
Figure. II.7 : Alternateur groupe électrogène triphasé 6 kVA . . . . .	31
Figure. II.8 : Alternateur à aimant permanents. . . . .	34
Figure. II.9 : Diagramme d'Ishikawa [23]. . . . .	36
Figure. II.10 : Alternateur à aimant permanents. . . . .	37
Figure. III.1 : Schéma de l'Arbre de de défaillance.[21] . . . . .	40
Figure. III.2 : Démarche de l'arbre de défaillance . . . . .	43
Figure. III.3 : Portes logiques : a) ET et b) OU . . . . .	46
Figure. III.4 : Arbre de défaillance d'un Alternateur de groupe électrogène. . . . .	48
Figure. III.5 : Interface graphique de Netica 4.16. . . . .	50
Figure. III.6 : probabilités de décision de l'événement favorable. . . . .	51
Figure. III.7 : Probabilités des évènements de fonctionnement. . . . .	51
Figure. III.8 : Simulation de l'alternateur en état de fonctionnement. . . . .	52

Figure. III.9 : TPC de l'évènement redouté . . . . .	53
Figure. III.10 : Probabilités des évènements. . . . .	53
Figure. III.11 : Simulation de l'alternateur en état de dysfonctionnement. . . . .	54

# Liste des tableaux

---

Tableau. I.1 : Présentation graphique de l'AMDEC [9]. . . . .	18
Tableau. II.1 : Présentation typique de groupe électrogène. . . . .	25
Tableau. III.1 : Symboles des événements dans les arbres de défaillances. . . . .	41
Tableau. III.2 : Symboles des portes dans les arbres de défaillances . . . . .	42
Tableau. III.3 : Liste des événements probables. . . . .	47

# Acronymes

---

<b>Apte</b>	Application aux Techniques d'Entreprise.
<b>CdCf</b>	Cahier des charges fonctionnel.
<b>FAST</b>	Functional Analysis System Technique.
<b>SADT</b>	Structured Analysis Design Technic.
<b>Add</b>	Watt-crête.
<b>GE</b>	groupe électrogène
<b>AMDEC</b>	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité).
<b>MEE</b>	Méthode de l'Espace d'État.
<b>RdP</b>	Réseaux de pétri .
<b>MTTF</b>	Mean time to failure .
<b>MTBF</b>	Mean time between failures.
<b>MTTR</b>	Système de Mean time to repair.
<b>FEM</b>	Force Électromotrice .
<b>5M</b>	Milieu ,Méthode ,Main d'ouvre ,Matières ,Matériels.
<b>RCFA</b>	Roots Cause Failure Analysis.

# Nomenclature

---

Symbole	description	Unité
$E$	Force électromotrice induite.	$V$
$\phi$	flux magnétique.	$Wb$
$P_m$	Puissance mécanique.	$W$
$S$	Puissance apparente.	$VA$
$\eta$	Rendement.	–
$B$	Densité de flux magnétique.	$T$
$L$	L'inductance.	$H$
$R$	Résistance.	$\Omega$
$V_{a,b,c}$	Tension induite chaque phase.	$V$
$i_{a,b,c}$	Courant .	$A$
$J$	Moment d'inertie du rotor.	$kg.m^2$
$T_{mec}$	couple mécanique appliqué.	$Nm$
$T_{elec}$	couple électromagnétique produit.	$Nm$

# Introduction générale

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## 1 Introduction générale

Le contenu du présent travail s'inscrit dans un contexte technologique, en relation avec le secteur électromécanique et en particulier la production de l'énergie électrique. Le processus de cette production, est assuré par des groupes électrogène telles que les alternateurs.

Dans notre cas, il s'agit des groupes électrogènes installés comme une source de secours en production électrique. Un groupe électrogène est constitué de deux parties essentielles : un moteur à combustion interne et un alternateur (ou génératrice). Ce dernier convertit l'énergie mécanique fournie par le moteur en énergie électrique pour assurer sans interruption l'alimentation en énergie électrique demandée par l'utilisateur. Cette fonction ne peut se réaliser qu'en garantissant la disponibilité de l'alternateur.

A cet effet, la fonction maintenance aura pour mission d'assurer la disponibilité opérationnelle du groupe électrogène, et en particulier dans notre cas les alternateurs. Ces derniers, doivent être apte à pouvoir produire de l'électricité à tout moment. C'est une prestation de service de qualité qui permet d'atteindre les objectifs tracés par l'utilisateur pour parer au manque en matière d'énergie électrique. Dans le cadre de notre travail, on a traité l'une des deux activités de la fonction maintenance, à savoir l'activité technique de diagnostic machine. Ainsi notre centre d'intérêt était un alternateur de marque STAMFORD du groupe électrogène marque Volvo.

Le problème rencontré dans l'utilisation des installations à base de groupes électrogène, concerne l'amélioration de leur efficacité énergétique et l'augmentation de leur rendement afin de diminuer le niveau de la facture d'électricité. L'efficacité énergétique, quant à elle, concerne la consommation d'énergie par le moteur thermique et l'alternateur pour produire une certaine quantité d'électricité à exploiter. L'efficacité avec laquelle l'énergie électrique est consommée par l'utilisateur final est mesurée par le niveau de la facture d'électricité. La

diminution du niveau de cette dernière devient un défi crucial chez l'utilisateur.

Une facture élevée signifie que l'énergie est utilisée de manière inefficace, ce qui peut entraîner des pénalités financières de la part du fournisseur d'électricité et des charges supplémentaires sur le réseau électrique. En outre, une diminution du rendement de groupe électrogène entraîne une perte significative d'énergie, ce qui se traduit par des coûts opérationnels plus élevés et une inefficacité globale du système. Dans notre cas, le rendement énergétique des alternateurs se réfère à leur capacité de convertir efficacement l'énergie mécanique en énergie électrique. Une inefficacité énergétique peut résulter de plusieurs facteurs, tels que l'usure des pièces mécaniques, vieillissement des composants électriques et électroniques, erreurs de calibration ou des problèmes de maintenance qui peuvent réduire la durée de vie des groupes électrogènes nécessitant des interventions de maintenance plus efficaces et coûteuses.

Notre objectif est de fournir aux hommes de maintenance un outil d'aide pour diagnostiquer qualitativement et quantitativement les défaillances qui peuvent survenir au niveau d'un alternateur de type synchrone ou asynchrone afin d'améliorer sa disponibilité et garantir sa longévité.

Pour ce faire, notre travail, a été synthétisé en un mémoire structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré d'une manière générale aux outils d'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle et de diagnostic des systèmes techniques et leur classification. Le deuxième chapitre présente en premier lieu les alternateurs pour groupes électrogènes, leurs types et leur fonctionnement et en deuxième lieu leurs modes de défaillance probables et la recherche des causes par la méthode d'Ishikawa. Enfin, le troisième chapitre est une étude de cas réservée à l'application de l'arbre de défaillance comme outil de diagnostic des défauts de l'alternateur, avec une analyse quantitative et simulation avec logiciel Netica qui est basé sur les réseaux bayésiens. À la fin, une conclusion a été donnée pour clôturer notre travail.

Chapitre

I

# OUTILS D'ANALYSE ET DE DIAGNOSTIC DES SYSTÈMES TECHNIQUES

---

# 1 Introduction

La sûreté de fonctionnement est une discipline essentielle qui étudie les défaillances des systèmes techniques, en incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. Elle vise à garantir que les utilisateurs puissent avoir une confiance justifiée dans la qualité du service délivré par un système. Les défaillances, erreurs et fautes constituent les principales entraves à la sûreté de fonctionnement. Une défaillance survient lorsque le service délivré dévie de l'accomplissement de la fonction du système. Une erreur est une partie de l'état du système susceptible de provoquer une défaillance, tandis qu'une faute est la cause adjugée ou supposée de cette erreur. L'analyse fonctionnelle précède généralement une étude de sûreté de fonctionnement et permet de définir les limites matérielles du système, les différentes fonctions et opérations réalisées, ainsi que les diverses configurations d'exploitation. Cette analyse se divise en deux parties : l'analyse fonctionnelle externe, qui se concentre sur l'usage du produit et les fonctions qu'il doit assurer pour satisfaire le besoin du client, et l'analyse fonctionnelle interne, qui vise à améliorer le fonctionnement ou les propriétés du produit en étudiant son architecture interne et les fonctions techniques des sous-ensembles ou composants.

## 2 ANALYSE FONCTIONNELLE

### 2.1 Définition

Une analyse fonctionnelle, en général, précède une étude de sûreté de fonctionnement. Une première analyse fonctionnelle permet de définir avec précision les limites matérielles du système étudié, les différentes fonctions et opérations réalisées par le système ainsi que les diverses configurations d'exploitation. L'analyse fonctionnelle permet de réaliser une décomposition arborescente et hiérarchique du système en éléments matériels et/ou fonctionnels. Elle décrit également des fonctions dans le système [5].

### 2.2 Analyse fonctionnelle externe

Lorsque l'analyse fonctionnelle concerne l'usage du produit, c'est-à-dire les fonctions qu'il doit assurer pour satisfaire le besoin du client. Le produit est alors considéré comme une «

boite noire » et seules les fonctions qui « sortent » de la boîte vers l'extérieur sont à prendre en considération. Cette forme d'analyse intitulée analyse fonctionnelle externe ou expression fonctionnelle du besoin exprime le point de vue du client-utilisateur et met en évidence les fonctions de service [1].

## 2.3 Outils d'analyse fonctionnelle externe

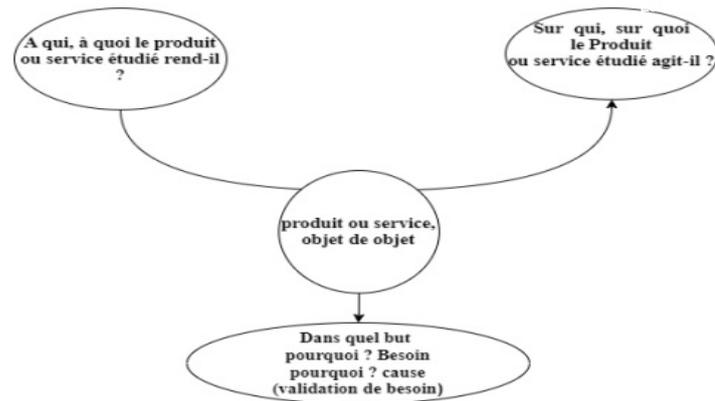
### 2.3.1 Méthode APTE

La méthode APTE (Application aux Techniques d'Entreprise) est une méthode universelle pour la conduite d'un projet. En partant de l'expression d'un besoin ressenti et sans considérer a priori les solutions, elle permet d'évaluer l'ensemble des contraintes (techniques, économiques, culturelles...) qui affectent le projet [3]. Elle constitue la première phase de conception débouchant sur l'édition du cahier des charges fonctionnelles. Cette méthode propose une démarche transversale dans la conduite d'un projet. L'approche fonctionnelle ne concerne pas seulement le produit et les services qu'il rend à son utilisateur, mais également les moyens mis en œuvre pour y parvenir. L'objectif ultime étant la compétitivité pour laquelle "augmentation de la qualité" et "réduction du coût" ne sont pas antagonistes sinon indissociables.

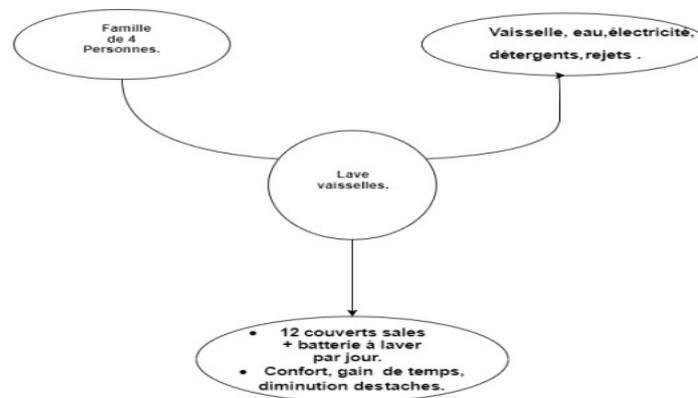
### 2.3.2 Diagramme des prestations

Cet outil (qui est un des éléments de la méthode APTE) définit le besoin auquel répond le système. Souvent les acteurs d'un projet privilégient des solutions déjà connues sans analyser concrètement le besoin qui justifie le projet. Avant d'imposer un « comment » ou une solution, il faut se tourner vers l'utilisateur et/ou le demandeur, pour aboutir de manière structurée à la solution, car un projet n'a de sens que s'il satisfait le besoin. Il convient donc d'exprimer le besoin et rien que le besoin dès le lancement d'un projet. Il s'agit d'explicitier l'exigence fondamentale qui justifie la conception, ou la préconception d'un produit. Pour cela, il est essentiel de se poser les trois questions suivantes (voir figure (I.1 et I.2 )) :

- A qui, à quoi le produit rend-il service ?
- Sur qui, sur quoi agit-il ?
- Dans quel but ? (Pour quoi faire ?) La bête à cornes est un outil de représentation de ces questions fondamentales [1].



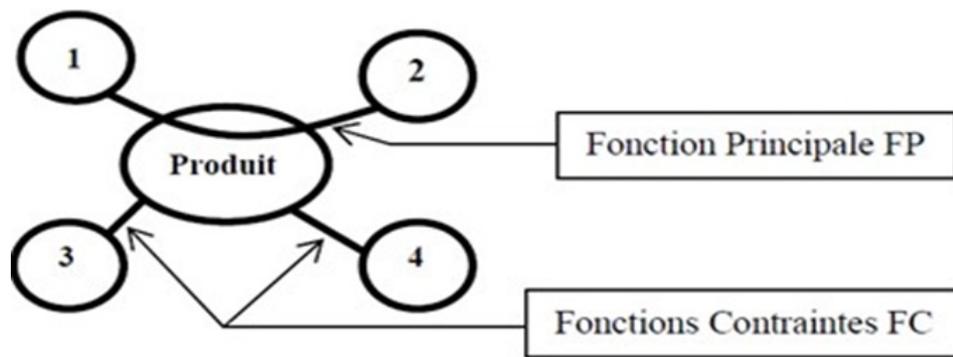
**Fig. I.1** Aperçu du diagramme des prestations [1].



**Fig. I.2** Exemple du diagramme des prestations [1].

## 2.4 Diagramme des interacteurs

C'est une démarche qui consiste à faire figurer sur un graphique circulaire appelé aussi diagramme de pieuvre les éléments de l'environnement du produit (figure (I.3)), cet outil nous permet de déterminer les différentes fonctions des services (fonctions principales FP, fonctions contraintes FC).



**Fig. I.3** Illustration de diagramme des interacteurs.

**Fonctions principales (FP)** : c'est pourquoi le produit existe. Une fonction principale relie toujours deux composantes en passant par le produit

**Fonctions contraintes (FC)** : ce qui permet d'adapter le produit à son environnement immédiat. Une fonction complémentaire ne relie le produit qu'à une composante à la fois.

Inventaire systématique du milieu environnant :

- **Milieu physique** : Milieu ambiant (vent, humidité, eau, chaleur, froid, luminosité, poussière, sève). Cep de vigne (forme, dimensions).

- **Milieu technique** : Énergie électrique (autonomie, recharge).

- **Milieu humain** : Opérateur (ergonomie, esthétique, poids, bruit, sécurité).

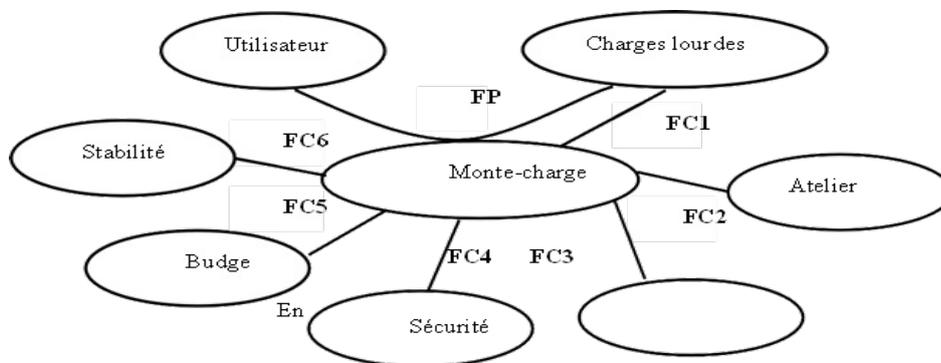
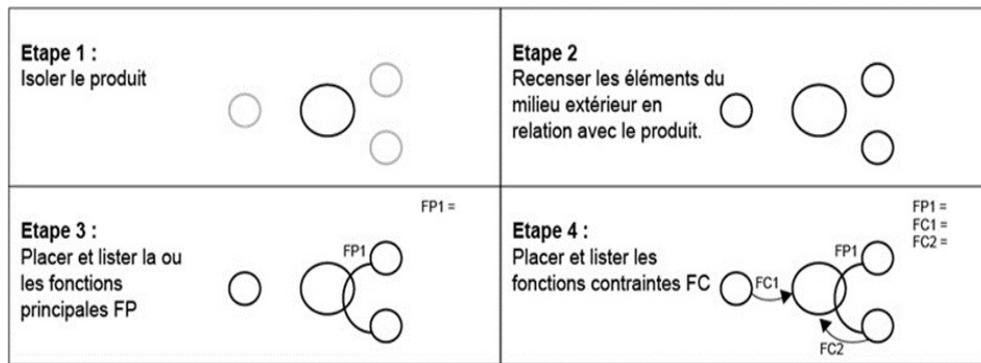
- **Milieu économique** :

Critères de qualité (maintenance, coût) [2].

## 2.5 Démarche :

En prenant notre cas du monte-charge comme indiqué sur la figure (I.4) :

1. On isole le produit
2. On recherche et on place les éléments du milieu extérieur en relation avec le produit
3. On recherche et on place les fonctions de service principales, complémentaires ou contraintes [2].



**Fig. I.4** Diagramme des interacteurs du monte-charge [2].

- **Formulation des fonctions**

**FP** : Lever et déplacer les charges lourdes.

**FC1** : Doit retenir le maximum des charges.

**FC2** : Doit être placé dans l'atelier d'université.

**FC3** : Doit fournir un minimum d'effort par l'utilisateur.

**FC4** : Avoir toutes les mesures de sécurité.

**FC5** : Avoir un budget raisonnable.

**FC6** : Être stable.

### 3 Analyse fonctionnelle interne (AFI) ou analyse fonctionnelle technique

La norme NF X 50-151 définit l'AFI comme étant la partie de l'analyse fonctionnelle qui contribue à étudier et à formaliser l'architecture du produit en identifiant les fonctions

techniques des sous-ensembles ou composants. L'AFI concerne le produit lui-même, car l'objectif est d'améliorer son fonctionnement ou ses propriétés, de réduire son prix d'achat, son coût d'utilisation et son coût d'entretien. Il s'agit de comprendre l'intérieur de la boîte noire pour en comprendre l'architecture, la combinaison des constituants et les fonctions techniques [9].

L'objectif de l'analyse fonctionnelle interne d'un produit est d'observer une solution existante ou imaginée pour :

- Analyser son organisation (fonctions techniques).
- Observer la réponse aux exigences du CdCf.
- Distinguer ce qui participe directement à la réalisation des services (chaînes fonctionnelles – états).

Plusieurs outils existent pour décrire le point de vue du concepteur afin de faire comprendre le système du point de vue mainteneur, On a choisi la méthode FAST.

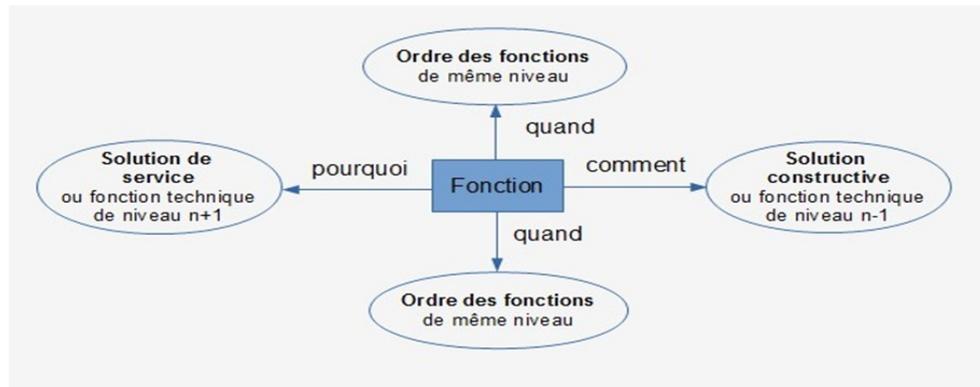
### 3.1 Outil FAST :

Le diagramme FAST (Functional Analysis System Technique) est présenté à la figure (I.5) imaginé par Charles W. Bitheway représente l'arbre fonctionnel des fonctions de service et fonctions techniques. Il permet de traduire chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) constructive(s).

- Les fonctions de service : constituent une relation entre le système et le milieu extérieur.

Il faut souvent plusieurs fonctions de service pour répondre à un besoin. Les fonctions techniques : sont internes au produit, elles sont choisies par le constructeur dans le cadre d'une solution, pour assurer une fonction de service. La méthode s'appuie sur une technique interrogative. En partant d'une fonction principale, elle présente les fonctions dans un enchaînement logique en répondant aux trois questions :

- **Pourquoi** ? pourquoi une fonction doit-elle être assurée ?
- **Comment** ? comment cette fonction doit-elle être assurée ?
- **Quand** ? Quand cette fonction doit-elle être assurée ?



**Fig. I.5** Diagramme FAST.

### 3.2 Outil SADT : (Structured Analysis Design Technic)

Est une méthode d'origine américaine, développée en 1977. Elle se répandit vers la fin des années 1980 comme l'un des standards de description graphique d'un système complexe par analyse fonctionnelle descendante, qui consiste à :

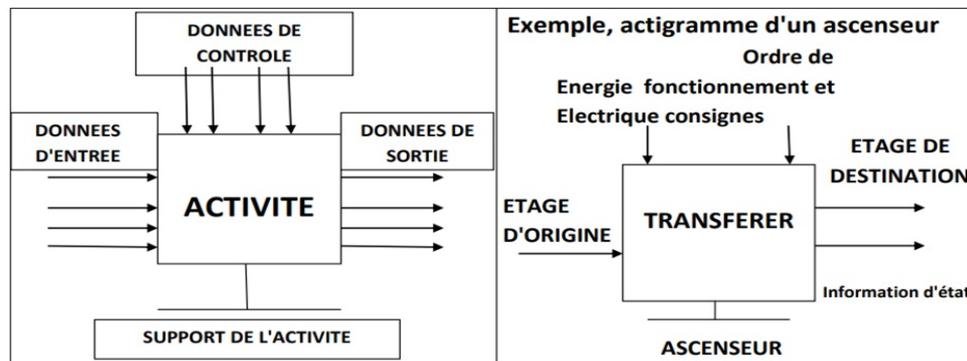
- Modéliser pour comprendre,
- Discipliner la démarche d'analyse (descendre, grouper, hiérarchiser),
- Séparer le quoi du comment,
- Modéliser la réalité (actigramme, datagramme),
- Formaliser de manière graphique (progression, concision, langage),
- Travailler en équipe (cycle auteur / lecteur),

Consigner par écrit (documentation et mise à jour permanente). Cette méthode fonctionnelle trouve son origine dans les langages procéduraux. Elle met en évidence les fonctions à assurer et propose une approche hiérarchique descendante et modulaire.

Elle utilise intensivement les raffinements successifs pour produire des spécifications dont l'essentiel est sous forme de notation graphique en diagrammes de flux de données. Le plus haut niveau représente l'ensemble du problème (sous forme d'activité, de données ou de processus, selon la méthode). Chaque niveau est ensuite décomposé en respectant les entrées/sorties du niveau supérieur. La décomposition se poursuit jusqu'à arriver à des composants « maîtrisables » (voir la figure (I.6)) [2].

- Transforme, modifie, change une donnée d'entrée (matière d'œuvre principale, matière d'œuvre secondaire)
- Utilise la potentialité du support de l'activité (le processeur)

- Génère une ou plusieurs donnée(s) de sortie (qui peut devenir une donnée d'entrée ou une donnée de contrôle pour l'activité suivante).
- Agit selon les données de contrôle éventuelles
- Réalise l'action .



**Fig. I.6** Diagramme d'activité, d'action sur la matière d'œuvre [3].

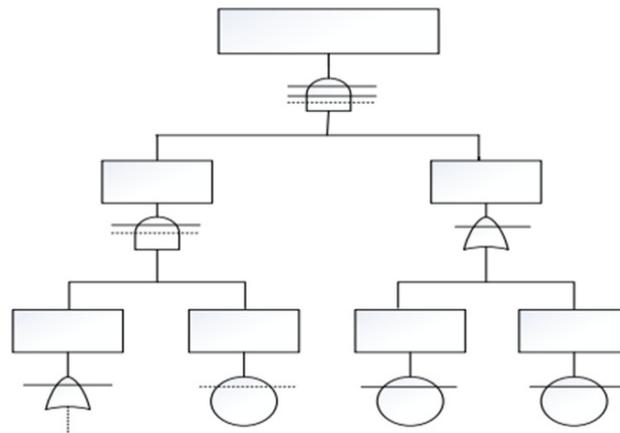
## 4 ANALYSE DYSFUNCTIONNELLE

Les études de sécurité des systèmes sont souvent basées sur une analyse qualitative ayant pour objectif la détermination des scénarios aboutissant à l'occurrence de l'état redouté, suivie d'une analyse quantitative pour estimer la probabilité de leur apparition. Il existe un grand nombre d'outils d'analyse dysfonctionnelle classées en deux grandes familles : les outils statiques et les outils dynamiques [5].

### 4.1 Outils statiques

#### 4.1.1 Arbre de défaillance (AdD)

L'AdD est une technique d'analyse déductive qui utilise un modèle graphique avec une structure logique (l'arbre) pour représenter des événements conduisant à un certain résultat indésirable (défaillance du système). Il fonctionne en considérant d'abord un événement indésirable, comme une défaillance du système, et en le plaçant au sommet de l'arbre. C'est ce que l'on appelle l'événement « top » ou « l'événement indésirable » (figure (I.7)). L'AdD travaille alors en arrière pour déterminer les causes de l'événement supérieur en termes de combinaisons logiques d'événements de défaillance de base (les événements basiques de l'arbre) [10].



**Fig. I.7** Diagramme d'activité, d'action sur la matière d'œuvre [3].

**4.1.1.1 Objectives de l'AdD** L'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches. L'analyse des arbres de défaillance a des objectifs dans la prise de décision, énumérés ci-dessous [10] :

- Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur,
- Suivre les performances du système,
- Minimiser et optimiser les ressources de danger,
- Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic.

#### 4.1.2 Outil AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) est une technique d'analyse prévisionnelle de déterminer l'emplacement de la défaillance et la fiabilité, de la maintenabilité et de la sécurité des produits et des équipements. D'après AFNOR) L'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticités (AMDEC) est une méthode inductive permettant pour chaque composant d'un système, de recenser son mode de défaillance et son effet sur le fonctionnement ou sur la sécurité du système [11].

**4.1.2.1 Types AMDEC** L'utilisation de l'AMDEC n'est pas restreinte à un domaine d'étude précis. En effet, dans le processus de développement de produit et de production,

différents systèmes peuvent être analysés (Otto & Wood, 2001 ; Stamatis, 2003). Il existe donc différentes variantes de l'AMDEC. Les plus courantes sont l'AMDEC produit et l'AMDEC process. (Stamatis, 2003) distingue quatre formes d'AMDEC :

- L'AMDEC produit qui permet d'analyser un produit avant son lancement en production. Ce type d'analyse se focalise sur les modes de défaillance causés par des défauts en conception.
- L'AMDEC process analyse les processus de production et d'assemblage en se focalisant sur les modes de défaillance causés par des défauts de processus ou d'assemblage.
- L'AMDEC système ou concept analyse les systèmes et sous-systèmes dans les premières phases du développement. Les dysfonctionnements potentiels, causés par des défauts système, des différentes fonctions sont identifiés.
- L'AMDEC service étudie les services avant leur utilisation par le client final. Cela permet d'identifier les modes de défaillance causés par le système ou des défauts dans le processus. [CONCEPTION Collaboration] ;

**4.1.2.2 Définitions d'un mode de défaillance, d'une cause de défaillance et de l'effet de cette défaillance** Par défaillance on entend simplement qu'un produit, un composant ou un ensemble : • Ne fonctionne pas ;

- Ne fonctionne pas au moment prévu ;
- Ne s'arrête pas au moment prévu ;
- Fonctionne à un instant non désiré ;
- Fonctionne, mais les performances requises ne sont pas obtenues

Le mode de défaillance est la façon dont un produit, un composant, un ensemble, un processus ou une organisation manifeste une défaillance ou s'écarte des spécifications. Voici quelques exemples pour illustrer cette définition :

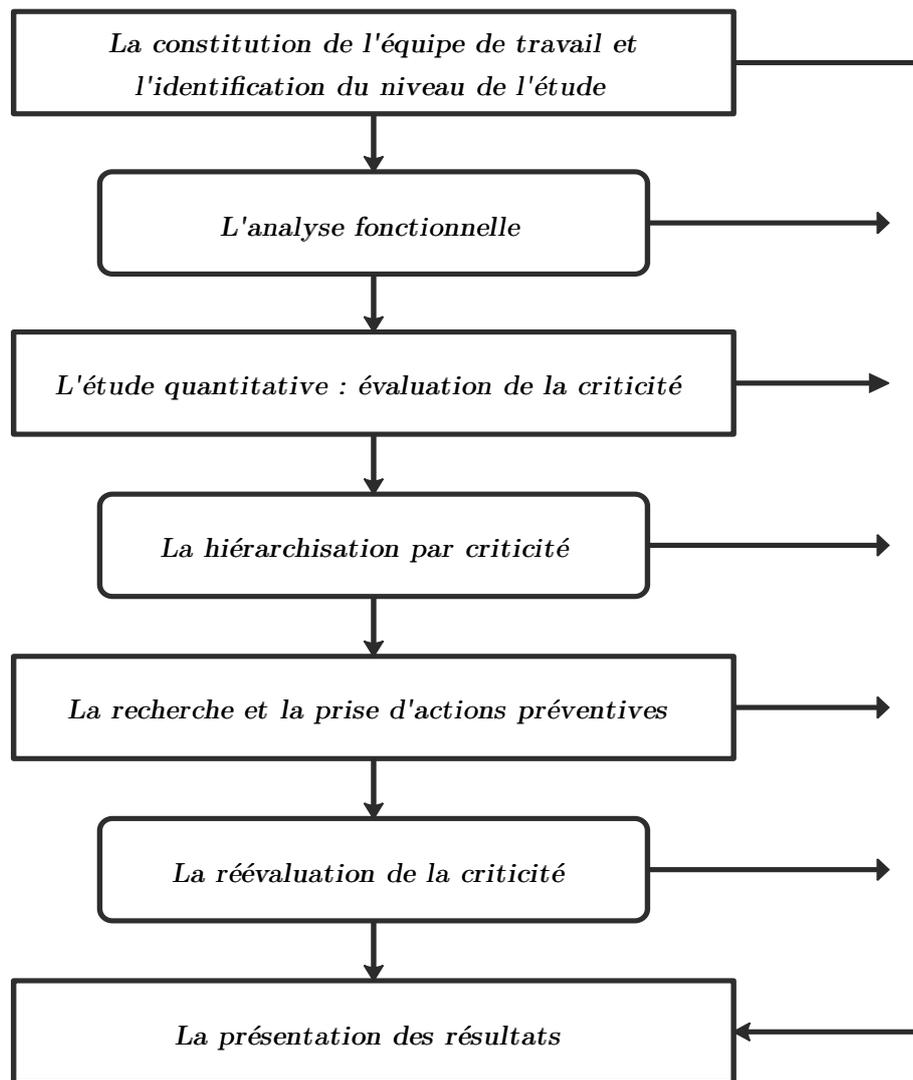
- Déformation ;
- Vibration ;
- Coincement ;
- Desserrage ;
- Corrosion ;
- Fuite ;
- Perte de performance ;
- Court-circuit ;
- Flambage ;

- Ne s'arrête pas ;

Une cause de défaillance est évidemment ce qui conduit à une défaillance. On définit et on décrit les causes de chaque mode de défaillance considérée comme possible pour pouvoir en estimer la probabilité, en déceler les effets secondaires et prévoir des actions correctives pour la corriger. Les effets d'une défaillance sont les effets locaux sur l'élément étudié du système et les effets de la défaillance sur l'utilisateur final du produit ou du service [4].

- Les étapes de la méthode

La méthode s'inscrit dans une démarche en huit étapes (figure I.8). Comme dans plusieurs démarches, il y a une phase préparatoire qui consiste en une collecte de données pour réaliser l'étude, la mise sur pied d'un groupe de travail et la préparation des dossiers, tableaux, logiciels . L'organigramme de la démarche AMDEC est illustré à la figure (I.8)



**Fig. I.8** L'organigramme de la démarche AMDEC [4]

L'ingénieur de fabrication est très influent au sein de l'équipe, particulièrement en ce qui concerne le développement de la conception et des procédés de fabrication.

Les concepteurs sont parfois amenés à participer aux réunions de l'équipe, afin de fournir plus de détails au niveau de la conception et du changement de la conception ou pour connaître l'historique du produit. Cette configuration des membres de l'équipe est similaire à celle de l'AMDEC-processus et n'est en aucune façon définitive. Il est toutefois important de préciser que les grandes équipes (dont le nombre des participants est supérieur à sept) sont moins efficaces que les petites (entre quatre et six participants). La clé du succès de l'équipe AMDEC réside dans l'engagement total de ses membres et l'interaction entre ceux-ci [12].

Le tableau (I.1) exprime la présentation graphique de l'AMDEC.

Tableau I.1 – Présentation graphique de l'AMDEC [9].

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

## 4.2 Les outils dynamiques

### 4.2.1 Outil pétri

Les réseaux de Petri constituent un outil mathématique de modélisation développé au début des années soixante par le mathématicien allemand Carl Adam Petri. Les réseaux de Petri décrivent des relations existant entre des conditions et des événements et ils modélisent le comportement de systèmes dynamiques à événements discrets [5]. Les réseaux de Petri présentent des caractéristiques intéressantes à savoir le parallélisme, la synchronisation, le partage des ressources,...

**4.2.1.1 Structure d'un réseau de Petri** Un réseau de Petri comporte deux types de nœuds, les places et les transitions reliés par des arcs orientés. L'état d'un système est représenté par son marquage.

Un RdP ordinaire non marqué est un quadruplet  $Q = \langle P, T, \text{Pré}, \text{Post} \rangle$  tel que :  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble fini et non vide de places,  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$  est un ensemble fini et non vide de transitions,  $P \cap T = \emptyset$ ,  $P$  et  $T$  sont disjoints,  $\text{Pré} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est l'application d'incidence avant ;  $\text{Post} : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est l'application d'incidence arrière. Un marquage initial est une distribution des marques dans l'ensemble des places  $P$  à l'instant 0. Si on associe au couple  $P_i, T_j (T_i, P_j)$  la valeur 0, alors il n'existe pas d'arc entre  $P_i$  et  $T_j (T_i, P_j)$ , sinon (à ce même couple, on associe la valeur 1) il existe un arc de poids (valuation) 1 entre ces deux arcs. Le RdP noté  $Q = \langle P, T, \text{Pré}, \text{Post} \rangle$  est dit réseau de Petri ordinaire. La représentation graphique d'un réseau de Petri utilise des cercles pour représenter les places et des traits (rectangles parfois) pour représenter les transitions. Les arcs sont des flèches

auxquelles on associe la valuation (si elle nulle, on ne représente pas d'arc, il n'existe pas) [5].

### Exemple

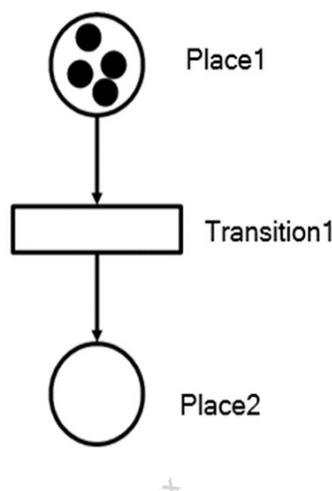


Fig. I.9 Exemple d'un réseau de Petri [5]

## 4.2.2 Chaines de Markov

La méthode de l'Espace d'État (MEE) a été développée pour l'analyse de sûreté de fonctionnement de système réparable. Les arbres de défaillances, vus précédemment, permettent de bonnes descriptions statiques de système mais ne prennent pas en compte les reconfigurations, comme les réparations. Les premières utilisations des processus stochastiques dans les années 50 utilisaient des processus markoviens ; des généralisations ont ensuite été faites. Dans cette partie nous nous concentrons sur les processus markoviens [7].

Andrei Markov a publié ses premiers résultats en 1906, qui ont ensuite été généralisés à un espace d'états infini dénombrable par Andrei Kolmogorov en 1936 [7]. Un processus stochastique est un ensemble de variables aléatoires  $(X_t)_{t \geq 0}$  à valeurs dans l'ensemble des observations. Un processus

est markovien si la probabilité de passage de l'étape présente à la suivante ne dépend pas du passé, i.e.  $P(X_t \in A | X_{tn} \in A_n, \dots, X_1 \in A_1) = P(X_t \in A | X_{tn} \in A_n)$  [13].

**4.2.2.1 Construction d'un modèle** Considérons un système composé de  $n$  composants, chaque composant ayant un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne ; ce système est supposé réparable et chaque composant est réparé après constatation de la panne. Le système est donc composé :

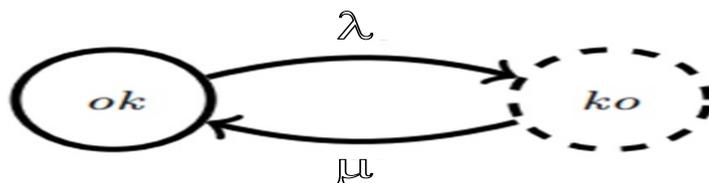
- Des états de fonctionnement : un état de bon fonctionnement ou tous les composants

fonctionnent, et des états où certains composants sont en panne mais le système reste fonctionnel,

- des états de pannes : où suffisamment de composants sont en panne pour affecter le système global. La construction du modèle se fait en 3 étapes :

1. Recensement de tous les états du système. Si chaque composant a 2 états (ok ou panne) et si le système a  $n$  composants, le nombre maximal d'états est  $2^n$ . Au cours de la vie du système, des états de panne peuvent apparaître à la suite de défaillance ou disparaître à la suite de réparation ;
2. Recensement de toutes les transitions possibles entre ces différents états et l'identification de toutes les causes de ces transitions. Les causes des transitions sont généralement des défaillances des composants ou la réparation de composants ;
3. Calcul des probabilités de se trouver dans les différents états au cours d'une période de vie du système, calcul des temps moyens (MTTF, MTBF, MTTR . . . ) [6].

- **Exemple** Pour un système à un composant qui n'a qu'un mode de défaillance panne, on obtient l'automate décrit ci-dessous (figure I.10). Initialement, on est dans l'état ok, tout instant le composant peut tomber en panne avec le taux de défaillance instantané  $\lambda$  puis se faire réparer avec le taux de réparation  $\mu$ .



**Fig. I.10** chaîne Markov d'un composant unique [6].

- **Exemple (Deux composants)**

On considère un système constitué de deux composants (voir figure I.11) et on suppose qu'une seule panne à la fois peut survenir. Chaque composant a trois états possibles : l'état 0 correspond au bon fonctionnement, l'état 1<sup>r</sup> correspond au fait que le composant est indisponible mais en cours de réparation et 1 correspond à l'état de panne. L'automate associé au système est la combinaison de tous ces états, par exemple 00 est le bon fonctionnement du système alors que 11 correspond à l'arrêt total. À gauche, la chaîne de Markov avec un seul réparateur qui intervient dès la détection d'une panne ; et à droite deux réparateurs sont à disposition.

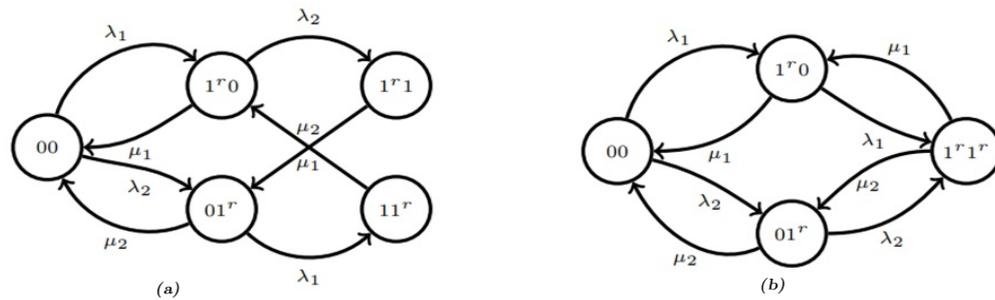


Fig. I.11 chaîne Markov d'un deux composant [6].

Les graphes des états avec deux réparateurs pour un système série à deux composants et un système en redondance active est représenté dans la figure (I.12).

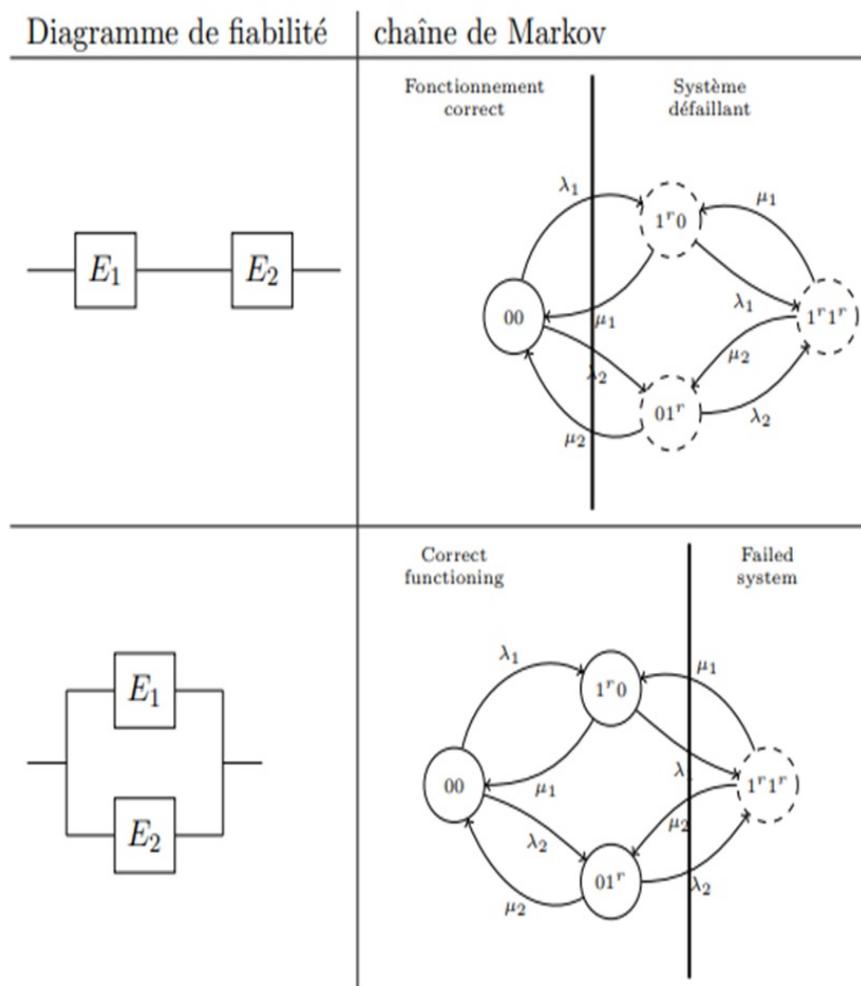


Fig. I.12 chaîne Markov d'un deux composant [7].

## **5 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu des différents outils d'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle et de leur utilisation. L'analyse fonctionnelle permet de comprendre les exigences du client et de formaliser les besoins du produit, tandis que l'analyse dysfonctionnelle se concentre sur l'identification et la gestion des défaillances potentielles du système. Les outils tels que la méthode APTE, les diagrammes de prestations, et les chaînes de Markov jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la sûreté de fonctionnement des systèmes techniques. En intégrant ces outils dans le processus de conception et de maintenance, il est possible de minimiser les risques de défaillance et d'assurer une performance optimale des systèmes.

Chapitre



# INTRODUCTION AUX ALTERNATEURS POUR GROUPES ÉLECTROGÈNES

---

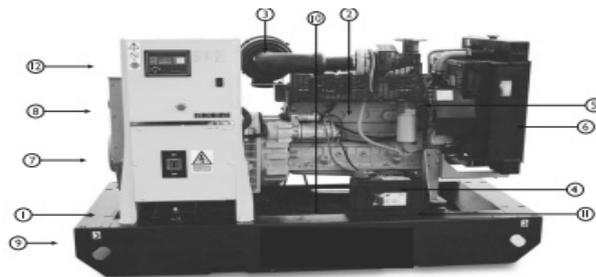
## 1 Introduction

Les alternateurs de groupe électrogène sont des dispositifs essentiels pour la production d'électricité, particulièrement en l'absence de réseau électrique principal. Ils convertissent l'énergie mécanique, généralement fournie par un moteur à combustion interne, en énergie électrique. Les alternateurs peuvent être classés en deux grandes catégories : les alternateurs monophasés et les alternateurs triphasés. Les monophasés sont souvent utilisés pour des applications domestiques ou de petite envergure, tandis que les triphasés sont préférés pour les applications industrielles en raison de leur efficacité et de leur capacité à gérer des charges plus importantes. La qualité de l'électricité produite dépend en grande partie de la conception et de la performance de l'alternateur, ce qui en fait un composant crucial pour la fiabilité des groupes électrogènes.

Dans ce chapitre, nous définissons l'alternateur et présentons ses différents types en mentionnant leurs avantages et inconvénients.

## 2 Groupe électrogène

Les groupes électrogènes sont des dispositifs essentiels pour fournir une source d'alimentation électrique de secours ou pour des applications où l'accès au réseau électrique est limité ou inexistant. Ils se composent principalement d'un moteur thermique et d'un alternateur. Le moteur thermique, fonctionnant généralement à l'essence, au diesel ou au gaz, entraîne l'alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Ces appareils sont couramment utilisés dans divers secteurs, tels que les hôpitaux, les chantiers de construction, les événements en plein air et les zones rurales. En fournissant une alimentation fiable en cas de panne de courant, les groupes électrogènes assurent la continuité des activités critiques et le confort des utilisateurs [8].



**Fig. II.1** Une configuration typique de groupe électrogène.

Le tableau (II.1) exprime configuration typique de groupe électrogène.

**Tableau II.1** – Présentation typique de groupe électrogène.

No	Description	No	Description	No	Description
1	Plaque signalétique du groupe électrogène	5	Alternateur chargeur de batterie	9	Bâti
2	Moteur diesel	6	Radiateur	10	Carburant (à l'intérieur du bâti)
3	Filtre à air	7	Alternateur	11	Anti vibrateurs
4	Batterie	8	Boîtier de connexions	12	Panneau de commande

### 3 ALTERNATEUR

Un alternateur est un générateur de tension et de courants électrique alternatifs. Les alternateurs appartiennent à la classe des machines synchrones (voir la figure (II.2)). Leur vitesse de rotation est synchronisée avec la fréquence des courants alternatifs délivrés. Les alternateurs utilisés au niveau des groupes électrogènes sont de deux types : les alternateurs triphasés et monophasés. La tension en sortie est obtenue grâce au mouvement de rotation appliqué à l'entrée qui fait varier le champ magnétique créé par la bobine continue dans les encoches du rotor d'après la loi de Faraday [14]..

### 3.1 Loi de Faraday

loi de Faraday est donnée par les équations (II.1)

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$E$  : est la force électromotrice induite (en volts)

$d\phi$  : est le flux magnétique (en webers),

$\frac{d\phi}{dt}$  : est la dérivée du flux magnétique par rapport au temps ( $t$ ).

Le signe négatif dans l'équation reflète la direction de la force électromotrice induite, qui est telle qu'elle s'oppose au changement du flux magnétique à l'origine de l'induction, selon la loi de Lenz. La puissance indiquée par le constructeur est sa puissance apparente ( $S$ ). Les pertes font que le rendement d'un alternateur est de 0,95% . La puissance mécanique qu'il faut appliquer à l'alternateur est donc :

$$P_m = \frac{S}{\eta} \quad (\text{II.2})$$

$P_m$  : Puissance mécanique

$S$  : Puissance apparente

$\eta$  : Le rendement

Le principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est illustré comme sur la figure suivante :

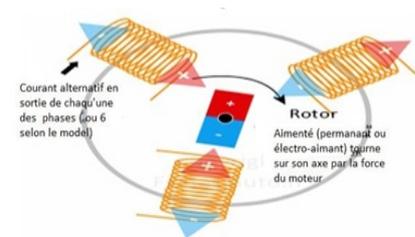


**Fig. II.2** principe de transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

### 3.2 Principe de fonctionnement

Le principe d'induction magnétique (figure (II.3)). Elle est généralement expérimentée en déplaçant un aimant permanent dans une bobine. Une tension se crée aux bornes de

la bobine. Un alternateur fonctionne selon ce principe ; un électro-aimant, alimenté par un courant d'excitation, est en rotation à l'intérieur des trois bobines ; il produit ainsi trois tensions triphasées alternatives décalées de  $120^\circ$ . L'énergie produite par un alternateur est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'électro-aimant et à la puissance qui elle-même est proportionnelle au courant d'excitation [15,16].



**Fig. II.3** principe de fonctionnement d'un rotor et un stator .

### 3.3 Description des constituants d'un alternateur

L'ordre d'une machine synchrone monophasé , Elle est composée d'une stator et rotor .Sans balais avec condensateur La série  $E1C/4$  se compose d'alternateurs monophasés a 4 pôles, sans balais, avec bobinage auxiliaire (chargé sur un condensateur) qui garantit la régulation de la tension.



**Fig. II.4** alternateur STAMFORD 4 pôles 15 kVA (20, 39HP) [8] .

### 3.4 La technologie des générateurs synchrones et asynchrones

- Générateurs synchrones :
  1. Fonctionnement synchronisé : Les générateurs synchrones sont conçus pour fonctionner en synchronisme avec le réseau électrique auquel ils sont connectés. Cela signifie que leur vitesse de rotation est verrouillée sur la fréquence du réseau électrique pour maintenir une cohérence dans la distribution d'énergie.

2. Contrôle de la tension et de la fréquence : Les générateurs synchrones sont capables de maintenir une tension et une fréquence stables dans le réseau électrique. Ils sont souvent utilisés dans les centrales électriques et les grands systèmes de production d'énergie pour fournir de l'électricité au réseau.
3. Courant d'excitation : Les générateurs synchrones nécessitent un courant d'excitation constant pour produire du courant électrique. Ce courant d'excitation est fourni par une source externe ou par des excitatrices intégrées [17].
  - Générateurs asynchrones (ou à induction) :
    1. Fonctionnement indépendant de la fréquence : Contrairement aux générateurs synchrones, les générateurs asynchrones ne sont pas synchronisés avec la fréquence du réseau électrique. Leur vitesse de rotation peut varier indépendamment de la fréquence du réseau.
    2. Absence de courant d'excitation : Contrairement aux générateurs synchrones, les générateurs asynchrones n'ont pas besoin de courant d'excitation externe pour fonctionner. Ils utilisent le principe de l'induction électromagnétique pour générer du courant électrique [18].

### 3.5 Le stator :

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator. Dans sa partie intérieure [18], le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator (figure (II.5)). Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$ . Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne de la plaque à bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'enroulement est ouvert et c'est à l'utilisateur de réaliser le couplage [8].



**Fig. II.5** Différents types de stators d'un alternateur [19].

### 3.5.1 Construction

Le stator est la partie stationnaire de l'alternateur, généralement constitué d'un laminage en fer doux pour minimiser les pertes par courants de Foucault. Ces tôles minces sont empilées et isolées les unes des autres pour réduire les courants parasites induits par le champ magnétique variable [20].

- **Bobines** : Des bobines de fil de cuivre sont disposées dans des encoches du stator, formant le circuit de sortie de l'alternateur. Le nombre de bobines et leur disposition déterminent le nombre de phases de la tension de sortie (monophasée ou polyphasée).
- **Noyau** : Le noyau du stator est généralement constitué d'un matériau ferromagnétique, comme le fer doux, qui permet de concentrer le champ magnétique et d'améliorer l'efficacité de l'induction électromagnétique.

## 3.6 Rotor

### 3.6.1 Construction

Le rotor est la partie rotative de l'alternateur, généralement constitué d'un noyau en acier et de bobines de champ ou d'aimants permanents. Le noyau du rotor est également laminé pour minimiser les pertes par courants de Foucault (la figure (II.5)) [20].

- **Bobines de champ** : Dans les alternateurs à excitation par balais ou auto-excités, des bobines de champ sont disposées sur le rotor. Ces bobines sont alimentées en courant continu pour créer un champ magnétique.

- **Aimants permanents** : Dans les alternateurs à aimants permanents, des aimants permanents sont fixés sur le rotor pour générer le champ magnétique. Les aimants permanents offrent des avantages tels que l'absence de maintenance et une meilleure fiabilité.

- **Axe** : Le rotor est monté sur un axe rotatif qui assure sa liaison avec le moteur primaire.



**Fig. II.6** Rotor d'un alternateur[19].

## 4 Classification des alternateurs

Il existe plusieurs types d'alternateurs utilisés dans les groupes électrogènes, chacun adapté à des besoins spécifiques :

### 4.1 Alternateurs monophasés

Ces alternateurs produisent une seule phase de courant alternatif. Ils sont généralement utilisés pour des applications domestiques et de petite envergure, où les besoins en puissance ne sont pas très élevés. Leur conception est plus simple et leur coût est généralement inférieur à celui des alternateurs triphasés [14].

#### 4.1.1 Fonctionnement

Le fonctionnement d'un alternateur monophasé repose sur le principe de l'induction électromagnétique. Un champ magnétique rotatif est créé à l'intérieur de l'alternateur par un rotor aimanté. Ce champ magnétique rotatif induit une tension alternative dans les bobines du stator, qui est l'enroulement stationnaire de l'alternateur. La fréquence de la tension induite est proportionnelle à la vitesse de rotation du rotor [14].



**Fig. II.7** Alternateur groupe électrogène triphasé 6 kVA .

### 4.1.2 Conception

Les alternateurs monophasés sont généralement constitués des éléments suivants :

- **Rotor** : Le rotor est la partie rotative de l'alternateur. Il est généralement constitué d'un électroaimant ou d'aimants permanents.
- **Stator** : Le stator est la partie stationnaire de l'alternateur. Il est constitué d'un noyau en fer doux avec des bobines de fil de cuivre enroulées autour de celui-ci.
- **Brosses et bagues collectrices** : Les brosses et les bagues collectrices sont utilisées pour transférer le courant électrique du rotor vers le stator.
- **Redresseur** : Le redresseur est utilisé pour convertir le courant alternatif monophasé en courant continu.

### 4.1.3 Applications

Les alternateurs monophasés sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- *Générateurs domestiques* : Les alternateurs monophasés sont souvent utilisés dans les générateurs domestiques pour fournir de l'électricité aux maisons et aux petits commerces.
- *Outils électriques* : Les outils électriques portables, tels que les perceuses et les scies, sont généralement alimentés par des moteurs électriques monophasés, qui sont alimentés par des alternateurs monophasés.
- *Systèmes automobiles* : Les alternateurs monophasés sont utilisés dans les systèmes automobiles pour charger la batterie et fournir de l'électricité aux accessoires du véhicule.
- *Éoliennes* : Les éoliennes utilisent des alternateurs monophasés pour convertir l'énergie cinétique du vent en électricité.

#### 4.1.4 Avantages et inconvénients

Les alternateurs monophasés présentent plusieurs avantages, notamment :

- **Conception simple** : Les alternateurs monophasés sont relativement simples à concevoir et à fabriquer.
- **Faible coût** : Les alternateurs monophasés sont généralement moins chers que les alternateurs polyphasés.
- **Léger et compact** : Les alternateurs monophasés sont plus légers et plus compacts que les alternateurs polyphasés. Cependant, les alternateurs monophasés présentent également quelques inconvénients, notamment :
  - **Ondulations de tension** : Les alternateurs monophasés produisent des ondulations de tension plus importantes que les alternateurs polyphasés.
  - **Facteur de puissance** : Les alternateurs monophasés ont un facteur de puissance inférieur à celui des alternateurs polyphasés, ce qui signifie qu'ils sont moins efficaces pour convertir l'énergie électrique en énergie utile.

## 4.2 Alternateurs triphasés

la source primaire de toute l'énergie électrique que nous consommons. Ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. L'alternateur convertit une puissance mécanique, qu'il absorbe sous la forme d'une rotation, en puissance électrique, qu'il délivre sous forme alternative, et ce au travers d'un principe simple et avec des rendements extrêmement importants puisque proches de 100 %. Les machines utilisées dans les groupes électrogènes sont ordinairement des machines synchrones auto-excités. Ce type de machine possède un induit (le stator) qui est fixe, un inducteur (rotor) qui est mobile [15]. Les alternateurs triphasés sont des machines électriques qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique sous la forme d'un courant alternatif triphasé. Ils sont couramment utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- **Production d'électricité** : Les alternateurs triphasés sont utilisés dans les centrales électriques pour produire de l'électricité.
- **Moteurs électriques** : Les moteurs triphasés sont utilisés dans une large gamme d'applications industrielles, notamment pour faire fonctionner des machines-outils, des pompes et des ventilateurs.

- **Systèmes de transport** : Les alternateurs triphasés sont utilisés dans les locomotives et les tramways pour fournir de l'électricité à la traction.
- **Éoliennes** : Les éoliennes utilisent des alternateurs triphasés pour convertir l'énergie cinétique du vent en électricité.

Nous présentons ici les différents types d'alternateurs triphasés ainsi que leurs applications respectives :

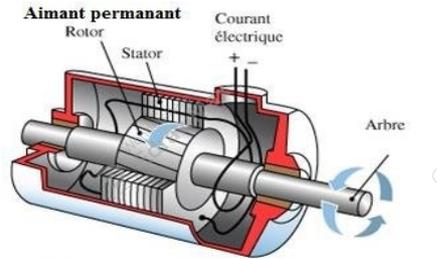
**a) Alternateurs à rotor bobiné (ou à bagues collectrices)** : Utilisent un rotor avec des enroulements connectés à des bagues collectrices. Utilisés dans des environnements nécessitant une régulation précise de la tension de sortie, tels que les centrales électriques et certaines applications industrielles [15].

**b) Alternateurs sans balais** : Ces alternateurs n'ont pas de balais, ce qui réduit l'usure et la maintenance. Ils utilisent des dispositifs électroniques pour réguler la production de courant. Les alternateurs sans balais sont souvent préférés pour leur durabilité et leur faible besoin en maintenance.

**c) Alternateurs synchrones** : Dans ces alternateurs, la vitesse du rotor est synchronisée avec la fréquence du courant produit. Ils sont couramment utilisés pour des applications où une fréquence stable et précise est essentielle.

**d) Alternateurs asynchrones (ou à induction)** : Ces alternateurs fonctionnent à une vitesse différente de la fréquence du courant produit. Ils sont souvent utilisés dans des applications spécifiques où la robustesse et la simplicité sont privilégiées.

**e) Alternateurs à aimants permanents** : Ces alternateurs utilisent des aimants permanents pour créer le champ magnétique nécessaire à la génération de courant. Ils sont connus pour leur haute efficacité et leur fiabilité. Cependant, ils peuvent être plus coûteux en raison des matériaux utilisés pour les aimants (voir la figure(II.8) ) [21].



**Fig. II.8** Alternateur à aimant permanents.

### I) Modèle Mathématique des Alternateurs Triphasés à Aimants Permanents

Modéliser mathématiquement ces alternateurs, plusieurs équations et concepts doivent être pris en compte :

Équations de la Force Électromotrice (FEM) donnée par équation II.1. Le flux magnétique dans une bobine peut être exprimé comme :

$$\phi(t) = BA \cos(\omega_m t) \quad (\text{II.3})$$

où :

$B$  : est la densité de flux magnétique.

$A$  : est l'aire de la bobine.

L'inductance  $L$  et la résistance  $R$  des enroulements du stator affectent la tension induite et le courant Pour chaque phase :

$$\begin{cases} v_a(t) = L \frac{di_a(t)}{dt} + Ri_a(t) + e_a(t) \\ v_b(t) = L \frac{di_b(t)}{dt} + Ri_b(t) + e_b(t) \\ v_c(t) = L \frac{di_c(t)}{dt} + Ri_c(t) + e_c(t) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Modéliser la dynamique de l'alternateur nécessite l'utilisation des équations de l'énergie cinétique et de la conservation du moment angulaire, données par la relation :

$$J \frac{dw_m}{dt} = T_{mec} - T_{elec} \quad (\text{II.5})$$

où :

$J$  : est le moment d'inertie du rotor,

$\frac{dw_m}{dt}$  : est l'accélération angulaire du rotor,

$T_{mec}$  : est le couple mécanique appliqué ,

$T_{elec}$  : est le couple électromagnétique produit.

## 5 Mode de défaillance

On entend par mode de défaillance, la manière dont une entité technique vient à ne pas fonctionner. Ils sont relatifs à la fonction de service devant être assurée par l'entité en question. Pour une entité technique donnée, sa fonction de service présente quatre situations différentes :

- La fonction cesse de se réaliser, dans ce cas, le système ne fonctionne plus ;
- La fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite, dans ce cas, le système ne fonctionne pas.
- La fonction ne se réalise pas parfaitement (altération de performance), dans ce cas, le système marche de moins en moins bien.
- La fonction se réalise lorsqu'elle n'est pas sollicitée, dans ce cas, le système marche de temps en temps [22].

L'alternateur joue un rôle crucial dans le groupe électrogène et est extrêmement complexe. Il peut causer diverses pannes de différents types (mécanique, électrique...) (voir Annexe A).

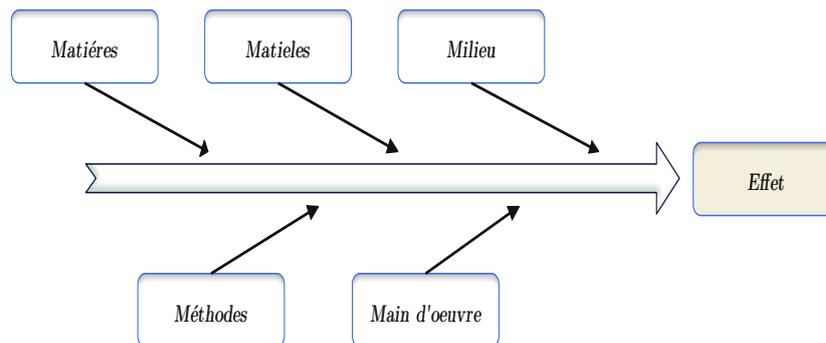
Les pannes les plus courantes et les plus connues sont :

- Ne démarre pas
- Ne s'arrête pas
- Vibrations
- Blocage physique
- Echauffement
- Tension supérieure à la valeur limite
- Tension inférieure à la valeur limite
- Court-circuit électrique
- Circuit électrique ouvert
- Fuite électrique

### 5.1 Diagramme Ishikawa (causes-effet)

Ishikawa, professeur à l'Université de TOKYO dans les années 60 et concepteur d'une méthode de gestion de la qualité totale, a développé cet outil. Le diagramme causes-effet

illustre le classement par familles de toutes les causes potentielles qui peuvent avoir un impact sur un processus. Au total, 5 familles de causes entraînent une mauvaise qualité dans un processus de fabrication. Ils portent le nom de la lettre  $M$ , d'où l'appellation  $5M$  [23]. la figure (II.9) représente Le diagramme Ishikawa a suggéré un schéma en forme d'« arête de poisson » [24].



**Fig. II.9** Diagramme d'Ishikawa [23].

Cet outil peut être adapté pour aider au diagnostic de la façon suivante [24] :

- Définir l'effet étudié en regroupant le plus grand nombre de données possible.
- Classification par catégorie des causes.
- Classement des causes dans chaque famille en fonction de leur importance
- Identification de toutes les raisons envisageables.

## 5.2 Recherche des causes avec la méthode Ishikawa

La méthode Ishikawa, également connue sous le nom de diagramme de causes et effets ou diagramme en arêtes de poisson, est utilisée pour identifier et organiser les causes potentielles d'un problème ou d'un effet spécifique. Nous avons classé les causes selon les cinq M dans la figure (II.10).

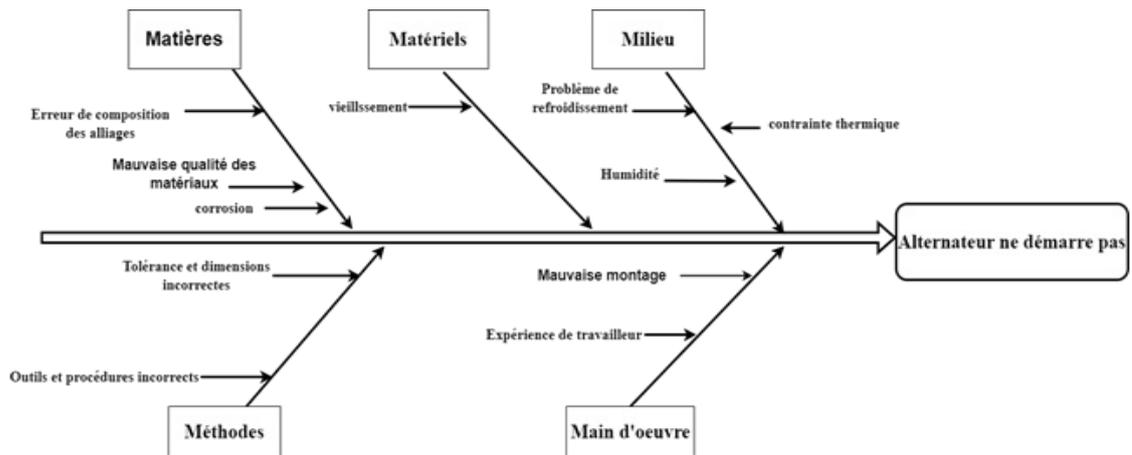


Fig. II.10 Alternateur à aimant permanents.

## 6 Conclusion

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble détaillée des alternateurs, y compris leur fonctionnement, leurs différentes catégories, et les modes de défaillance associés. En utilisant des outils d'analyse comme la méthode Ishikawa, nous avons pu examiner les causes profondes des pannes fréquentes des alternateurs. Cette analyse est essentielle pour améliorer la fiabilité et la performance des systèmes électromécaniques. En conclusion, la compréhension approfondie des modes de fonctionnement et des défaillances des alternateurs est cruciale pour leur application efficace dans diverses industries.

Chapitre



# ÉTUDE DE CAS : ARBRE DE DÉFAILLANCE D'UN ALTER- NATEUR DE GE

---

## 1 Introduction

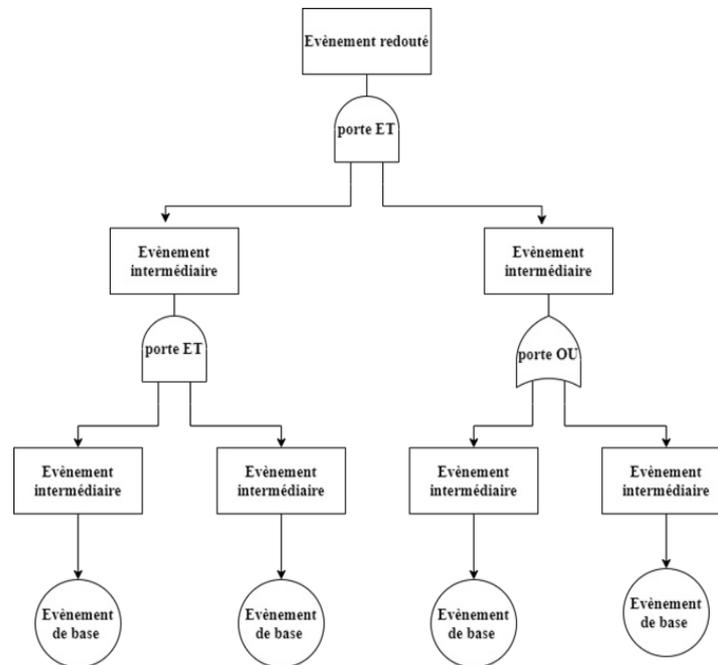
L'analyse des pannes des systèmes industriels permet de repérer, repérer et localiser un comportement anormal (ou dysfonctionnement). Cela facilitera l'introduction d'une solution qui pourrait permettre de revenir à un mode de fonctionnement plus approprié à la mission. Dans lequel ce système a été élaboré. Ainsi, il joue un rôle crucial dans un système de production ou dans un système conçu pour être utilisé par un tiers. En ce qui concerne l'analyse des défaillances d'un système, l'arbre de défaillance repose sur une analyse préalable des dysfonctionnements d'un système : une analyse des modes de défaillance et de leurs conséquences (AMDE). Ainsi, cette approche inductive qui se déroule des causes aux effets est considérée comme une étape préalable à la création d'un arbre de défaillance, car l'identification des composants et de leurs modes de défaillance est généralement utilisée dans le domaine de l'informatique.

## 2 ARBRE DE DEFAILLANCE

### 2.1 Définition

L'arbre de défaillance est une méthode qui part d'un événement final pour remonter vers les causes et conditions dont les combinaisons peuvent le produire. Il vise à représenter l'ensemble des combinaisons qui peuvent induire l'événement étudié d'où sa représentation schématique donnée à titre d'exemple (figure (III.1)). On construit et on utilise un arbre de défaillance dans le cadre d'une étude a priori d'un système. Ayant pour point de départ un événement redouté (dysfonctionnement ou accident), la démarche consiste à s'appuyer sur la connaissance des éléments constitutifs du système étudié pour identifier tous les scénarios conduisant à l'événement redouté. L'arbre de défaillance est une représentation en deux dimensions (figure III.1) des enchaînements qui peuvent conduire à l'événement redouté, le point de départ de la démarche. On peut ensuite utiliser cette représentation pour calculer la probabilité de l'événement redouté à partir des probabilités des événements élémentaires qui se combinent pour le provoquer. Des logiciels sont commercialisés qui permettent de réaliser commodément la mise en forme d'arbres pouvant comporter un grand nombre d'éléments et qui permettent d'effectuer les calculs de probabilités. Les exemples d'arbres que nous pouvons donner dans cet article pour illustrer nos propos sont naturellement très petits, très

simples. Les arbres qu'il est utile de construire pour étudier des systèmes importants et assez complexes comportent tellement plus d'éléments que l'apport des logiciels de mise en forme et de calcul est décisif [? ].



**Fig. III.1** Schéma de l'Arbre de de défaillance.[21]

## 2.2 Objectifs

L'objectif de l'AdD est d'obtenir des informations pour aider à la prise de décisions, il est utile de décrire brièvement quelques-unes des façons dont ajouter le fait. L'AdD est un outil polyvalent, et les informations qu'il obtient sont utiles pour une variété de tâches. L'analyse des arbres de défaillance a des objectifs dans la prise de décision, énumérés ci-dessous : Comprendre la logique qui mène à l'événement supérieur, - Empêcher l'événement le plus important car il s'agit d'un outil pro-actif, - Suivre les performances du système, - Minimiser et optimiser les ressources de danger, - Aider à la conception du système, - Identifier et corriger les causes de l'événement supérieur car il s'agit d'un outil de diagnostic. [22]

## 2.3 Représentation graphique

La représentation graphique de l'arbre de défaillance se fait à travers une symbolisation graphique classée en deux types :

- Avènements ;
- Portes logiques

Le Tableau (III.1) montre que la symbolisation des événements a pour but de faciliter la désignation entre les différents types d'événements.

**Tableau III.1** – Symboles des événements dans les arbres de défaillances.

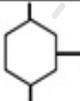
<i>Symbole</i>	<i>Nom</i>	<i>Description</i>
	<i>Evènement Intermédiaire ou final</i>	<i>Evènement du plus haut niveau : sommet d'arbre « évènement redouté », ou évènement intermédiaire résultant d'un évènement redouté.</i>
	<i>Evènement de base</i>	<i>Evènement du plus bas niveau pour lequel la probabilité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

## 2.4 Portes logiques

Les portes logiques (ou connecteurs logiques) sont les liaisons entre les différents branches et/ou évènements. Les plus classiques sont ET et OU (Tableau III.2). Les portes fonctionnent comme suit :

- **OU** : l'évènement en sortie/supérieur survient si, au moins, un des évènements en entrée/inférieur survient/est présent ;
- **ET** : l'évènement en sortie/supérieur survient seulement si tous les évènements en entrée/inférieur surviennent/sont présents.[25]

Tableau III.2 – Symboles des portes dans les arbres de défaillances

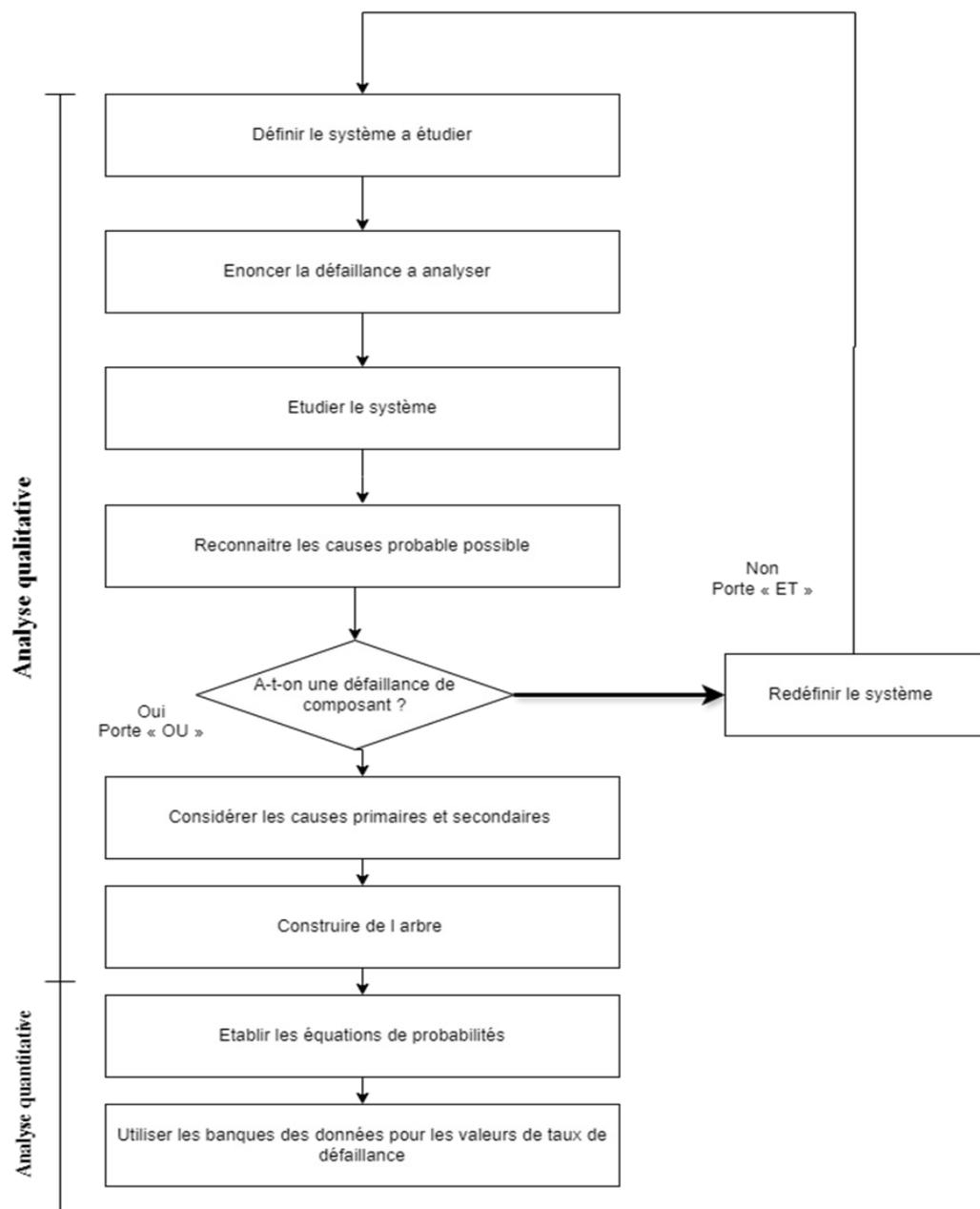
Symbole	Nom	Description	Nombre d'en
	OU (OR)	L'évènement de sortie apparaît si au moins un des évènements d'entrées apparaît	>1
	ET (AND)	L'évènement de sortie apparaît si tous les évènements apparaissent	>1
	SI (IF)	Sortie générée si l'évènement entrée est présent et si la condition X est réalisée	=1

## 2.5 Principe

Un arbre de défaillance représente de façon synthétique l'ensemble des combinaisons d'évènements qui, dans certaines conditions produisent un évènement donné, point de départ de l'étude. Construire un arbre de défaillance revient à répondre à la question « comment tel évènement peut-il arriver », ou encore « quels sont tous les enchaînements possibles qui peuvent aboutir à cet évènement [10].

## 2.6 Démarche et construction de l'AdD

L'analyse de l'AdD est une analyse déductive qui demande une grande connaissance des divers modes de dégradation des systèmes. On part de la défaillance présumée des systèmes et on recherche toutes les causes ou agencement (combinaison) de causes qui peuvent conduire à cette défaillance. Pour faire cette analyse il doit passer par une méthodologie précisée et plus claire, la démarche ci-dessus montre les étapes essentiels de construction de l'AdD [26]. La figure (III.2), représentant l'organigramme de la démarche de l'arbre de défaillance, montre le processus systématique d'identification et d'analyse des causes d'une défaillance.



**Fig. III.2** Démarche de l'arbre de défaillance

## 2.7 Analyse qualitative

L'arbre de défaillance étant construit, deux types d'exploitation qualitative peuvent être réalisés :

1. L'identification des scénarios critiques susceptibles de conduire à l'évènement redouté. Par l'analyse des différentes combinaisons de défaillances menant à l'évènement sommet, l'objectif est ici d'identifier les combinaisons les plus courtes appelées coupes minimales.

2. La mise en œuvre d'une procédure d'allocation de barrières. Ce deuxième type d'exploitation qualitatif permet d'allouer un certain nombre de barrières de sécurité (technique ou d'utilisation) en fonction de la gravité de l'évènement redouté et des contraintes normatives éventuelles.

## 2.8 Analyse quantitative :

Une étude probabiliste peut avoir deux objectifs :

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

Ces calculs ne peuvent se concevoir que si chaque évènement élémentaire peut être probabilisé à partir d'une loi soigneusement paramétrée et de la connaissance du temps de mission associé à l'évènement redouté et / ou à l'aide de données issues du retour d'expérience. [25]

## 2.9 Caractéristiques

Un arbre de défaillance est généralement présenté de haut en bas (figure III.1). La ligne la plus haute ne comporte que l'évènement dont on cherche à décrire comment il peut se produire. Chaque ligne détaille la ligne supérieure en présentant la combinaison ou les combinaisons susceptibles de produire l'évènement de la ligne supérieure auquel elles sont rattachées. Ces relations sont représentées par des liens logiques OU ou ET. [25]

## 2.10 Construction d'un arbre de défaillance

### 2.10.1 Évènement-sommet

La première étape est la définition de l'évènement qui doit être étudié. Dans l'arbre, ce sera l'évènement-sommet. Un arbre n'a qu'un évènement-sommet ; il réunit tout ce qui et uniquement ce qui peut provoquer cet évènement-sommet. La définition de cet évènement est totalement déterminante pour la valeur des conclusions qui seront tirées de l'analyse. Le risque n'est pas de développer un arbre qui serait faux mais un arbre qui réponde à une autre question que celle posée, soit :

- Par l'utilisateur des résultats s'en rend compte et la conséquence est qu'après le travail effectué, l'arbre attendu est toujours à faire et à exploiter ;

- L'utilisateur ne s'en rend pas compte et il tire des conclusions tout à fait injustifiées de l'analyse.
- Il importe donc de définir l'événement étudié de façon explicite et précise .

### 2.10.2 Événements intermédiaires

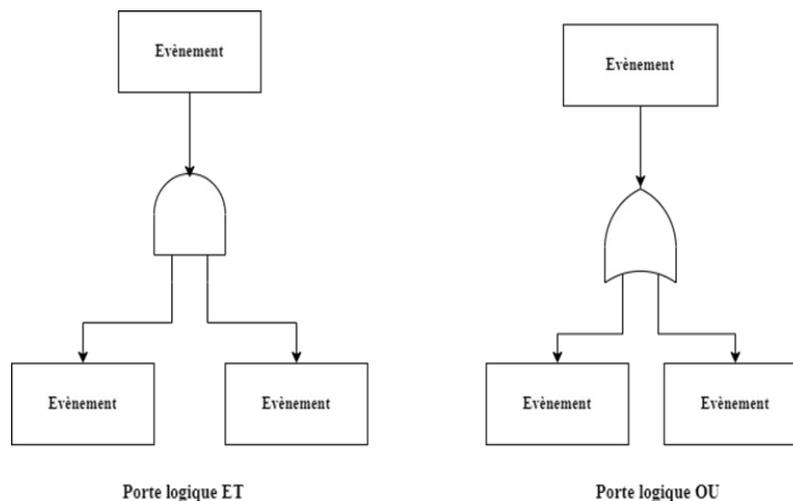
L'événement étudié étant défini, l'étape suivante est de le décrire en une combinaison logique (conjonction ou disjonction) de deux ou plusieurs événements plus réduits.[26]

### 2.10.3 Evènements de base, transfert et conditions

- Il est possible de prendre en compte des évènements sur lesquels les informations sont insuffisantes pour les décomposer davantage ou encore qu'il n'est pas utile de développer plus, ces évènements sont appelés évènements non développés.
- Lors de la construction de gros arbres de défaillances, il est pratique d'utiliser des portes de transfert, permettant ainsi de rendre la lecture et la validation de l'arbre plus aisée.
- Ces portes signalent que la suite de l'arbre est développée sur une autre page.
- Les évènements de bases sont les évènements les plus fins de l'arbre, il ne sera pas possible de les détailler davantage ; ils concernent la défaillance (électrique, mécanique, logiciel. . . ) d'un élément du système. [26]

### 2.10.2 Portes logiques

Les deux connecteurs logiques de base sont ET et OU (figure (III.3)). Toutes les combinaisons logiques s'expriment avec ces deux connecteurs (et la négation logique qui exprime le contraire de l'événement qu'elle affecte), mais il peut être pratique d'utiliser quelques autres connecteurs : vote n/p, OU exclusif.[25]



**Fig. III.3** Portes logiques : a) ET et b) OU

## 2.11 Conditions

Quand on s'interroge sur ce qui peut produire tel événement-conséquence, on est couramment amené à dire que tel autre événement cause entraîne l'événement-conséquence étudié si telle condition est présente. Nous sommes donc conduits à introduire dans l'arbre des conditions dont la réalisation conditionne l'enchaînement cause-conséquence. Pour qu'un événement (sommet ou intermédiaire) se produise, il faut une combinaison d'événements mais aussi souvent de conditions (on pourrait dire d'états ou de situations). Ces conditions interviennent dans la construction d'un arbre exactement comme des événements intermédiaires (sauf qu'elles ne sont plus décomposées et donc deviennent « de base » même si les événements de même niveau avec lesquels elles se combinent sont eux, décomposés plus finement) ou comme des événements de base, mais ne sont pas à proprement parler des événements.[21]

## 3 APPLICATION

### 3.0.1 Identification de l'évènement redouté et les évènements probables

On a essayé d'identifier les causes le plus probables et intéressantes Conditions Quand on s'interroge sur ce qui peut produire tel événement-conséquence, on est couramment amené à dire que tel autre événement cause entraîne l'événement-conséquence étudié si telle condition est présente. Nous sommes donc conduits à introduire dans l'arbre des conditions dont la

réalisation conditionne l'enchaînement cause-conséquence. Pour qu'un événement (sommet ou intermédiaire) se produise, il faut une combinaison d'événements mais aussi souvent de conditions (on pourrait dire d'états ou de situations). Ces conditions interviennent dans la construction d'un arbre exactement comme des événements intermédiaires (sauf qu'elles ne sont plus décomposées et donc deviennent « de base » même si les événements de même niveau avec lesquels elles se combinent sont eux, décomposés plus finement) ou comme des événements de base, mais ne sont pas à proprement parler des événements.[25]

Le tableau (III.3) présente une tentative d'identification des causes les plus probables et intéressantes. La figure intitulée "Arbre de défaillance d'un alternateur de groupe électrogène" illustre ces causes de manière structurée, facilitant ainsi leur analyse et la mise en place de mesures correctives.

**Tableau III.3** – Liste des événements probables.

<i>Événements redouté</i>	<i>Événement probable</i>
<b><i>Alternateur ne démarre pas</i></b>	<i>Pas de transmission (moteur-génératrice)</i>
	<i>Court-circuit bobine</i>
	<i>Rupture de bobine</i>
	<i>Défauts (erreur) de montage</i>
	<i>Défauts de matériaux (métallurgie)</i>
	<i>Défauts d'isolation</i>
	<i>Surcharge et surchauffe</i>
	<i>Vibration et chocs électrique</i>
	<i>Vieillessement et fatigue</i>
	<i>Condition de l'environnement</i>

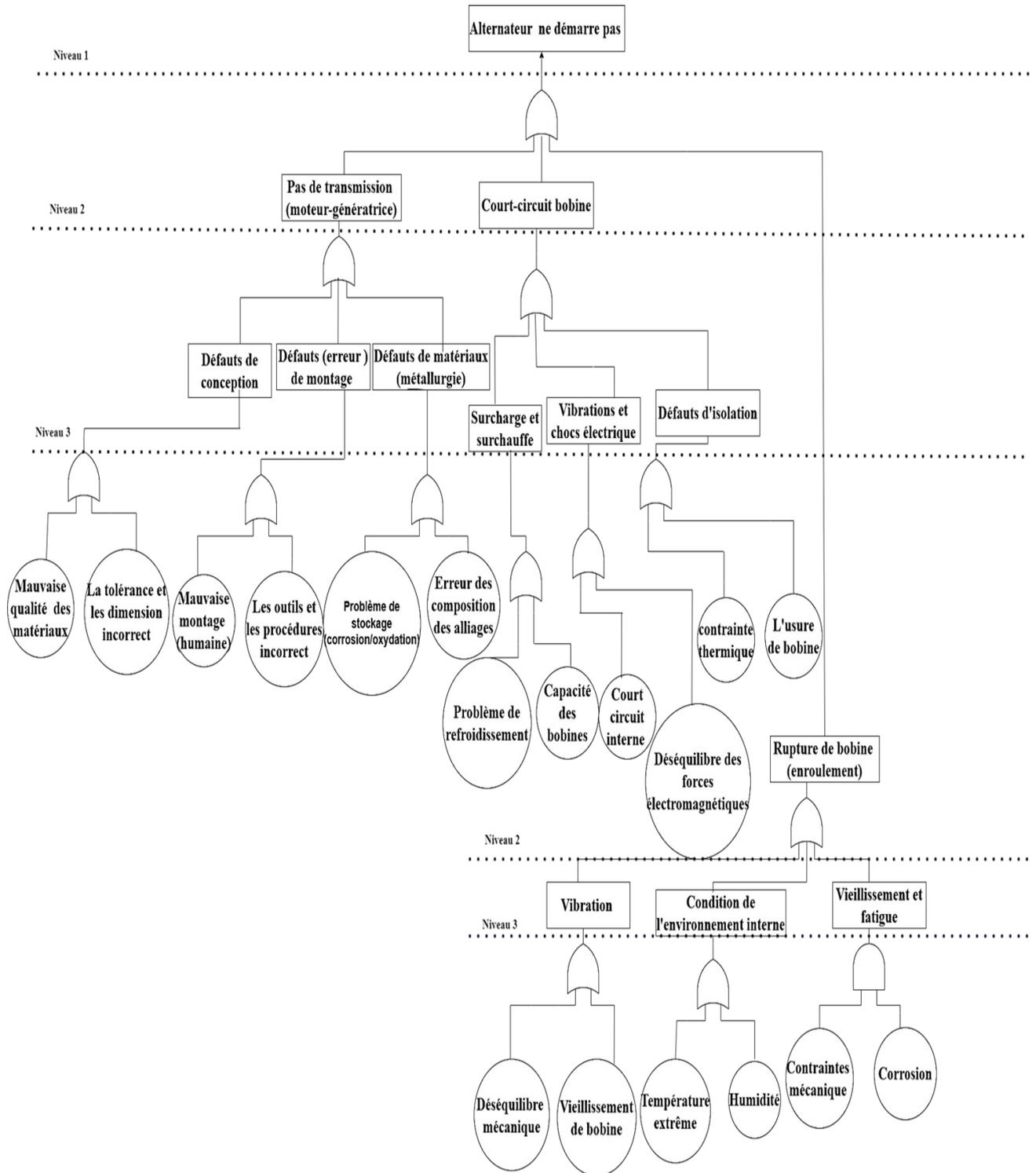


Fig. III.4 Arbre de défaillance d'un Alternateur de groupe électrogène.

### 3.1 Logiciel de simulation

Après avoir extrait l'Arbre de défaillance d'un alternateur de groupe électrogène, nous avons suivi un processus typique dans le logiciel de simulation Netica. Ce processus a inclus l'importation des données de l'arbre, la vérification des relations causales entre les différents événements et la simulation des scénarios de défaillance potentiels. Grâce à Netica, nous avons pu analyser les résultats obtenus et identifier les points critiques du système. Cela nous a permis de proposer des mesures correctives spécifiques pour améliorer la fiabilité et l'efficacité de l'alternateur. En utilisant cet outil, nous avons optimisé notre analyse et renforcé notre compréhension des mécanismes de défaillance.

#### 3.1.1 Netica

L'application informatique Netica offre un outil intégré pour l'utilisation des réseaux bayésiens et des diagrammes d'influence classiques. Les réseaux bayésiens offrent la possibilité d'explorer différents scénarios potentiels pour le système étudié. En utilisant son moteur d'inférence, il est capable de créer, d'acquérir, de modifier, de transformer et de stocker des réseaux, ainsi que de répondre à des demandes ou de trouver des solutions optimales. Il peut acquérir des connaissances sur les relations probabilistes à partir de données. Il est capable d'identifier des solutions optimales pour des problèmes de prise de décision séquentielle (c'est-à-dire que les décisions ultérieures sont influencées par les résultats des décisions précédentes). [27]

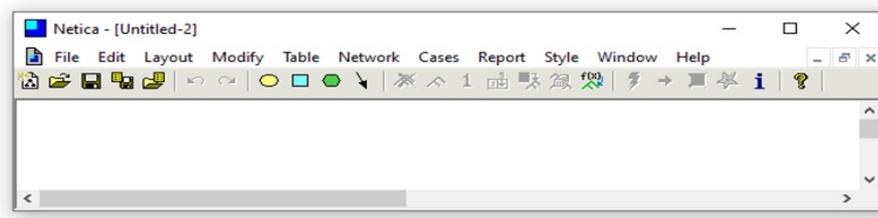
#### 3.1.2 Objectifs de Netica

1. Construire des réseaux bayésiens en utilisant l'interface graphique et en entrant les données pertinentes.
2. Compiler le réseau et effectuer différents types d'inférence probabiliste et expérimenter avec le réseau.
3. Observer l'indépendance et la dépendance conditionnelles par l'expérimentation.
4. Effectuer une analyse de sensibilité sur le réseau en utilisant l'information mutuelle.
5. Construire un diagramme d'influence en étendant le réseau bayésien que vous avez construit.
6. Trouvez la politique de décision optimale à partir du diagramme d'influence.

7. Apprendre les probabilités à partir des données pour un réseau dont la structure graphique est connue [27]

### 3.1.3 Interface de Netica

Cette version Netica 4.16, comporte de nombreuses nouvelles fonctionnalités et beaucoup d'autres sont en cours de développement. Leurs bibliothèques de logiciel pouvant être reliées entre elles par plusieurs langages et plateformes comme JAVA, C, C#, Visual Basic/COM et Matlab. [27]



**Fig. III.5** Interface graphique de Netica 4.16.

Nous avons simulé deux cas à l'aide du logiciel de simulation Netica. Dans le premier cas, nous avons analysé le système en état de fonctionnement, observant ses performances optimales et son efficacité. Le deuxième cas concernait le système en état de dysfonctionnement, ce qui nous a permis d'identifier les faiblesses et les points de défaillance critiques. Ces simulations ont fourni des données précieuses pour comprendre les comportements du système dans différentes conditions. Grâce à cette analyse, nous avons pu proposer des solutions pour améliorer la fiabilité et la résilience du système.

#### **Cas 01 : Système en état de fonctionnement**

Nous avons tenté de simuler le fonctionnement du système en utilisant le logiciel Netica. Nous avons suggéré que le système est fiable, ce qui a entraîné le démarrage de l'alternateur. La figure (III.6) représente les probabilités de décision de l'événement favorable sous Netica.

transmission	court_circuit	enroulem...	alternateur
defaillance	defaillance	defaillance	TRUE
defaillance	defaillance	fiab	TRUE
defaillance	fiab	defaillance	TRUE
defaillance	fiab	fiab	TRUE
fiab	defaillance	defaillance	TRUE
fiab	defaillance	fiab	TRUE
fiab	fiab	defaillance	TRUE
fiab	fiab	fiab	FALSE

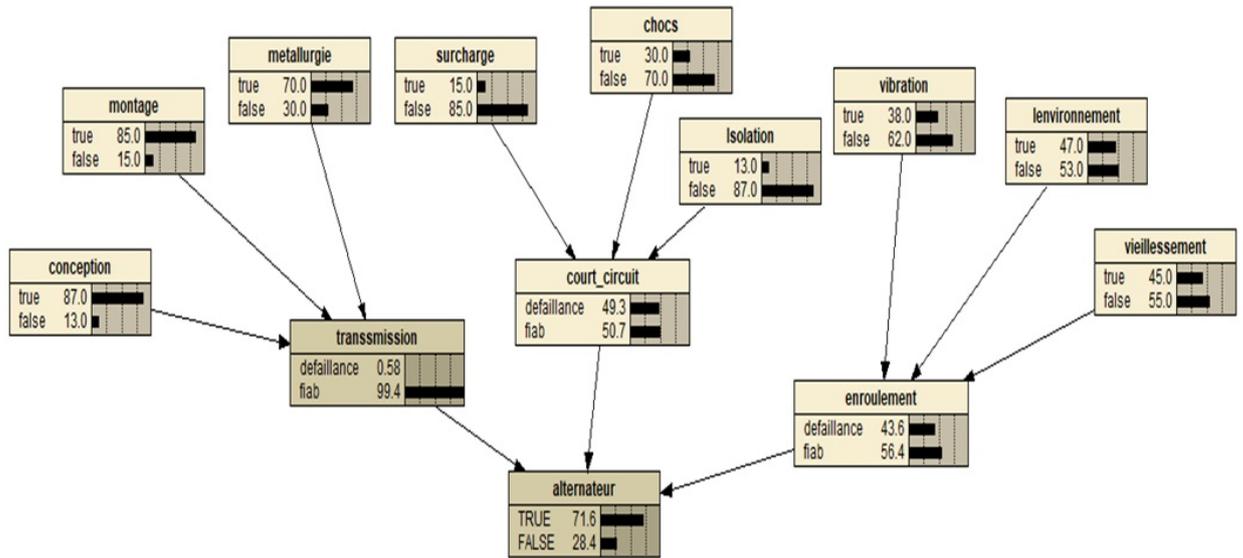
Fig. III.6 probabilités de décision de l'évènement favorable.

L'étape suivante on a monté des données (probabilités) des évènements défaut de montage, métallurgie et conception puis le deuxième évènements (chocs, surcharge, isolation) et le troisième (vibration l'environnement et vieillissement) , puis après le processus de remplissage des données nous avons obtenu les possibilités suivantes dans le deuxième niveau . La figure III.7 représente les probabilités des évènements aux deuxième niveau .

enroulement	court_circuit	transmission
vieilles... environ... vibration	surcharge chocs Isolation	conception montage metallurgie
defailla... fiab	defailla... fiab	transmission
true true true 40 60	true true true 70 30	true true true fiab
true true false 40 60	true true false 70 30	true true false fiab
true false true 40 60	true false true 70 30	true false true fiab
true false false 40 60	true false false 70 30	true false false fiab
false true true 40 60	false true true 70 30	false true true fiab
false true false 40 60	false true false 70 30	false true false fiab
false false true 40 60	false false true 70 30	false false true fiab

Fig. III.7 Probabilités des évènements de fonctionnement.

Après l'obtention de ces probabilités, nous avons effectué la simulation et dégager les résultats sous forme de réseaux .



**Fig. III.8** Simulation de l'alternateur en état de fonctionnement.

La figure (III.8) montre le résultat final de la simulation sous environnement Netica dans laquelle on peut lire les probabilités qui quantifient les causes qui génèrent l'évènement favorable « l'alternateur continu de fonctionner ». Dans ce qui suit, on Après cette dernière simulation et presque toutes les chances étaient fiables ce qui signifie que le taux de fiabilités et supérieure au taux de défaillance.

**Cas 02 : Système en état de dysfonctionnement**

Après avoir effectué une enquête de terrain auprès des réparateurs et des professionnels des machines électriques , il a été constaté que la probabilité de défaillance de l'évènement « pas de transmission » est plus faible que celle des évènements « court-circuit de bobine » et « défaut d'enroulement de bobine ». Ainsi, on a supposé initialement les probabilités des causes afin de mener la simulation. La figure (III.9) représente le tableau des probabilités conditionnelles sous logiciel Netica.

transmission	court_circuit	enroulem...	alternateur
defaillance	defaillance	defaillance	FALSE
defaillance	defaillance	fiab	FALSE
defaillance	fiab	defaillance	FALSE
defaillance	fiab	fiab	FALSE
fiab	defaillance	defaillance	FALSE
fiab	defaillance	fiab	FALSE
fiab	fiab	defaillance	FALSE
fiab	fiab	fiab	TRUE

Fig. III.9 TPC de l'évènement redouté .

L'étape suivante montre la saisie des données (probabilités) des évènements relatifs à la catégorie défaut de montage ,défauts métallurgiques et défaut de conception ensuite les probabilités relatives à la catégorie d'évènements tel que chocs, surcharge, isolation et enfin les probabilités relatives à la catégorie d'évènements tel que vibration l'environnement et vieillissement.

Node	Chance	% Probability
surcharge	30	70
conception	87	13
montage	85	15
environnement	47	53

Fig. III.10 Probabilités des évènements.

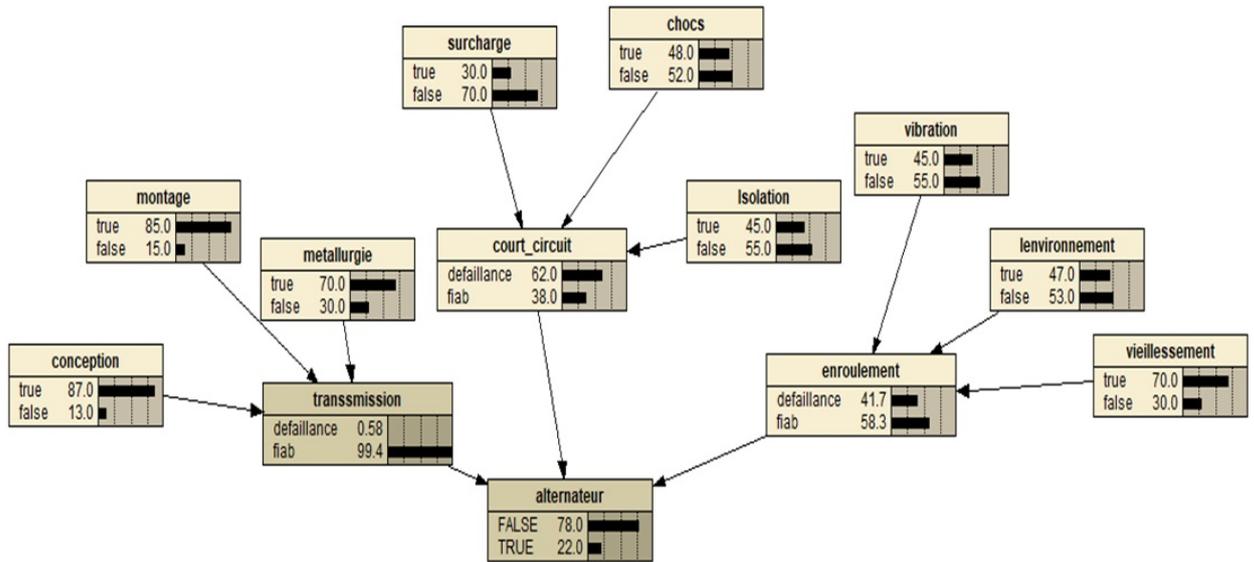


Fig. III.11 Simulation de l'alternateur en état de dysfonctionnement.

### 3.2 Interprétation et discussion

- Les probabilités d'occurrences des défaillances « court-circuit de bobine » « défaut enroulement de bobine » et « pas de transmission », étant respectivement de 62 %, 41,7 % et 0.58 %, sont parmi les raisons d'un dysfonctionnement redouté de l'alternateur. Cela nous permet de mettre à jour nos convictions concernant la probabilité à priori.

- Selon les résultats obtenus lors de la simulation, il est évident que la défaillance est principalement due aux événements de court-circuit de bobine et d'enroulement de bobine. Ces événements sont les plus probables de défaillance de l'alternateur et doivent être traités en priorité en termes d'analyse des causes en utilisant les outils tel que la RCFA (Roots Cause Failure Analysis).

- En outre, comme stratégie de maintenance on peut opter pour la maintenance préventive prédictive peut prendre la forme d'une condition ou d'un processus.

- Cependant, grâce au modèle bayésien, il est possible d'envisager une troisième option : la maintenance prédictive ciblée.

## 4 Conclusion

Au terme de ce chapitre, nous avons effectué un diagnostic de l'alternateur d'un groupe électrogène (Volvo, Atlas Copco) utilisé comme source de secours urgente en énergie électrique

dans les secteurs tel que les hôpitaux, les banques, les assurances, les industries . . . etc. La capacité d'explorer différents scénarios de diagnostic par la théorie des réseaux bayésiens offre une flexibilité stratégique précieuse pour optimiser les interventions de maintenance et les ressources disponibles. À partir d'une analyse dysfonctionnelle basé sur l'outil arbre de défaillance, nous avons traduit ce dernier dans le logiciel Netica qui est basé sur les réseaux bayésiens pour simuler et identifier clairement les principales causes de défaillance et de développer des stratégies de maintenance préventive plus efficaces. En se concentrant sur les probabilités élevées relatives aux défauts « courts-circuits de bobine » et « enroulements de bobine », on peut proposer une approche de maintenance prédictive ciblée à travers laquelle il est possible d'améliorer significativement la fiabilité et la durabilité des alternateurs.

Conclusion général

# Conclusion général

---

## Conclusion général

Au terme de ce mémoire, qui synthétise le projet de fin d'études de notre cursus universitaire au sein du département de génie mécanique de la faculté des sciences appliquées de l'université de Tiaret, le fait de traiter une problématique issue du milieu professionnel et industriel nous a donné l'occasion d'acquérir et de renforcer nos connaissances sur les réalités de la maintenance dans le domaine technique dans l'industrie. En outre, le thème traité par notre projet de fin d'études nous a facilités en tant qu'étudiants l'intégration progressive dans notre future cadre de travail.

On peut dire et juger que les objectifs fixés et tracés dans notre plan de travail ont été atteints étant donné qu'on n'a pu effectué une analyse dysfonctionnelle qualitative et quantitative des modes de défaillance d'un alternateur pour groupe électrogène. Autrement dit, nous avons développé l'arbre de défaillance probabilisé concernant l'évènement redouté « Alternateur ne démarre pas ». Dans un deuxième temps, nous avons procédé à la simulation de cet évènement en utilisant le logiciel Netica 4.16.

Quant aux résultats obtenus lors de la simulation, il est évident que la défaillance est principalement due aux événements de court-circuit de bobine et d'enroulement de bobine. Ces événements sont les plus probables de défaillance de l'alternateur et doivent être traités en priorité en termes d'analyse des causes en utilisant les outils tel que la RCFA (Roots Cause Failure Analysis). Il convient de souligner que le manque de données concrètes ainsi que l'absence d'un historique complet, les résultats obtenus sujets à une véritable comparaison et à une révision.

Comme perspective, le résultat de notre travail peut servir comme référence pour créer un code source qui peut être implanté dans le microcontrôleur de la carte de gestion électronique du groupe électrogène afin d'améliorer le contenu du diagnostic déjà existant. Concernant

l'événement intermédiaire « court-circuit bobine », il peut être prédit diagnostiqué à travers un paramètre de suivi tel que la température qui nous indiquera le phénomène d'échauffement des enroulements. Cette opération ne peut avoir lieu sans la mise en place d'une chaîne de mesure et une instrumentation à base de capteur tel qu'un pyromètre qui captera la température avec un niveau global soit à l'extérieur de l'alternateur soit à l'intérieur. Le niveau de température mesuré peut faire l'objet d'une analyse thermographique dans le cadre d'une maintenance prédictive ciblé pour les défauts électriques.



Ensemble, ces tableaux fournissent une approche structurée et efficace pour diagnostiquer et résoudre les problèmes, garantissant une performance optimale des alternateurs et une fiabilité accrue du système de production d'énergie.

## Images Illustrant les Défaits d'un Alternateur

Cette annexe présente une série d'images illustrant les défauts courants que l'on peut rencontrer dans un alternateur, en particulier au niveau du stator et du rotor. Le stator, composant fixe de l'alternateur, est susceptible de subir des dommages tels que des enroulements brûlés, des court-circuits ou des isolations endommagées, souvent causés par des surcharges électriques ou des conditions environnementales extrêmes. Le rotor, composant mobile, peut être affecté par des déséquilibres mécaniques, des vibrations excessives, ou des fissures dans les enroulements ou les pôles, résultant de l'usure ou de défauts de fabrication. Ces images permettent d'identifier visuellement ces défauts, facilitant ainsi le diagnostic et la mise en œuvre de mesures correctives pour éviter les pannes majeures et prolonger la durée de vie de l'alternateur.



(a)



(b)

**Fig. 12** *les défauts d'un alternateur Rotor*



(a)



(b)

**Fig. 13** *les défauts d'un alternateur Stator*

# Bibliographie

---

- [1] M Smaili and Y Baloul. *Conception d'un moteur fonctionnant au GPL*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [2] Abderrahman Debbache, Abdessamad Rabhi, and Samir Encadreur Bounneche. *Etude et conception d'une grue d'atelier mobile destinée à l'atelier du hall de technologie*. PhD thesis, Université de Jijel, 2021.
- [3] Jackadit. Analyse fonctionnelle externe. <http://jackadit.com/index.php?p=ecoconception2>. dernier accès le 13/02/2024.
- [4] Diomidis H Stamatis. *Failure mode and effect analysis*. Quality Press, 2003.
- [5] Abdelhak Mkhida. *Contribution à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des Systèmes Instrumentés de Sécurité à Intelligence Distribuée. (Contribution to assessing the dependability of safety instrumented systems integrating intelligence)*. PhD thesis, National Polytechnic Institute of Lorraine, Nancy, France, 2008.
- [6] James R Norris. *Markov chains*. Number 2. Cambridge university press, 1998.
- [7] Holger Hermanns and Holger Hermanns. *Markov Chains*. Springer, 2002.
- [8] Aliane Chafa and Zerioul Aziz. *Etude d'un groupe électrogène par simulation numérique*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [9] L. Gueraiche. Conception des systèmes mécaniques. <http://elearning.univjijel.dz/course/view.php?id=1367>. dernier accès le 13/02/2024.
- [10] Younes HORKOUS and Ahmed KHOUIDMI. *Diagnostic des pannes des machines par la technique de l'arbre de défaillance*. PhD thesis, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2021.
- [11] MOHAMMED LAAKHDAR KADRI et al. *Application de la méthode AMDEC sur une machine clé en service*. PhD thesis.
- [12] Izabela Rojek, Małgorzata Jasiulewicz-Kaczmarek, Mariusz Piechowski, and Dariusz Mikołajewski. An artificial intelligence approach for improving maintenance to supervise machine failures and support their repair. *Applied Sciences*, 13(8) :4971, 2023.
- [13] Saed Mallak, Mohammad Kanan, Nidal Al-Ramahi, Aya Qedan, Hadi Khalilia, Ahmad Khassati, Rania Wannan, Mohammad Mara'beh, Samer Alsadi, and Abdalmuttaleb Al-Sartawi. Using markov chains and data mining techniques to predict students' academic performance. *Inf. Sci. Lett*, 12(9) :2073–2083, 2023.
- [14] Shaopeng Wu and Shumei Cui. *Pulsed alternators technologies and application*. Springer, 2021.
- [15] Paul C Krause and Thomas C Krause. *Introduction to Modern Analysis of Electric Machines and Drives*. John Wiley & Sons, 2022.
- [16] HOUSSAM EDDINE DJABOUREBBI and MOHAMMED TAHAR HANED. *Modélisation et simulation d'un système éolien à base d'un alternateur*. PhD thesis, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [17] Naima RAHOUA. *Contribution aux Contrôles des Générateurs Synchrones à Aimants Permanents*. PhD thesis, Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.

- [18] Théodore Wildi. *Électrotechnique (4e édition)*. Presses de l'université Laval, 2005.
- [19] LADJALI Nazar. *Etude AMDEC et mise en place d'un planning de maintenance préventive Application sur un groupe électrogène 300KVA Cas : l'entreprise nationale l'ENIEM*. PhD thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2021.
- [20] Paresh Chandra Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics, International Adaptation*. John Wiley & Sons, 2021.
- [21] Anthony J Pansini. *Electrical distribution engineering*. River Publishers, 2020.
- [22] João César de Freitas Fonseca, José Newton Garcia de Araújo, Carlos Eduardo Carrusca Vieira, and Rodrigo Padrini Monteiro. Une expérience de recherche-intervention dans une entreprise d'exploitation minière : défis et possibilités. *Communiquer*, (30), 2020.
- [23] Burgasí Delgado, Dayanara Dominique, Diana Valeria Cobo Panchi, Karen Tatiana Pérez Salazar, Roger Leonardo Pilacuan Pinos, and María Belén Rocha Guano. El diagrama de ishikawa como herramienta de calidad en la educación : una revisión de los últimos 7 años. *Tomado de [http://tambara.org/wpcontent/uploads/2021/04/DIAGRAMAISHIKAWA\\_FINAL-PDF.pdf](http://tambara.org/wpcontent/uploads/2021/04/DIAGRAMAISHIKAWA_FINAL-PDF.pdf)*, 2021.
- [24] Ayman KASSBI, Souad FILALI EL GHORFI, and Hicham ACHELHI. La gestion du risque professionnel infectieux dans le milieu hospitalier-cas des accidents d'exposition au sang chez le personnel soignant au niveau des urgences.
- [25] A.BENAIDA, M.OSMANI. «Arbre de défaillances des garnitures mécaniques pour pompes centrifuges multicellulaires», Mémoire fin d'étude Master , Université Tiaret, 2021.
- [26] Kassas.B «Application de l'arbre de défaillance « Fault-tree » pour le système du ballon à vapeur au niveau de l'unité Production Ammoniac» Mémoire fin d'étude master, Université Tiaret, 2017.
- [27] Netic. Netic's Help System. <https://www.norsys.com/WebHelp/NETICA.htm>. Dernier accès le 13/02/2024.

---

## ملخص

في هذا العمل، قدمنا تشخيصاً بناءً على طريقة شجرة الاعطال لمحول المولد، إن إنشاء شجرة الأخطاء هذه يجعل من الممكن إنشاء شبكة بايزي. وهذا يجعل من الممكن تقييم الوضع المستقبلي بناءً على المعرفة المستمدة من المحاكاة الحالية. تم توضيح هذا التقييم من خلال حالة صناعية باستخدام برنامج Netica.

## **كلمات مفتاحية:**

تشخيص، محول كهربائي مولد كهربائي شجرة الاعطال، شبكة بايزية، احتمال

## Résumé

*Dans cette étude, nous avons élaboré un diagnostic en utilisant la méthode de l'arbre de défaillance pour un alternateur de groupe électrogène. La mise en place d'un arbre de défaillance permet de créer un réseau bayésien. Cela permet de faire une évaluation de la situation future en se basant sur la connaissance de la simulation actuelle, et l'évaluation est illustrée dans un cas industriel en utilisant le logiciel Netica.*

## **Mots clés :**

*Diagnostic ; Alternateur ; Groupe électrogène ; Arbre de Défaillance ; Réseau Bayésien ; Probabilité*

## Abstract

*In this work, we presented a diagnosis based on the failure shaft method for a alternator of generator, the construction of a failure shaft allows to build a Bayesian network. This makes it possible to assess the future state of affairs using the information from the ongoing simulation. An industrial scenario utilizing the Netica software illustrates how this technique is evaluated by an application.*

## **Keywords: ;**

*Diagnoses, Alternator ; Generator ;; Fault Tree; Bayesian Network; Probability*

---