الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معـــــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électromécanique

Option : Maintenance industrielle

Contribution à L'amélioration de la Fiabilité du Moteur du Groupe électrogène par la Méthode MCDM

Par

Khelladi Kamel et Bouhrik Tamer

Devant le jury :

Zaamouche Fares	**Président**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Aoulmi Zoubir	**Encadreur**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Moghrani Radouane	**Examinateur**	**MAA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitair 2024/2025

Introduction Générale.....1

Chapitre I:

Présentation de l'entreprise.

I-1-Historique de l'ENTP.....4

I-2-L'environnement de l'entreprise ENTP.....5

I-3-Mission de l'E.N.T.P.....5

I-4- Les moyens de l'entreprise ENTP.....6

I-5-Système de gestion de l'entreprise.....8

I-6- Le but de la nouvelle structure de l'E.N.T.P.....8

I-7- Activités complémentaires de l'E.N.T.P.....9

ChapitreII :

Généralité sur la maintenance

II-1-Introduction 10

II-2- Définition de la maintenance.....10

II-3- Types de maintenance.....12

II-3-1- Maintenance corrective.....12

II-3-1-1 maintenance palliative.....12

II-3-1-2-maintenance curative.....12

II-3-2-But Maintenance corrective 12

II-3-3-Maintenance préventive.....12

II-3-3-1- Maintenance préventive systématique.....13

II-3-3-2- Maintenance préventive conditionnelle.....13

II-3-3-3- Maintenance préventive prévisionnelle.....13

II-3-4-But de la maintenance préventive.....13

II-4- Opérations de Maintenance.....14

II-4-1-Opérations de maintenance corrective.....14

II-4-1-1- localisation de défaillance.....15

II-4-1-2-Remise en état.....15

II-4-1-3- Durabilité.....15

II-4-2-Opérations de maintenance préventive.....16

II-4-2-1- Entretien 16

II-4-2-2- Surveillance.....16

II-4-2-3- Révision.....17

II-4-2-4-Préservation.....17
II-5-Niveaux de maintenance.....17
Chapitre III
III-1-Quelques définitions 19
III-1-1-Définition d'une panne et d'une défaillance.....19
III-1-2-Mode de défaillance.....19
III-1-3- Effet de la défaillance.....20
III-1-4- Causes de défaillance.....20
III-2- Définition et caractéristiques techniques du groupe électrogène 24
III-2-1- Définition générale.....24
III-2-2- Présentation du Caterpillar 3512.....24
III-2-3- Caractéristiques techniques principales.....25
III-2-4- Applications typiques.....25
III-2-5-Composants principaux du groupe électrogène 25
III-2-6-Modes de fonctionnement et configurations possibles.....26
III-2-7--Enjeux liés à l'exploitation du 3512.....26
III-2-8-Étude technique des pannes courantes du groupe électrogène.....27
III-2-8-1- Pannes mécaniques.....27
III-2-8-2- Pannes électriques.....27
III-2-8-3- Pannes liées au refroidissement.....27
III-2-8-4- Pannes du système de carburant.....27
III-2-8-5- Pannes du système de lubrification.....28
III-2-8-6- Pannes de l'automate de commande / système de contrôle.....28
. III-2-8-7- Défaillances environnementales ou externes.....28
III-3-Analyse de Pareto (méthode ABC).....29
III-3-1-Introduction.....29
III-3-2-Présentation de la loi de Pareto.....29
III-3-3-Explication de la méthode abc.....30
III-3-4-Mise en application de la méthode abc avec la loi de Pareto.....30
III-3-5-Les avantages de l'utilisation de la méthode ABC et de la loi de Pareto.....31
III-4 - La méthode AMDEC.....32
III-4-1- Définition de l'AMDEC.....32
III-4-2- Principes Fondamentaux.....32

III-4-3-Objectifs de l'AMDEC.....32
III-4-4- Avantages de la Méthode.....33
III-4-5-Typologies d'AMDEC.....33
III-4-6-Démarche Méthodologique de l'AMDEC.....34
III-4-7- Échelles de Cotation.....34
III-4-8-Seuil Critique de Déclenchementt.....35
III-5-Recherche des causes racines (Diagramme Ishikawa).....36
III-5-1-Introduction.....36
III-5-2-Définition du Diagramme d'Ishikawa.....37
III-5-3-définitions scientifiques des 6M du diagramme d'Ishikawa.....37
III-5-4-Bénéfices du Diagramme d'Ishikawa.....38
III-6-La prise de décision multicritères (MCDM).....39
III-6-1- Introduction.....39
III-6-2- Définition.....39
III-6-3- Classification des méthodes.....40
III-6-3-1-Méthodes d'agrégation.....40
III-6-3-2-Méthodes interactive.....41
III-6-3-3-Méthodes de sur-classement.....42
III-6-4- Les méthodes d'aide à la décision multicritères MCDM.....42
III-6-4-1- Méthode AHP.....42
III-6-4-2- La méthode FUZZY-AHP.....45
III-6-4-3- Best and Worst Méthode (BWM) (méthode de meilleure et pire).....46
III-6-4-4- Méthode DEMATAL.....49
III-6-4-5- Méthode TOPSIS.....51
III-6-4-6- SAW: Simple Additive Weighting Méthode.....54
III-6-5- Conclusion.....55
III-7- Fiabilité.....55
III-7-1- Définition.....55
III-7-2- Application de la fiabilité.....55
III-7-3- Différentes lois de la fiabilité.....56
III-7-3-1-. Loi exponentielle.....56
III-7-3-2-Loi de Weibull.....57
III-7-4-Conclusion.....58

Chapitre IV

Utilisation de la méthode hybride AMDEC-MCDM pour la détection des modes de défaillance critiques d'un système de groupe électrogène

IV-1-Introduction.....59
IV-2- Application de la methode PARETO.....61
IV-2-1-Interprétation de la courbe ABC.....61
IV-3- Méthodologie.....64
IV-3-1- Phase 1 : Identification des pondérations influentes.....64
IV-3-1-1- Méthode d'entropie 64
IV-3-2- Phase 2 : Utilisation de différentes méthodes pour obtenir le classement des modes de défaillance.....65
IV-3-2-1- MCDM approaches': VIKOR, EDAS et MOORA.....65
IV-3-3- Modèle hybride MCDM fondé sur l'approche AMDEC.....70
IV-4- ÉTUDE DE CAS.....71
IV-4-1- Résultats et discutions.....72
IV-5-Conclusion.....77
Conclusion générale.....78

Liste des figures

- Figure 01: Evolution des ressources humaines (2019-2024).....7
- Figure 02: Les différentes formes de maintenance.....11
- Figure 03: Les opérations de maintenance.....14
- figure 04: les causes de défaillance.....22
- figure 05: Causes et éffet.....22
- Figure0 6: Groupe électrogène Caterpillar 3512.....25
- Figure 07:Diagramme de Pareto ou courbe ABC.....31
- Figure 08: Diagramme cause- éffet.....38
- Figure 09: Structure de la hiérarchie AHP.....43
- Figure 09.1: les étapes de la méthode AHP.....44
- Figure 09.2: les étapes de la méthode FUZZY-AHP.....46
- Figure 09.3: les étapes de la méthode BWM.....48
- Figure 09.4: les étapes de la méthode Dematal.....51
- Figure 09.5: Processus de la méthode TOPSIS.....53
- Figure 09.6: les étapes de la méthode SAW.....55
- Figure 10. Probabilités complémentaires.....56
- Figure 10.1Tracé de la loi exponentielle.....57
- Figure:11 Diagramme de pareto avec classification ABC.....63
- Figure :12 Classement des pannes par les différentes méthodes.....76

Liste des tableaux

- Tableau-01 : Etat du parc appareils de l'entreprise ENTP a 2025.....6
- Tableau-02 : Ressources Humaines.....7
- Tableau 03 : les pannes critiques – Groupe électrogène Caterpillar 3512.....29
- Tableau 04 : Grille de cotation de la probabilité d'occurrence.....35
- Tableau 05 : Grille de cotation de la gravite.....35
- Tableau 06 : Grille de cotation de la probabilité de non detection.....35
- Tableau 07: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.....43
- Tableau 08: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP.....45
- Tableau 09: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans BWM.....47
- Tableau 10: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans DEMATAL.....49
- Tableau10: la cumule des pannes du groupe électrogène.....62
- Tableau12 : Termes linguistiques et valeurs pour les paramètres de l'AMDEC..... 64

- Tableau13: Résultats de la méthode AMDEC.....72
- Tableau14: Comparaison des cinq premières défaillances selon différentes méthodes.....74
- Tableau 15: Les différents poids des paramètres G, F et D.....74
- Tableau 16: Classement final des modes de défaillance par tout les méthodes utilisées.....75
- Tableau17: Les différents poids des méthodes selon la matrice des classements.....76
- Tableau 18: Classement des six premiers pannes par les différentes méthodes.....76

Introduction Générale

À une époque où le progrès technologique et industriel s'accélère, la fiabilité opérationnelle des équipements et des systèmes industriels est devenue l'un des piliers fondamentaux sur lesquels les entreprises s'appuient pour garantir la continuité de la production, la qualité des performances, et la réduction des coûts liés aux pannes et aux arrêts imprévus. Les groupes électrogènes représentent à cet égard un exemple typique de ces systèmes critiques, car ils assurent une source d'énergie essentielle ou de secours dans de nombreuses applications industrielles, médicales et de services.

Le moteur constitue le cœur battant de ces groupes, assurant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Cependant, à l'instar de tout équipement industriel, ce moteur est exposé à une dégradation progressive de ses performances au fil du temps, en raison de divers facteurs tels que : l'usure des composants, des conditions d'exploitation sévères, des stratégies de maintenance inadéquates, ou encore des interventions humaines inefficaces. Ces facteurs entraînent une augmentation du taux de défaillances, une prolongation des temps d'arrêt, et des coûts de réparation élevés, impactant directement l'efficacité globale du système industriel.

Face à cette réalité, il devient impératif d'explorer des approches scientifiques rigoureuses pour améliorer la fiabilité de ces moteurs, à travers le développement de stratégies de maintenance planifiées prenant en compte les exigences techniques, opérationnelles et économiques. L'utilisation des méthode classiques tel que la méthode AMDEC, est limité par les problèmes de son injective et non surjective de la fonction RPN.

Dans ce cadre, la méthode d'aide à la décision multicritère (MCDM - Multi-Criteria Decision Making) s'impose comme un outil performant permettant aux décideurs d'évaluer et d'analyser les différentes alternatives de maintenance ou d'amélioration, en s'appuyant sur un ensemble de critères parfois contradictoires (comme le coût versus la performance, ou le temps versus le niveau de sécurité).

Dans cette perspective, le présent travail, est contribution à l'amélioration de la fiabilité du moteur du groupe électrogène par la méthode MCDM (Multi-Criteria Decision Making)

Il vise à développer un modèle analytique et applicatif permettant de choisir les meilleures stratégies possibles de maintenance ou d'amélioration, basé sur des critères mesurables et

scientifiquement justifiables, avec l'application sur un cas réel pour évaluer l'efficacité du modèle dans un environnement industriel concret.

- **Problématique**

À partir de ce constat, la problématique générale de cette recherche peut être formulée comme suit :

> **Comment peut-on adopter la méthode MCDM pour améliorer la fiabilité du moteur d'un groupe électrogène de manière scientifique et opérationnelle, afin de réduire les pannes et atteindre un niveau de performance optimal** ?

- **Importance de la recherche**

L'intérêt de ce travail réside dans le fait qu'il propose une approche scientifique avancée, combinant les principes de la maintenance industrielle moderne avec des techniques d'analyse décisionnelle, ce qui le rend particulièrement utile pour les ingénieurs, techniciens et responsables de maintenance. En outre, les résultats de cette étude peuvent être généralisés à d'autres équipements industriels critiques, ayant des enjeux similaires en matière de fiabilité et de continuité de service.

- **Objectifs de la recherche**

Ce travail a pour objectifs principaux de :

- ✓ Étudier et analyser les causes des défaillances et de la baisse de fiabilité du moteur du groupe électrogène.
- ✓ Identifier les critères les plus influents dans le processus de prise de décision en matière de maintenance ou d'amélioration.
- ✓ Application de la méthode AMDEC
- ✓ Appliquer une méthode MCDM (telle que EDAS, VIKOR, MOORA, et **TOPSIS**) pour choisir l'alternative optimale.
- ✓ Proposer un **modèle décisionnel** applicable dans un contexte industriel réel.
- ✓ Évaluer les **résultats de l'application du modèle** et mesurer son impact sur l'amélioration de la fiabilité.

Méthodologie adoptée

La démarche adoptée dans cette étude repose sur **une approche analytique et appliquée**, structurée comme suit :

1-Collecte de données techniques et opérationnelles sur le moteur étudié.

2-Analyse des pannes antérieures pour en dégager les causes principales.

3-Identification d'un ensemble d'alternatives et de solutions envisageables.

4-Élaboration d'un modèle MCDM permettant de comparer les différentes options selon des critères définis.

5-Application du modèle sur un cas concret, suivi de l'interprétation des résultats et de l'évaluation de son efficacité.

Dans le cadre du présent travail, quatre chapitres sont consacrés à l'étude.Le premier chapitre est dédié à une présentation de l'entreprise.Une généralité sur la maintenance est abordée dans le deuxième chapitre.Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes approches d'optimisation de la maintenance.Le quatrième chapitre est consacré à l'étude pratique.

Le travail se conclut par une conclusion générale résumant l'ensemble des points abordés.

.

I-1-Historique de l'ENTP

Le forage algérien est un produit de SONATRACH depuis l'année 1968. « Keskassa1 » étant le premier puits foré, et La structure opérationnelle s'appelait « Direction des Services Pétroliers (DSP) » et disposait d'un parc de quatre appareils de forage.

En Juillet 1972 : DSP prend le nom de : Direction des Travaux Pétroliers (DTP). 1er Août 1981 : la Restructuration de SONATRACH au début des années 80, émergeait ENTP (Entreprise Nationale des Travaux aux Puits) héritière de la DTP pour les activités de forage et de Works – Over (entretien des puits) Créée par décret n° 81-171, ENTP est devenue opérationnelle le premier janvier 1983.

Juin 1989 : transformation du statut juridique d'ENTP en société par actions. 30 Mars 1998: ENTP fait partie du Groupe Services Hydrocarbures (GSH) Sonatrach. Ses actionnaires sont :

- Sonatrach : Holding SPP 51%
- Société de gestion des participations des travaux énergétiques «TRAVEN» 49%.

04 Avril 2003 : ENTP a obtenu avec brio la certification ISO 9001 : 2000 pour l'ensemble de ses activités.

01 janvier 2005 : transfert des actions détenus par la Société de gestion des participations TRAVEN dissoute, vers la Société de Gestion des participations dénommée "INDJAB"

28 décembre 2005 : cession à titre gratuit des actions détenues par la SGP INDJAB (49%) en faveur du Holding Sonatrach "SPP Spa". ENTP devient 100% Sonatrach.

septembre 2008 : Concrétisation du Joint-Venture avec WEATHERFORD, qui s'est traduite par la création de la filiale IDIS, opérationnelle depuis septembre 2008.

Création de la filiale ENTP Libyan Branch, qui a entamé son deuxième forage en Libye pour le compte de SIPEX Libyan Branch.

Participation au capital de l'ENAFOR LCC, qui s'est traduite par la location de deux appareils pour PDO Oman.

Participation au capital social de la filiale FORAQUA, spécialisée dans le forage hydraulique de moyenne et grande profondeur.

Le siège social est situé à HASSI MESSAOUD, wilaya d'OUARGLA, au Sud- Est d' Alger a environ 900 km.

I-2-L'environnement de l'entreprise ENTP

L'ENTP est située dans un environnement de marché de service pétrolier fortement concurrentiel qui devient de plus en plus exigeant. Dans le domaine du forage et Work-Over, il existe plus de six entreprises opérantes en Algérie. Les deux premières sont des entreprises nationales (ENTP, ENAFOR) et les autres sont des entreprises étrangères (NAIBOR, SAIPEM, FOREX, PRIDFORASOL).

Pour faire face à cette concurrence, l'entreprise ENTP a tracé un programme de rénovation en utilisant la dernière technologie ainsi que l'installation du système HSE (Hygiène, Sécurité et la protection de l'Environnement).

L'ENTP a mis en place un système intègre QHSE conforme aux normes

- ISO 9001/2015 « Système de Management de la Qualité »
- ISO 14001/2015 « Système de Management Environnemental »
- ISO 45001/2018 « Système de Management de la santé/sécurité au travail »

Donc la pérennité de l'entreprise exige un engagement total de l'ensemble du personnel dans une démarche de progrès continue.

I-3-Mission de l'E.N.T.P

Les Travaux aux Puits, c'est l'exécution des forages de recherche et de développement sur gisements d'hydrocarbures liquides ou gazeux ; c'est aussi l'entretien des puits producteurs d'huile et de gaz (work-over) et accessoirement la réalisation de forages hydrauliques profonds.

Quelque soit le rang hiérarchique, le personnel de l'E.N.T.P grâce à sa qualité professionnelle et à sa motivation a grandement contribué aux performances et aux succès de son entreprise, c'est pour cette raison que l'E.N.T.P est actuellement le premier « contracter » de forage en Algérie.

I-4- Les moyens de l'entreprise ENTP

A. Les matériels

L'ENTP dispose d'un parc de 72 appareils destinés pour le forage et le Work-over. Certains de ces appareils sont dotés d'équipements modernes : SCR, Top Drive, Wireless Net Work Communication.

Tableau-01 : Etat du parc appareils de l'entreprise ENTP a 2025

Marque et Type	Sigle	Puissance	Nombre
National 110 UE	TP 127-128-129-130	1500 HP	04
National 1320 UE	TP 137-194-202-203-169-139-206	2000 HP	07
Wirth 2000	TP 198-199	2000 HP	02
Wirth 1200	TP 200-201	1200 HP	02
Dreco1250 E	TP 196-197	1200 HP	02
OW 840 E	TP 158-160-161-162-180-181-182-183-184-185-217	1500 HP	11
National 80 UE	TP 195	1000 HP	01
National 840 E	TP 181-215-216	1500 HP	03
NOV JC50D	TP 204-205-207-208-209-210-211-212-213-214	1500 HP	10
Cabot 1200	TP179-186-187-188-189-190-192-224	1200 HP	08
Cabot 750	TP 170-172-173-178	750 HP	04
Cabot 500	TP 175-176-177	500 HP	03
KERUI 750	TP 218	750 HP	01
HH 1000	TP 219	1000 HP	01
KERUI 2000	TP 220-221-222-223-226-227	2000 HP	06
KERUI 1500	TP 228-229	1500 HP	02
BOMCO JC50D	TP231-232	1500 HP	02
HH JC50DB	TP233-234-235	1500 HP	03
TOTAL			**72**

B. Moyens Humains

Avec plus de 12000 agents, l'effectif de l'ENTP est en croissance suite au recrutement de plusieurs ingénieurs, notamment en maintenance et forage.

L'encadrement représente une fraction de 2/3 des agents de statut permanent.

Le forage et Work-over occupent à eux deux plus de 50% de l'effectif global.

Tableau-02 : Ressources Humaines

Structures de l'effectif	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Cadres dirigeants	16	15	14	13	17	15
Cadres supérieurs	107	124	133	141	153	171
Cadres moyens	3245	3348	3518	3759	4125	4375
Agents de maîtrise	3167	3212	3233	3387	3615	3598
Agents d'exécution	2072	2032	2144	2088	2059	2052
Total	8607	8731	9042	9388	9969	10211

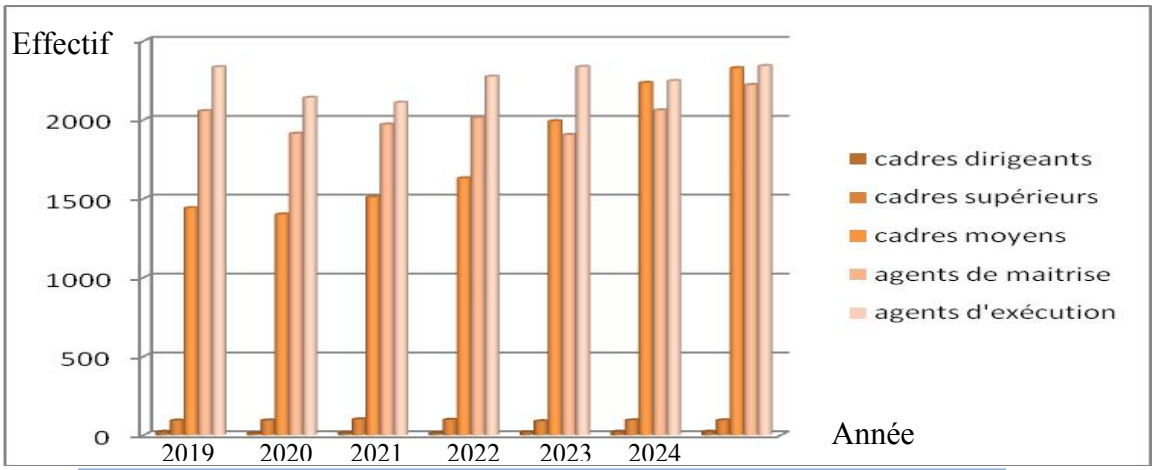
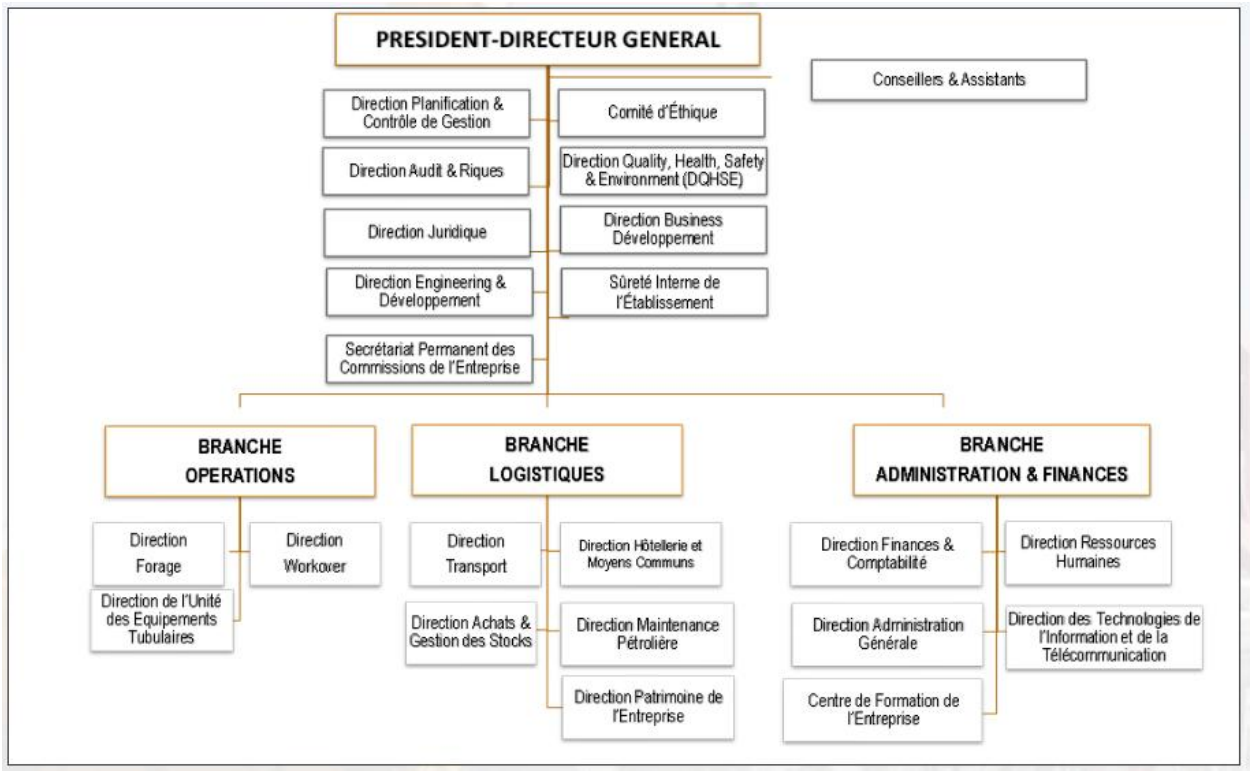


Figure 01: Evolution des ressources humaines (2019-2024)

I-5-Système de gestion de l'entreprise

Le conseil d'administration formé du président directeur général, de l'E.N.T.P et trois directeurs généraux adjoints (opérateur, logistique, administration et finance), contribuent à la gestion de l'entreprise



I-6. Le but de la nouvelle structure de l'E.N.T.P

La réorganisation des structures de l'E.N.T.P qui a lieu en décembre 2023 avait pour objet de permettre :

Un rechange de l'Entreprise sur son métier de base à savoir le forage au quel est associée la maintenance pétrolière.

Une plus grande autonomie de gestion des activités « hôtellerie » et « transport » pour préparer leur filialisation.

Une meilleure cohérence et modernisation des fonctions de gestion des ressources humaines, administration, contrôle de gestion et organisation.

I-7. Activités complémentaires de l'E.N.T.P

L'E.N.T.P dispose également de six autres centres de profit situés à Hassi Messaoud.

- Le centre de formation : ce centre est occupé des enseignants spécialisés (forage, maintenance, transport, gestion, informatique, etc…).
- Unité Tubulaire
- Location des bases : Hassi R'Mel, In-amenas.
- La Région de In- amenas est doté d'une source de pétrole brut très important profitable à l'économie algérienne, ce gisement est composé principalement de fraction de pétrole, c'est un produit qui se trouve à l'état brut initialement.
- Le champ de TFT (Tin Fouye Tabankort) est situé dans la partie centrale du bassin d'Illizi, plus précisément à 300 km au Nord- Ouest de In- amenas, et de 500 km au Sud- Est de Hassi Messaoud, le champ de TFT est composé de plusieurs chantiers, à chaque chantier existe un appareil de forage, soit pour le forage, soit pour la maintenance de puits (Work-Over).
- Centre informatique
- Imprimerie.
- Service top drive & banc d'essai des équipements de forage
- Station lavage équipements de forage
- « ENTP EYES » cameras de surveillances des appareils de forage

Généralités sur la maintenance

II-1-Introduction :

La qualité de fabrication des machines et équipements industriels, ainsi que le respect rigoureux des consignes d'exploitation, ne garantissent pas à elles seules leur performance et leur sécurité continues. En effet, l'apparition inévitable de défaillances, qu'elles soient partielles (dégradations) ou totales (pannes), est un phénomène courant au cours de leur utilisation. Les modes de défaillance peuvent varier considérablement : arrêt complet de fonctionnement, baisse de l'efficacité opérationnelle, etc. Dans tous les cas, ces défaillances entraînent des coûts directs ou indirects. C'est pourquoi la maintenance est indispensable pour garantir la disponibilité de ces équipements, réduire les coûts d'exploitation et assurer la sécurité des opérateurs.

II-2- Définition de la maintenance :

La maintenance est définie comme étant : l'ensemble des actions permettant de maintenir et de rétablir un bien dans un état spécifie. La maintenance moderne, est une activité technico-économique **(Figure 02)**

L'objectif de la maintenance est :

- Conserver l'état de la machine ;
- Assurer la qualité de la production avec un coût global optimal.**[1]**

.

.

ORGANIGRAMME DES MÉTHODES ET TECHNIQUE DE LA MAINTENANCE

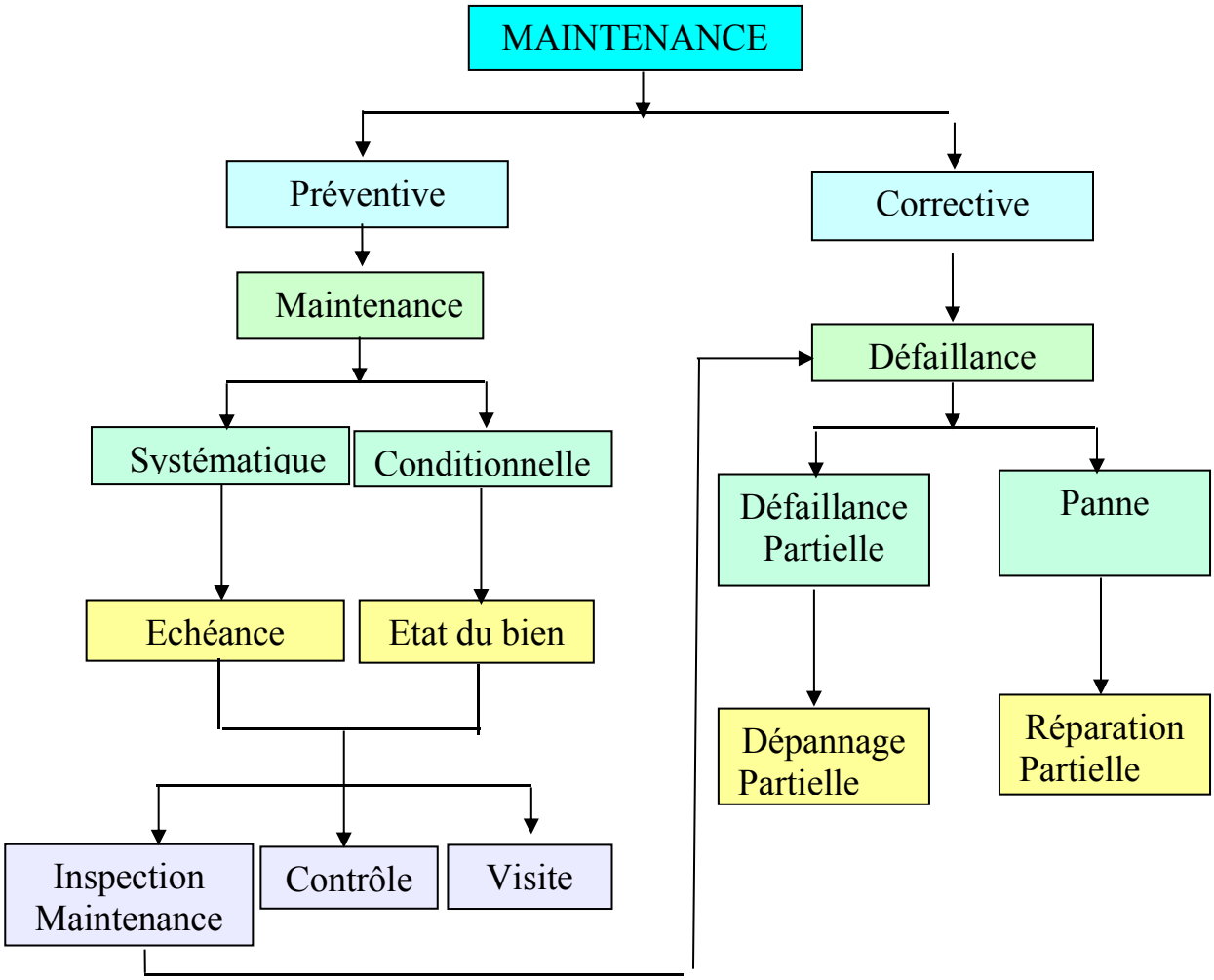


Figure 02: Les différentes formes de maintenance.**[2] .**

II-3- Types de maintenance :

II-3-1- Maintenance corrective :

C'est l'ensemble des activités de maintenance, réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction, et qui lui permettent d'accomplir une fonction requise au moins provisoirement. Ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état de bon fonctionnement avec ou sans modification.**[2]**

Celle-ci se décompose en deux types :

II-3-1-1- maintenance palliative

La qualité de fabrication et le respect des consignes d'utilisation ne suffisent pas à éviter les pannes des équipements industriels.Des défaillances, partielles ou totales, surviennent inévitablement, entraînant des coûts. La maintenance est donc essentielle pour assurer la disponibilité, réduire les dépenses et garantir la sécurité.**[3]**

II-3-1-2-maintenance curative

La maintenance curative vise à restaurer un équipement en état de fonctionnement afin qu'il remplisse sa fonction. Elle comprend des actions permanentes comme des réparations ou modifications destinées à éliminer la défaillance.**[3]**

II-3-2-But Maintenance corrective:

- restaurer le fonctionnement normal de la machine.
- Comprend réparations, remplacements ou modifications.
- Agit en réaction, contrairement à la maintenance préventive.
- Essentielle pour assurer la continuité du service et la sécurité.
- Peut entraîner des coûts élevés en cas d'interruptions non planifiées.
- La rapidité et la planification des interventions sont cruciales pour limiter les impacts.**[3]**

II-3-3- Maintenance préventive:

La maintenance curative est une forme de maintenance corrective qui intervient après l'apparition d'une défaillance. Son objectif est de remettre un équipement en état de fonctionnement pour qu'il puisse remplir sa fonction prévue. Elle comprend généralement des réparations ou des modifications ayant un effet durable. Contrairement à la maintenance préventive, elle est déclenchée uniquement après un dysfonctionnement. Elle vise à restaurer rapidement la disponibilité du bien tout en assurant sa fiabilité.**[3]**

• Celle-ci se décompose en deux types :

I-3-3-1- Maintenance préventive systématique:

La maintenance préventive systématique consiste à exécuter des interventions de manière planifiée, soit selon un calendrier fixe, soit en fonction d'un nombre d'heures ou de cycles d'utilisation. Elle ne dépend pas de l'état réel de l'équipement, mais de critères temporels ou d'usage.

II-3-3-2- Maintenance préventive conditionnelle:

Elle est déclenchée suite à des contrôles ou mesures (par exemple : autodiagnostic, capteurs, inspections) qui révèlent un début de dégradation de l'équipement. Elle permet d'agir avant la panne tout en tenant compte de l'état réel du système.

II-3-3-3- Maintenance préventive prévisionnelle:

Ce type de maintenance repose sur l'analyse continue de paramètres représentatifs de l'usure ou de la dégradation. Elle permet d'anticiper les interventions nécessaires, en les programmant de manière optimale afin de prolonger la durée de vie de l'équipement.**[3]**

II-3-4-But de la maintenance préventive:

- Augmenter la durée de vie des équipements.
- Réduire la probabilité de défaillance en service.
- Diminuer le temps d'arrêt lors des révisions ou pannes.
- Prévenir et anticiper les interventions correctives coûteuses.
- Permettre une planification optimale de la maintenance corrective.
- Éviter les consommations anormales d'énergie, lubrifiants, etc.
- Réduire le budget global de maintenance.
- Éliminer les causes d'accidents graves.**[3]**

II-4-Opérations de Maintenance

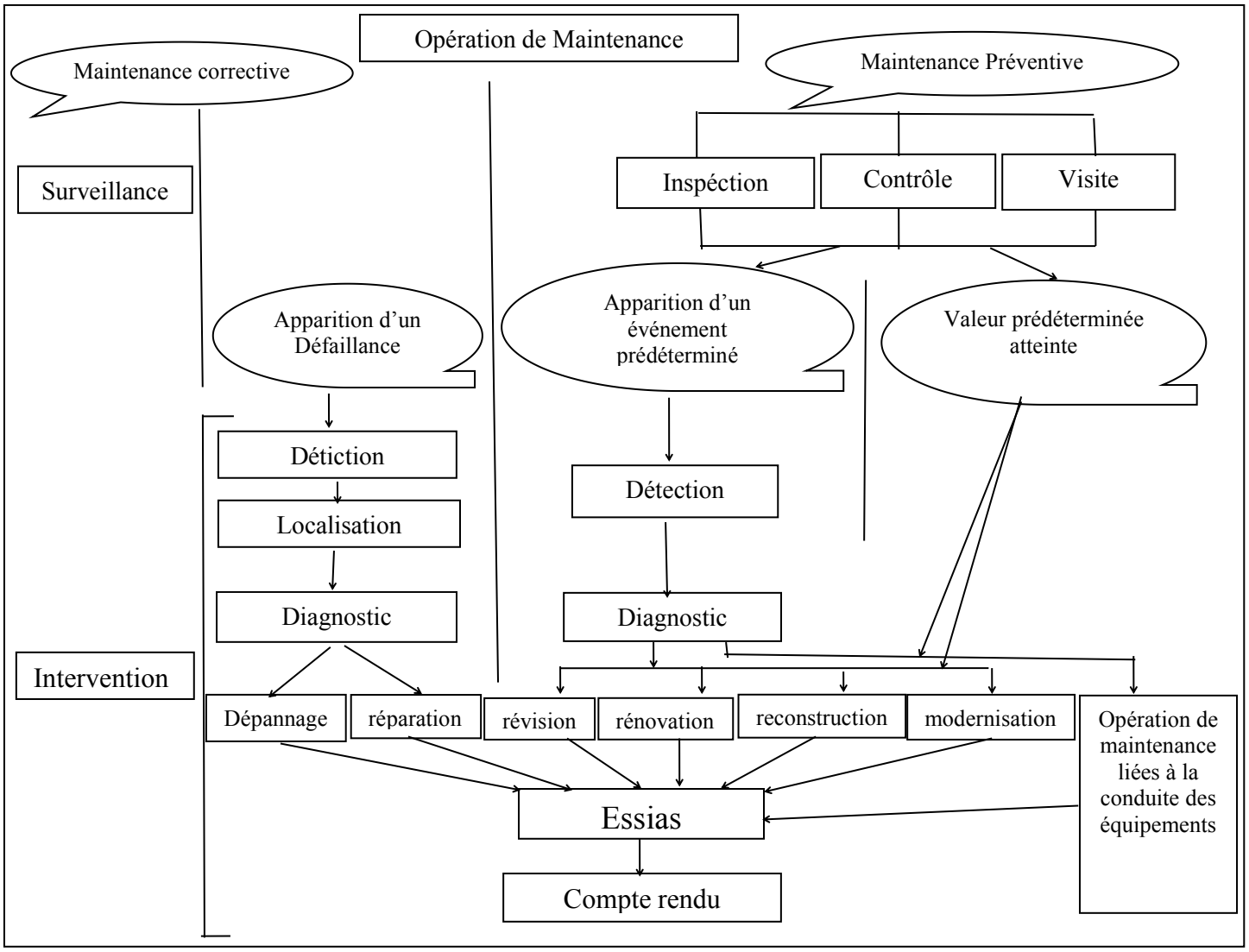


Figure 03: Les opérations de maintenance

II-4-1-Opérations de maintenance corrective

Ces opérations peuvent être classées en trois groupes d'actions.

- Le premier groupe concerne la localisation de la défaillance ; il comprend les opérations suivantes : le test, la détection, le dépistage et le diagnostic.
- Le deuxième groupe concerne les opérations de la remise en état ; il comprend les opérations suivantes : le dépannage, la réparation et la modification soit et du matériel ou du logiciel.
- Le troisième groupe concerne la durabilité ; il comprend les opérations suivantes : la rénovation, la reconstitution et la modernisation.**[4]**

II-4-1-1- localisation de défaillance

La localisation de la défaillance consiste à identifier de manière précise les composants ou les zones dans lesquels la défaillance se manifeste. Cette étape est cruciale pour orienter correctement les actions de maintenance.

- **Test** : Opération permettant de comparer le comportement d'un système soumis à une sollicitation définie avec celui d'un système de référence ou avec une réponse attendue conforme au bon fonctionnement.
- **Détection** : Action de mettre en évidence la présence d'une défaillance ou d'un composant défaillant, grâce à une surveillance continue ou ponctuelle.
- **Dépistage** : Examen systématique réalisé sur des équipements encore en état de marche afin de repérer l'apparition de défaillances à un stade précoce.
- **Diagnostic** : Processus d'identification des causes probables d'une ou plusieurs défaillances, fondé sur l'analyse logique d'informations recueillies à partir d'inspections, contrôles ou tests. Le diagnostic permet de confirmer ou ajuster les hypothèses initiales et de définir les interventions de maintenance corrective à entreprendre.**[3]**

II-4-1-2 – Remise en état (reformulation)

La remise en état consiste à rétablir le bon fonctionnement d'un équipement après une défaillance. Cette opération peut prendre différentes formes selon la nature du problème rencontré :

- **Dépannage** : Intervention immédiate sur un équipement en panne dans le but de le faire fonctionner à nouveau, souvent de manière provisoire.
- **Réparation** : Action corrective définitive, ciblée et limitée, réalisée après l'apparition d'une défaillance pour rétablir l'état fonctionnel.

Modification : Intervention ayant un caractère permanent visant à améliorer les performances d'un équipement ou à adapter ses caractéristiques à de nouveaux besoins d'utilisation.**[3]**

II-4-1-3- Durabilité :

La durabilité d'un bien représente sa durée de vie potentielle ou sa capacité de fonctionnement sur une période donnée, en respectant les conditions d'utilisation et de

maintenance prévues. Les opérations de maintenance visant à prolonger cette durabilité sont diverses et peuvent inclure

- **Rénovation** : Il s'agit d'une inspection complète des composants du bien, accompagnée d'un contrôle dimensionnel, du remplacement des pièces usées ou déformées, de la vérification des performances, et de la réparation éventuelle des sous-ensembles défaillants, tout en conservant les pièces encore en bon état.
- **Reconstitution** : Cette opération vise à ramener l'équipement à son état d'origine tel que défini dans le cahier des charges initial. Elle implique le remplacement des composants essentiels par des pièces neuves ou équivalentes, assurant ainsi une restauration complète de la durabilité, de la performance, et de la sécurité.
- **Modernisation** : Elle consiste à intégrer des technologies ou des composants plus récents (matériel ou logiciel) qui n'étaient pas présents dans le modèle initial, dans le but d'améliorer la performance, la fiabilité, ou l'aptitude à l'emploi de l'équipement.**[3]**

II-4-2-Opérations de maintenance préventive

Les opérations de maintenance préventive peuvent être regroupées en quatre grandes catégories d'actions, chacune ayant un rôle spécifique dans la préservation du bon état des équipements :

II-4-2-1-Entretien

L'entretien regroupe les interventions courantes et régulières telles que :

- ✓ **Le nettoyage** (extérieur ou intérieur), adapté selon la nature du bien, son état, et les produits utilisés (solutions aqueuses, solvants, soufflage aux abrasifs, etc.).
- ✓ **La dépollution**, visant à éliminer les substances indésirables ou nuisibles.
- ✓ **Le retraitement de surface**, incluant des opérations comme la **lubrification** et le **graissage**, pour prévenir l'usure.

II-4-2-2- Surveillance

La surveillance a pour but de suivre l'évolution de l'état du bien à intervalles réguliers ou en continu. Elle comprend :

- ✓ **L'inspection** : observation systématique dans un cadre défini, souvent effectuée sous forme de ronde.

- ✓ **Le contrôle** : vérification de la conformité aux normes, pouvant mener à une acceptation, un rejet ou une action corrective.
- ✓ **La visite** : examen prédéfini de tout ou partie d'un équipement (visite générale ou limitée), pouvant impliquer une maintenance de premier niveau.

II-4-2-3- Révision

La révision consiste en une série d'examens, de vérifications et d'interventions destinées à prévenir les défaillances critiques.

Elle peut être **partielle** (intervention limitée sur certains composants), ou

générale (examen complet de l'équipement).

II-4-2-4-Préservation

La préservation vise à protéger les biens lorsqu'ils ne sont pas en fonctionnement ou exposés à des conditions sévères :

- ✓ **Mise en conservation** : garantit l'intégrité de l'équipement pendant les périodes de non-utilisation.
- ✓ **Mise en survie** : protège le bien contre les agressions environnementales supérieures aux conditions normales d'exploitation.
- ✓ **Mise en service** : englobe toutes les vérifications nécessaires lors de la mise en fonctionnement initiale pour s'assurer de la conformité aux spécifications contractuelles.**[3]**

II-5-Niveaux de maintenance

Les opérations de maintenance sont classées selon cinq niveaux hiérarchiques, en fonction de leur complexité, des compétences requises et des moyens nécessaires à leur exécution.

- ■ **1er Niveau : Maintenance de base (par l'utilisateur)**

- ➢ Interventions simples telles que réglages de base, remplacement de consommables accessibles (ex. : voyants, fusibles).
- ➢ Réalisables **par l'utilisateur**, sans démontage, avec peu ou pas d'outillage, en suivant les instructions du constructeur.

Nécessitent un stock minimal de pièces.

✧ **Commentaire** *:* Ce niveau est conçu pour être effectué sur place, en toute sécurité, sans compétence technique avancée.

■ **2ème Niveau : Maintenance légère**

➢ Comprend le **dépannage par échange standard** de pièces prévues à cet effet, ainsi que des **opérations préventives mineures** (graissage, vérification de fonctionnement).
➢ Réalisable par un **technicien qualifié**, sur place, avec **outillage portatif** et selon la documentation technique.
➢ Pièces de rechange facilement disponibles à proximité.

✧ **Note** *:* Un technicien habilité est formé pour intervenir en sécurité sur des équipements présentant certains risques.

■ **3ème Niveau : Maintenance spécialisée de terrain**

➢ Implique l'**identification des pannes**, le **diagnostic**, et les **réparations mécaniques légères** (ex. : réalignement, réglages précis).
➢ Réalisée par des **techniciens spécialisés**, sur site ou en atelier local, avec l'aide de **bancs d'essais**, **appareils de mesure**, et **documentation technique complète**.

■ **4ème Niveau : Maintenance lourde**

➢ Englobe les **travaux complexes** de maintenance corrective et préventive, à l'exception de la rénovation totale.
➢ Comprend également l'**étalonnage des instruments de mesure** utilisés pour la maintenance.
➢ Exécutée par une **équipe hautement spécialisée**, dans un **atelier bien équipé** (mécanique, câblage, nettoyage, etc.).

■ **5ème Niveau : Maintenance de reconstruction**

➢ Correspond à des opérations de **rénovation complète, reconstruction** ou **réparations majeures** confiées à un **atelier central** ou à une **unité externe**.
➢ Réalisée généralement par le **constructeur ou reconstructeur**, avec des **moyens industriels comparables à ceux de la fabrication d'origine**.**[3]**

III-Les Méthodes d'optimisation de la maintenance:

III-1-Quelques définitions :

III-1-1-Définition d'une panne et d'une défaillance :

Une panne se définit comme une anomalie ou une non-conformité qui provoque un arrêt ou un dysfonctionnement imprévu nécessitant une intervention de maintenance immédiate. Elle correspond généralement à une interruption brutale du service.

En revanche, une défaillance désigne toute perte de conformité vis-à-vis d'un critère de performance établi, qu'elle soit partielle ou totale. Elle peut ne pas provoquer immédiatement l'arrêt du système, mais affecte sa capacité à remplir sa fonction.

Selon la norme AFNOR NF X 60-010, une défaillance est :

« une altération ou une cessation de la capacité d' un bien à accomplir la fonction qui lui est attribuée ».**[3]**

III-1-2-Mode de défaillance :

Une fois que les différents composants d'un système ont été identifiés, il devient possible d'analyser les modes de défaillance potentiels. Cette étape repose sur une compréhension claire de la fonction attendue de chaque composant. En effet, c'est en connaissant précisément le rôle que joue un composant dans le système que l'on peut anticiper la manière dont il peut cesser de remplir sa fonction de manière satisfaisante.

Les modes de défaillance peuvent être classés selon plusieurs catégories, en fonction de la nature et de l'ampleur de l'écart par rapport au fonctionnement normal :

- **Absence totale de fonction** : il s'agit du mode de défaillance principal. Dans de nombreux cas, cette seule perte complète de la fonction est suffisante pour caractériser la défaillance du composant.
- **Fonction partielle, excessive ou insuffisante** : le composant remplit sa mission, mais pas dans les limites acceptables de performance. Cela peut se traduire par un fonctionnement trop faible, trop intense ou incomplet.
- **Fonctionnement intermittent** : la fonction est assurée de manière irrégulière, ce qui peut rendre le système instable ou imprévisible.

Fonction non prévue : le composant adopte un comportement anormal ou parasite, fournissant une fonction qui n'était pas attendue dans le cadre de son usage normal, ce qui peut perturber le fonctionnement global du système.**[3]**

III-1-3- Effet de la défaillance:

Une fois les composants d'un système clairement identifiés, il devient possible d'analyser les **modes de défaillance** susceptibles d'apparaître au cours de leur fonctionnement. Cette analyse repose sur une compréhension approfondie de la fonction attendue de chaque composant. En effet, c'est uniquement en connaissant précisément le rôle que joue un composant dans le système que l'on peut anticiper les façons dont il pourrait ne plus remplir correctement sa mission.

Les modes de défaillance peuvent être regroupés en plusieurs catégories, selon la nature et l'importance de l'écart par rapport au fonctionnement nominal :

- **Absence totale de fonction** : Il s'agit du mode de défaillance le plus courant. Une perte complète de fonction suffit, dans la majorité des cas, à considérer le composant comme défaillant.
- **Fonction partielle, excessive ou insuffisante** : Le composant fonctionne encore, mais en dehors des plages acceptables de performance. Cela peut se manifester par un fonctionnement trop faible, trop fort ou inachevé.
- **Fonctionnement intermittent** : La fonction est assurée de manière irrégulière, ce qui entraîne une instabilité ou une imprévisibilité du système global.
- **Fonction non prévue** : Le composant fournit une action parasite ou inappropriée, non prévue dans le cadre de son utilisation normale. Cela peut perturber gravement le comportement du système.**[3]**

III-1-4- Causes de défaillance

Les **causes de défaillance** désignent l'ensemble des circonstances, événements ou facteurs susceptibles d'amener un système, un sous-système ou un composant à ne plus remplir correctement sa fonction attendue. Ces causes résultent généralement d'une combinaison complexe de facteurs techniques, humains, organisationnels et environnementaux.

De manière structurée, on distingue les catégories principales suivantes :

- **Causes techniques** : défauts de conception, erreurs de dimensionnement, vieillissement des matériaux, usure mécanique, corrosion, fatigue structurelle, défaillances électroniques, etc.
- **Erreurs humaines** : erreurs de manipulation, manque de formation, mauvaise interprétation des procédures, non-respect des consignes de sécurité.
- **Facteurs organisationnels** : insuffisances dans la maintenance préventive, planification inadéquate, absence de contrôles qualité, gestion défaillante des ressources et des priorités.
- **Facteurs environnementaux** : conditions climatiques extrêmes (température, humidité, gel), chocs thermiques, vibrations, exposition à des agents chimiques ou radioactifs.
- **Défaillances liées à l'interaction homme-système** : interfaces homme-machine mal conçues, surcharge cognitive, automatisation excessive rendant le système peu compréhensible pour l'opérateur.

Ces différentes causes peuvent être représentées de manière hiérarchisée ou graphique — par exemple sous forme de diagrammes en arborescence (figure 4) — facilitant l'identification systématique des sources potentielles de défaillances. Ce type de représentation est fondamental pour orienter les analyses de fiabilité, les audits techniques et les actions d'amélioration continue.

L'analyse approfondie des causes constitue une étape incontournable pour la mise en place de mesures correctives durables, que ce soit par l'amélioration de la conception, le renforcement des procédures de maintenance, ou la formation des opérateurs. Elle représente également un socle essentiel dans les méthodologies de sûreté de fonctionnement telles que l'**AMDEC**, la méthode des **5 pourquoi**, ou les **arbres de défaillance (FTA – Fault Tree Analysis)**.**[5]**

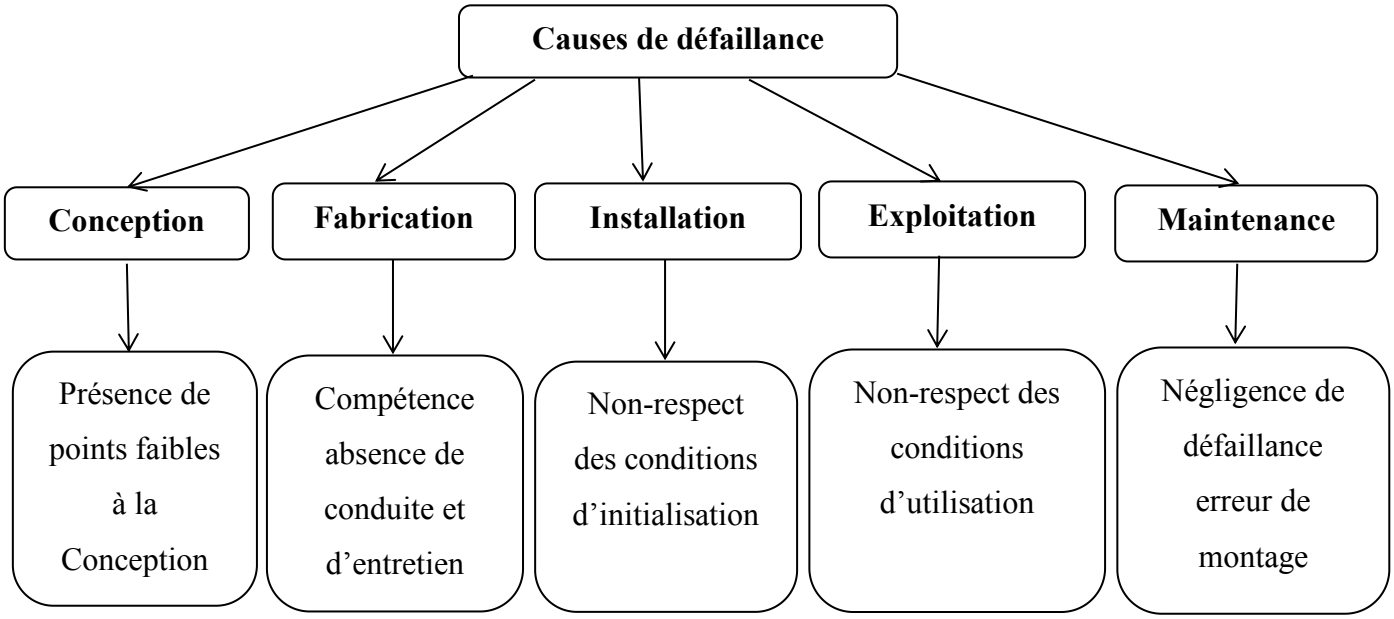


figure 04: les causes de défaillance [6]

Par conséquent, la connaissance approfondie et la compréhension rigoureuse des causes de défaillance et des mécanismes de dégradation des machines s'avèrent essentielles pour l'élaboration d'une stratégie de maintenance efficace et adaptée. Cette analyse permet non seulement de déterminer avec précision les actions correctives ou préventives à mettre en œuvre, mais également d'optimiser la gestion des interventions, de prévenir les arrêts non planifiés, et de maîtriser, voire réduire de manière significative, les coûts globaux de maintenance. Une telle approche permet d'améliorer la disponibilité des équipements, d'accroître leur durée de vie, et de garantir un fonctionnement sûr et fiable des installations industrielles.



figure 05: Causes et effet [7]

Dans un contexte industriel de plus en plus exigeant en matière de disponibilité énergétique et de continuité de service, les **groupes électrogènes industriels**, jouent un rôle stratégique essentiel. Utilisés comme sources principales ou de secours dans des installations critiques (usines, hôpitaux, centres de données, etc.), ces équipements doivent garantir un **haut niveau de fiabilité, de performance et de sécurité de fonctionnement**.

Compte tenu de la complexité croissante de ces systèmes, tant au niveau de leur architecture mécanique qu'électrique, il devient impératif de mettre en œuvre des **approches méthodiques d'analyse et de gestion de la maintenance**, afin d'anticiper les défaillances, de réduire les arrêts non planifiés, et d'optimiser les ressources techniques et économiques.

Parmi les outils les plus pertinents et reconnus dans ce domaine, on peut citer :

- **L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)** : une méthode préventive qui permet d'identifier les modes de défaillance potentiels, d'en évaluer les effets et la gravité, et de prioriser les actions correctives ou préventives à entreprendre.
- **La méthode ABC** : utilisée pour classifier les composants du groupe électrogène en fonction de leur criticité, de leur coût ou de leur fréquence d'intervention, afin de mieux cibler les efforts de maintenance et la gestion des stocks.
- **Les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM)** : qui facilitent le choix entre plusieurs alternatives techniques ou stratégiques, notamment dans le cadre de la sélection des politiques de maintenance ou des fournisseurs de pièces de rechange.
- **Le diagramme d'Ishikawa (ou diagramme en arêtes de poisson)** : un outil de diagnostic qui permet d'identifier les causes profondes d'une défaillance ou d'un dysfonctionnement à travers une analyse structurée prenant en compte les aspects humains, matériels, environnementaux et procéduraux.

L'application conjointe de ces approches sur un **groupe électrogène** permet d'élaborer une stratégie de maintenance proactive et rationnelle, orientée vers la fiabilité, la disponibilité, et l'optimisation des coûts d'exploitation. Une telle démarche contribue non seulement à l'amélioration de la performance opérationnelle, mais aussi à la pérennité des installations et à la sécurité des intervenants.

Ce travail adoptera une approche méthodologique intégrée, combinant une recherche documentaire approfondie sur les groupes électrogènes et les stratégies de maintenance, une

analyse fonctionnelle du **groupe électrogène** afin de comprendre le rôle et l'interaction de ses composants, ainsi qu'une étude de cas pratique illustrant l'application réelle de la maintenance. L'objectif final est de proposer une démarche de maintenance optimisée et cohérente, permettant d'améliorer la performance, de réduire les pannes et d'augmenter la fiabilité de ce type d'équipement industriel.

III-2- Définition et caractéristiques techniques du groupe électrogène

III-2-1- Définition générale

Un **groupe électrogène** est un ensemble autonome composé principalement d'un **moteur thermique** et d'un **alternateur**, destiné à produire de l'énergie électrique de manière indépendante du réseau public. Ce système est utilisé comme source principale ou de secours pour alimenter des installations critiques dans des secteurs tels que l'industrie, la santé, l'exploitation minière, les télécommunications, ou encore les infrastructures énergétiques.

Parmi les modèles les plus robustes et performants figure le **groupe électrogène** , produit par la société américaine **Caterpillar Inc.**, reconnue mondialement pour la qualité et la fiabilité de ses équipements industriels lourds.

III-2-2- Présentation du Caterpillar 3512

Le **Caterpillar 3512** est un groupe électrogène de haute puissance, conçu pour les environnements exigeants, notamment les sites isolés, les plateformes offshore, ou les centres de données à haute disponibilité. Il fait partie de la série 3500, qui regroupe des moteurs à grande cylindrée, particulièrement adaptés aux applications stationnaires continues ou d'urgence.

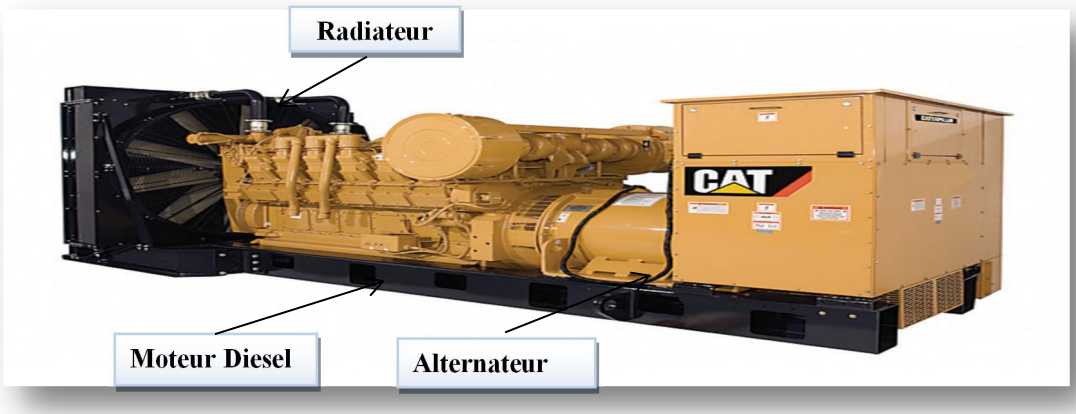


Figure 06: Groupe électrogène Caterpillar 3512

III-2-3- Caractéristiques techniques principales

Voici un aperçu des caractéristiques techniques typiques d'un **Caterpillar 3512**, pouvant légèrement varier selon les versions (3512B, 3512C, 3512E) :

- **Type de moteur** : Diesel à 4 temps, 12 cylindres en V
- **Cylindrée totale** : environ 51,8 litres
- **Puissance électrique** : de 1000 à plus de 1500 kVA (en fonction de la configuration)
- **Vitesse de rotation** : généralement 1500 tr/min (50 Hz) ou 1800 tr/min (60 Hz)
- **Système d'injection** : à commande électronique (ACERT sur certaines versions)
- **Système de refroidissement** : par radiateur à circuit fermé ou échangeur thermique
- **Refroidissement de l'air** : par turbocompresseur avec post-refroidissement (aftercooler)
- **Type d'alternateur** : synchrone, triphasé, auto-excité
- **Tension de sortie** : configurable selon le besoin (400V, 600V, etc.)
- **Normes de conformité** : ISO 8528, NFPA 110, EPA Tier 2/4 (selon les pays)

III-2-4- Applications typiques

Ce groupe électrogène est particulièrement adapté pour :

- L'alimentation de secours dans les hôpitaux et centres de données
- L'énergie de base sur les sites industriels éloignés ou miniers
- L'alimentation continue dans les installations pétrolières ou gazières offshore
- Les grandes installations agricoles ou agroalimentaires

III-2-5-Composants principaux du groupe électrogène

Le groupe électrogène est constitué de plusieurs sous-ensembles mécaniques et électrotechniques interconnectés :

▪ Le moteur thermique

Il convertit l'énergie chimique du carburant (diesel) en énergie mécanique par combustion interne. Le moteur 3512 est équipé de systèmes de :

- ✓ suralimentation (turbocompresseur),
- ✓ gestion électronique des injections (ECM),
- ✓ régulation de température et de pression.

▪ **L'alternateur**

Il transforme l'énergie mécanique fournie par le moteur en énergie électrique. C'est un alternateur synchrone triphasé, avec régulation automatique de tension (AVR).

▪ **Le système de refroidissement**

Il comprend des radiateurs, des pompes à eau, et des thermostats assurant le maintien d'une température optimale de fonctionnement.

▪ **Le système de lubrification**

Il réduit les frottements entre les pièces en mouvement et évacue la chaleur. Il comprend des filtres à huile, des capteurs de pression et des réservoirs.

▪ **Le système de contrôle et de surveillance (EMS)**

Gère le démarrage, l'arrêt, les alarmes et les paramètres critiques (température, pression, régime, tension, courant, etc.) via un panneau numérique.

▪ **Le châssis et l'insonorisation**

L'ensemble est monté sur un châssis robuste, parfois monté sur patins ou remorque, avec des dispositifs d'insonorisation pour limiter les nuisances sonores.

III-2-6-Modes de fonctionnement et configurations possibles

Le groupe 3512 peut être utilisé selon différents modes :

- ✓ **Secours (standby)** : démarrage automatique en cas de coupure du réseau.
- ✓ **Prime** : fonctionnement prolongé avec variations de charge.
- ✓ **Continu** : production d'énergie 24h/24 dans des sites isolés.

Il peut être couplé à d'autres groupes (fonctionnement en parallèle ou en redondance) grâce à des systèmes de synchronisation et de gestion de charge.

III-2-7-Enjeux liés à l'exploitation du 3512

L'exploitation efficace du groupe électrogène 3512 repose sur :

- ✓ Une **maintenance rigoureuse**

- ✓ Une **surveillance continue** des paramètres critiques
- ✓ Un **approvisionnement sécurisé** en carburant et en pièces de rechange
- ✓ La formation du **personnel opérateur**

III-2-8-Étude technique des pannes courantes du groupe électrogène

III-2-8-1- Pannes mécaniques

- ✓ Usure prématurée des segments de piston ou des cylindres
- ✓ Jeu excessif dans les bielles ou les coussinets de vilebrequin
- ✓ Fuite d'huile au niveau des joints (carter, culasse, etc.)
- ✓ Défaillance de la pompe à huile (pression insuffisante)
- ✓ Casse du turbocompresseur ou perte d'efficacité
- ✓ Défaillance des soupapes (grippage, rupture de ressorts)

III-2-8-2- Pannes électriques

- ✓ Court-circuit ou rupture de bobinage dans le stator ou le rotor de l'alternateur
- ✓ Défaillance du régulateur de tension (AVR)
- ✓ Mauvaise excitation ou auto-excitation non assurée
- ✓ Connexions desserrées ou oxydées dans les bornes électriques
- ✓ Dysfonctionnement du système de démarrage (démarreur électrique ou batterie)

III-2-8-3- Pannes liées au refroidissement

- ✓ Surchauffe du moteur due à une défaillance de la pompe à eau
- ✓ Radiateur bouché ou colmaté
- ✓ Niveau insuffisant de liquide de refroidissement
- ✓ Thermostat bloqué (ouvert ou fermé)
- ✓ Ventilateur de refroidissement hors service

III-2-8-4- Pannes du système de carburant

- ✓ Fuite dans les conduites ou injecteurs
- ✓ Présence d'air ou d'eau dans le carburant
- ✓ Obstruction du filtre à carburant
- ✓ Pompe d'alimentation défectueuse
- ✓ Mauvais réglage de l'injection électronique

III-2-8-5- Pannes du système de lubrification

- ✓ Niveau d'huile insuffisant
- ✓ Huile contaminée (particules métalliques, carburant, eau)
- ✓ Défaillance du capteur de pression d'huile
- ✓ Colmatage du filtre à huile

III-2-8-6- Pannes de l'automate de commande / système de contrôle

- ✓ Défaut de communication entre capteurs et contrôleur
- ✓ Erreur dans le module de gestion électronique (ECM)
- ✓ Fausses alertes ou alarmes parasites
- ✓ Logiciel de supervision obsolète ou corrompu

III-2-8-7-Défaillances environnementales ou externes

- ✓ Températures ambiantes extrêmes (gel ou surchauffe)
- ✓ Infiltration d'eau ou d'humidité dans les composants électriques
- ✓ Vibrations excessives mal amorties
- ✓ Mauvaise qualité du carburant (soufre élevé, impuretés)

Les pannes liées aux systèmes mécaniques, électriques et de contrôle figurent parmi les principales défaillances rencontrées sur le groupe électrogène 3512, comme l'indique le tableau ci-dessous. Ces défaillances peuvent affecter directement la fiabilité et les performances de l'équipement, ce qui rend nécessaire l'adoption de méthodes de diagnostic rigoureuses et de stratégies de maintenance appropriées afin de limiter leurs répercussions opérationnelles et d'assurer la continuité du fonctionnement avec un niveau élevé d'efficacité.

Tableau 03 : les pannes critiques – Groupe électrogène Caterpillar 3512

panne	Eléments	Mode de défaillan
P1	Alternateur	L'alternateur ne débite pas de l'éléctricité
P2	Boite de fusible	Basse tension
P3	Afficheure	Instabilité de la tension
P4	Roulement	Vibration
P5	Circuit électrique	Défaut d'isolement
P6	Circuit électrique	Le groupe électrogène démarre mais s'arrete brusquement
P7	Batterie	Le moteur non démarre pas
P8	Démarreur	fuite d'air

P9	Moteur	Fumée d'échappement bleue
P10	Réfrigérant d'huile	Présence d'eau dans le carter d'huile
P11	Les injecteurs	Mélange du gasoil avec de l'huile dans le carter
P12	Réfrigérant d'air	Présence d'eau à l'échappement
P13	Filtre à gasoil	Fumée d'échappement blanche
P14	Turbos	Fumée d'échappement noire
P15	Circuited'eau	Hausse de la température
P16	Moteur	Baisse de la pression d'huile
P17	Pompette à gas-oil	basse presion de gas-oil
P18	la jauge	Jauge brisée à la partie inferieure
P19	Joint spi	niveau d'huil bas
P20	Radiateur	Surchauffement du moteur
P21	Les segments	niveau d'huil bas
P22	Les segments	manque tirage
P23	Filtre à air	manque tirage
P24	Moteur	moteur couler
P25	Pompe à eau	Température d'eau élevée
P26	Moteur	manque graissage
P27	Joint spi	fuite d'huil
P28	Refroidisseure	Présence l'eau ou niveau extérieur de moteur
P29	La culasse	Mélange l'eau avec huile moteur
P30	Les injecteurs	moteur dérater

III-3-Analyse de Pareto (méthode ABC):

III-3-1-Introduction

La loi de Pareto, également appelée principe 20/80, constitue un concept fondamental appliqué dans de nombreux secteurs, notamment dans la gestion des stocks. Ce principe, combiné à la méthode ABC, offre une approche efficace pour optimiser la gestion des articles tout en maximisant l'utilisation des ressources disponibles. Cet article a pour objectif d'exposer le fonctionnement de ces deux concepts et de détailler leur mise en œuvre pratique au sein de l'entreprise.**[8]**

III-3-2-Présentation de la loi de Pareto

La loi de Pareto, du nom de l'économiste italien Vilfredo Pareto, repose sur l'observation selon laquelle environ 20 % des causes sont responsables de 80 % des effets. En d'autres termes, cette loi illustre une répartition inégale des ressources, où une minorité de facteurs produit la majeure partie des résultats. Appliquée à la gestion des stocks, cette règle implique que seule une fraction limitée des articles stockés génère la majorité de la valeur économique.**[9]**

III-3-3-Explication de la méthode ABC

La méthode ABC repose sur le principe de la loi de Pareto pour classifier les articles en stock selon leur importance économique. Elle divise les produits en trois catégories principales :

- **La catégorie A** comprend les articles à haute valeur, représentant environ 20 % du nombre total d'articles mais contribuant à environ 80 % de la valeur du stock. Ces articles requièrent une attention particulière en raison de leur impact significatif sur la performance financière de l'entreprise.
- **La catégorie B** regroupe les articles à valeur intermédiaire, correspondant à environ 30 % du nombre total d'articles et générant environ 15 % de la valeur du stock. Le suivi de cette catégorie est nécessaire, bien que moins rigoureux que pour la catégorie A.
- **La catégorie C** inclut les articles à faible valeur, qui constituent environ 50 % du nombre total d'articles mais ne représentent qu'environ 5 % de la valeur du stock, ce qui justifie un contrôle moindre d'un point de vue économique.**[10]**

III-3-4-Mise en application de la méthode abc avec la loi de Pareto

Pour mettre en œuvre ces deux principes au sein de votre entreprise, il convient de suivre les étapes suivantes :

- **Calcul de la valeur des stocks par article** : Il s'agit de multiplier la quantité disponible de chaque produit par son coût unitaire. Cette opération permet d'évaluer la contribution de chaque article à la valeur totale du stock.
- **Classement des articles selon leur valeur** : Après avoir déterminé la valeur de chaque produit, ceux-ci sont ordonnés de manière décroissante, du plus élevé au plus faible. Cette classification met en lumière les articles ayant le plus d'impact sur la gestion des ressources disponibles, orientant ainsi les priorités en matière de gestion des stocks.
- **Attribution d'une catégorie à chaque article** : En se référant à la loi de Pareto (20/80) et aux proportions spécifiques des catégories ABC, chaque article se voit assigner un niveau d'importance. Cette catégorisation permet d'adapter la gestion et le suivi en fonction de l'importance économique de chaque groupe.**[11]**

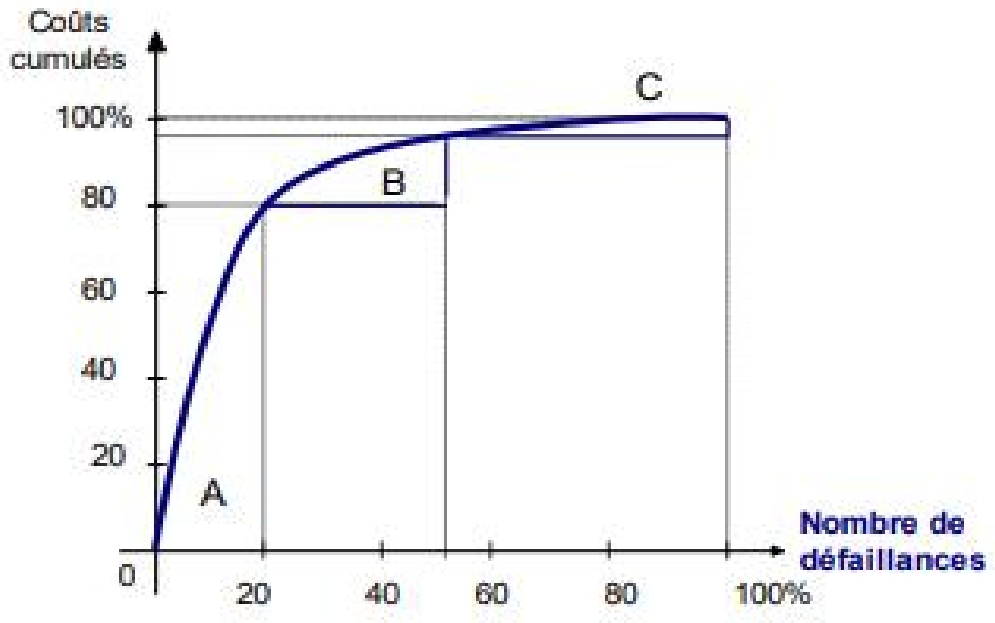


Figure 07:Diagramme de Pareto ou courbe ABC. [12]

III-3-5-Les avantages de l'utilisation de la méthode ABC et de la loi de Pareto

L'adoption conjointe de la méthode ABC et de la loi de Pareto offre plusieurs bénéfices significatifs pour une entreprise :

- **Optimisation des ressources** : En concentrant les efforts de gestion sur les articles présentant la plus grande valeur économique, l'entreprise évite la dispersion des ressources sur des produits à moindre influence. Cette focalisation contribue à améliorer l'efficacité globale et la rentabilité du stock.
- **Réduction des coûts** : Une surveillance rigoureuse des articles de catégorie A facilite la détection d'opportunités d'amélioration susceptibles de diminuer les coûts liés à l'acquisition, au stockage ou au transport des produits.
- **Amélioration de la satisfaction client** : Une gestion optimisée des stocks limite les risques de rupture d'approvisionnement, garantissant ainsi une réponse plus fiable et rapide aux besoins des clients.**[13]**

III-4- La méthode AMDEC:

III-4-1-Définition de l'AMDEC

L'AMDEC : C'est un outil d'analyse qui permet de construire la qualité des produits fabriqués ou des services rendus et favorisé la maitrise de la fiabilité en vue d'abaisser le cout global.**[15]** Cette méthode conçue pour l'aéronautique américaine en 1960:est devenu aujourd'hui, soit réglementaire dans les études de la sureté des industries "à risque"(l'aérospatial, nucléaire, chimie….).**[14]**

III-4-2-Principes Fondamentaux

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) s'appuie sur l'étude de trois éléments fondamentaux pour chaque mode de défaillance identifié :

- **Le mode de défaillance** : il décrit la manière dont un composant est susceptible de perdre sa capacité fonctionnelle.
- **L'effet de la défaillance** : il correspond aux conséquences potentielles de la défaillance, qu'elles soient d'ordre technique, économique, environnemental ou humain.
- **La criticité** : elle est évaluée en prenant en compte trois critères :
  - ✧ **Gravité (G)** : mesure de l'impact de la défaillance.
  - ✧ **Fréquence (F)** : probabilité d'occurrence du mode de défaillance.
  - ✧ **Détectabilité (D)** : capacité à détecter la défaillance avant qu'elle n'ait un effet.

La criticité est exprimée par la formule suivante :

$$C=G\times F\times D \boxed{C = G \times F \times D}$$

où **C** représente l'indice de criticité global du mode de défaillance.**[16]**

III-4-3- Objectifs de l'AMDEC

La mise en œuvre de l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) poursuit plusieurs objectifs stratégiques et techniques, notamment :

- **Réduction des risques** associés à la conception, à la fabrication ou à l'exploitation des systèmes et équipements.

- **Amélioration de la fiabilité, de la disponibilité et de la sécurité** des produits et des processus industriels.
- **Hiérarchisation des actions correctives ou préventives** selon le niveau de criticité identifié, permettant une allocation efficiente des ressources.
- **Optimisation des stratégies de maintenance préventive**, par l'identification des points faibles et des défaillances potentielles.
- **Appui à la prise de décision technique et stratégique**, en fournissant une base rationnelle d'analyse pour améliorer les performances globales du système.**[16]**

III-4-4- Avantages de la Méthode

L'application de la méthode AMDEC offre de nombreux bénéfices concrets dans les démarches industrielles et d'ingénierie, notamment :

- **Renforcement de la fiabilité des systèmes** dès les phases amont de conception, en identifiant et en maîtrisant les modes de défaillance potentiels.
- **Réduction significative des coûts** associés aux arrêts imprévus, aux défauts de qualité et aux interventions correctives non planifiées.
- **Amélioration de la sécurité** des opérateurs et de l'environnement de travail, en limitant les risques techniques liés aux défaillances critiques.
- **Meilleure compréhension des fonctions et interactions du système**, favorisant une analyse technique approfondie.
- **Intégration dans une démarche d'amélioration continue**, structurée et reproductible.
- **Outil d'aide à la décision** stratégique dans le cadre de projets de conception, d'investissements industriels ou de choix technologiques.**[16]**

III-4-5-Typologies d'AMDEC

Type	Domaine d'application	Objectif
AMDEC Produit	Composants, sous-ensembles	Sécuriser la conception
AMDEC Processus	Fabrication, assemblage	Réduire les défauts en production
AMDEC Machine / Maintenance	Équipements industriels	Optimiser la disponibilité et anticiper les pannes.**[16]**

III-4-6-Démarche Méthodologique de l'AMDEC

- **Étape 1 : Préparation de l'étude**

- ✓ Définir le périmètre de l'analyse (ex. : groupe électrogène).
- ✓ Constituer une équipe pluridisciplinaire.
- ✓ Recueillir les données techniques, historiques de panne, manuels, etc.

■ **Étape 2 : Description fonctionnelle**

- ✓ Identifier les fonctions principales et secondaires de la machine.
- ✓ Décrire les interactions entre sous-systèmes (refroidissement, alimentation, démarrage...).
- ✓ Élaborer un organigramme fonctionnel.

■ **Étape 3 : Analyse des modes de défaillance**

- ✓ Pour chaque fonction :
- ✓ Identifier les **modes de défaillance.**
- ✓ Identifier les **causes** (usure, erreur humaine, défaut matériel...).

Évaluer :

- **Gravité (G)** : impact sur la sécurité, la performance, ou la production.
- **Fréquence (F)** : probabilité d'occurrence.
- **Détectabilité (D)** : probabilité de détection avant que l'effet ne survienne.

■ **Étape 4 : Calcul de la criticité**

- ✓ Calcul de l'indice de criticité **C = G × F × D.**
- ✓ Classification des risques.
- ✓ Identification des priorités d'action.**[17]**

III-4-7- Échelles de Cotation

◆ **Fréquence (F)**

Elle donne la périodicité l'apparition de la défaillance notée F ou O. sa valeur est donnée par l'historique des interventions sur l'équipement. A ce niveau on se pose la question : combien de fois la défaillance se manifeste-t-elle ?**[17]**

Niveau	Valeur	Définition
Très faible	1	Moins d'une défaillance tous les 5 ans
Faible	2	Moins d'une défaillance tous les 2 ans
Moyenne	3	Moins d'une tous les 6 mois
Élevée	4	Une ou plusieurs tous les 3 mois

Tableau 04 : Grille de cotation de la probabilité d'occurrence

- **Gravité (G)**

Notée G, c'est l'impact que cette défaillance a sur la production. Pour la déterminer on se pose les questions suivantes : la qualité est-elle bonne ?, quelle est la production perdue ?, quelle est la durée de l'intervention ?, quels sont les coûts directs et indirects engendrées par cette défaillance ? **[17]**

Niveau	Valeur	Définition
Mineure	1	Indisponibilité < 1 jour, effet négligeable
Moyenne	2	Réparation légère, arrêt de 1 à 2 jours
Critique	3	Changement de pièce, arrêt 2 à 7 jours
Très critique	4	Coûts élevés, arrêt > 7 jours
Majeure	5	Indisponibilité totale, danger élevé

Tableau 05 : Grille de cotation de la gravite.

- **Détectabilité (D)**

Notée D, elle représente la capacité de déceler la défaillance. La question posée est : quelle est la protection mise en place pour déceler la défaillance ? **[17]**

Niveau	Valeur	Définition
Facile	1	Détection immédiate (alarme)
Moyenne	2	Détection par l'opérateur ou capteurs
Difficile	3	Peu d'indices précurseurs
Impossible	4	Aucun signe avant-coureur

Tableau 06 : Grille de cotation de la probabilité de non detection

III-4-8-Seuil Critique de Déclenchement

Dans le cadre de systèmes critiques, tels que les groupes électrogènes de forte puissance, un seuil de criticité défini par $C \geq 10$ est couramment utilisé pour déclencher une action corrective immédiate. Cependant, une intervention peut également être justifiée si l'un des indices — Gravité (G), Fréquence (F) ou Détectabilité (D) — atteint ou dépasse la valeur de 4, même lorsque le produit $G \times F \times D$ reste inférieur au seuil critique fixé.**[17]**

Remarque

- si la gravité vaut 1, on ne continue pas l'AMDEC, on peut se contenter de faire du graissage, du nettoyage et un simple contrôle visuel par l'opérateur.
- Si la gravité vaut 4, on peut également arrêter l'AMDEC, il y a visiblement quelque chose qui ne va pas, les risques sont trop élevés, il faut revoir la conception de l'équipement.
- Si la gravité vaut 2 ou 3, on continue l'AMDEC et on recherche les causes de la défaillance.

III-5-Recherche des causes racines (Diagramme Ishikawa) :

III-5-1-**Introduction:**

Après avoir étudié plusieurs cas pratiques liés au fonctionnement du groupe électrogène , et identifié les principales problématiques techniques rencontrées (telles que les baisses de performance, les arrêts imprévus ou les anomalies de mesure), il devient essentiel de passer à une phase d'analyse approfondie des causes racines.

Dans cette optique, nous avons choisi d'appliquer le diagramme **d'Ishikawa,** reconnu pour son efficacité dans l'identification structurée et visuelle des facteurs contribuant à un dysfonctionnement.

Cet outil nous permet de classer les causes potentielles selon les six axes fondamentaux connus sous le nom de 6M : Méthode, Milieu, Matériel, Matière, Main d'œuvre, et Mesure.
Une telle structuration facilite une lecture globale et systémique du problème, en prenant en compte aussi bien les aspects techniques que les influences humaines et environnementales.

Dans ce qui suit, nous proposons une application concrète du diagramme d'Ishikawa au cas spécifique du **groupes électrogènes** , à partir des observations recueillies sur le terrain et des données de maintenance disponibles.

Le **groupes électrogènes** est largement utilisé dans les secteurs industriels, marins et de production d'énergie. Grâce à sa puissance élevée et sa fiabilité, il constitue un choix de premier ordre pour les applications critiques. Cependant, comme tout système mécanique et électrique complexe, il peut présenter des dysfonctionnements. Pour en identifier les causes profondes, le diagramme **d'Ishikawa ,** aussi appelé diagramme en arêtes de poisson, est un outil essentiel.

III-5-2- Définition du Diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa, également appelé diagramme en arêtes de poisson ou diagramme de cause à effet, est un outil visuel servant à recenser et analyser les différentes causes potentielles d'un problème ou d'un phénomène observé. Cet outil a été développé par le professeur Kaoru Ishikawa dans le but d'aider à identifier les causes profondes lors d'une démarche d'amélioration continue.**[18]**

III-5-3-définitions scientifiques des 6M du diagramme d'Ishikawa

- **Méthode**

  Regroupe l'ensemble des procédures, normes, instructions et modes opératoires appliqués dans un processus spécifique. Une mauvaise application ou une absence de standardisation de ces méthodes peut engendrer des écarts de performance et provoquer des dysfonctionnements du système.

- **Milieu**

  Correspond aux conditions environnementales dans lesquelles le système ou l'équipement opère, telles que la température, l'humidité, la poussière, les vibrations, le bruit ou l'éclairage. Ces facteurs environnementaux peuvent influencer significativement la performance et la fiabilité des équipements.

- **Matériel**

  Inclut tous les équipements, machines, outils et infrastructures utilisés dans le processus. Des défaillances mécaniques, électroniques ou logicielles au niveau du matériel peuvent compromettre la qualité, la sécurité ou la continuité de l'opération.

- **Matière**

  Se réfère aux matières premières, consommables, fluides (carburant, lubrifiants, huiles, etc.) nécessaires au fonctionnement du système. La qualité, la compatibilité et la disponibilité de ces matières sont des éléments déterminants pour la stabilité du processus.

- **Main d'œuvre**

  Désigne les opérateurs, techniciens ou toute personne impliquée dans le processus. Leurs compétences, formation, expérience, ainsi que leur engagement et comportement ont une influence directe sur la qualité du produit et la performance du système.

Mesure

Concerne les instruments, capteurs, outils et systèmes utilisés pour surveiller, mesurer et contrôler les performances. Des erreurs d'instrumentation, un mauvais étalonnage ou une mauvaise interprétation des données peuvent fausser les résultats et empêcher la détection précoce des anomalies.**[18]**

III-5-4-Bénéfices du Diagramme d'Ishikawa

- **Approche globale** : offre une vue d'ensemble exhaustive des différentes causes possibles d'un problème.
- **Clarté et simplicité** : sa représentation graphique facilite la compréhension et l'analyse par tous les acteurs impliqués.
- **Collaboration renforcée** : encourage la participation active des membres issus de divers services ou expertises.
- **Identification des causes profondes** : permet d'aller au-delà des symptômes visibles pour cibler les véritables origines des dysfonctionnements.
- **Outil d'amélioration continue** : s'intègre aisément dans des démarches qualité reconnues, telles que ISO 9001 ou la TPM (Total Productive Maintenance).**[19]**

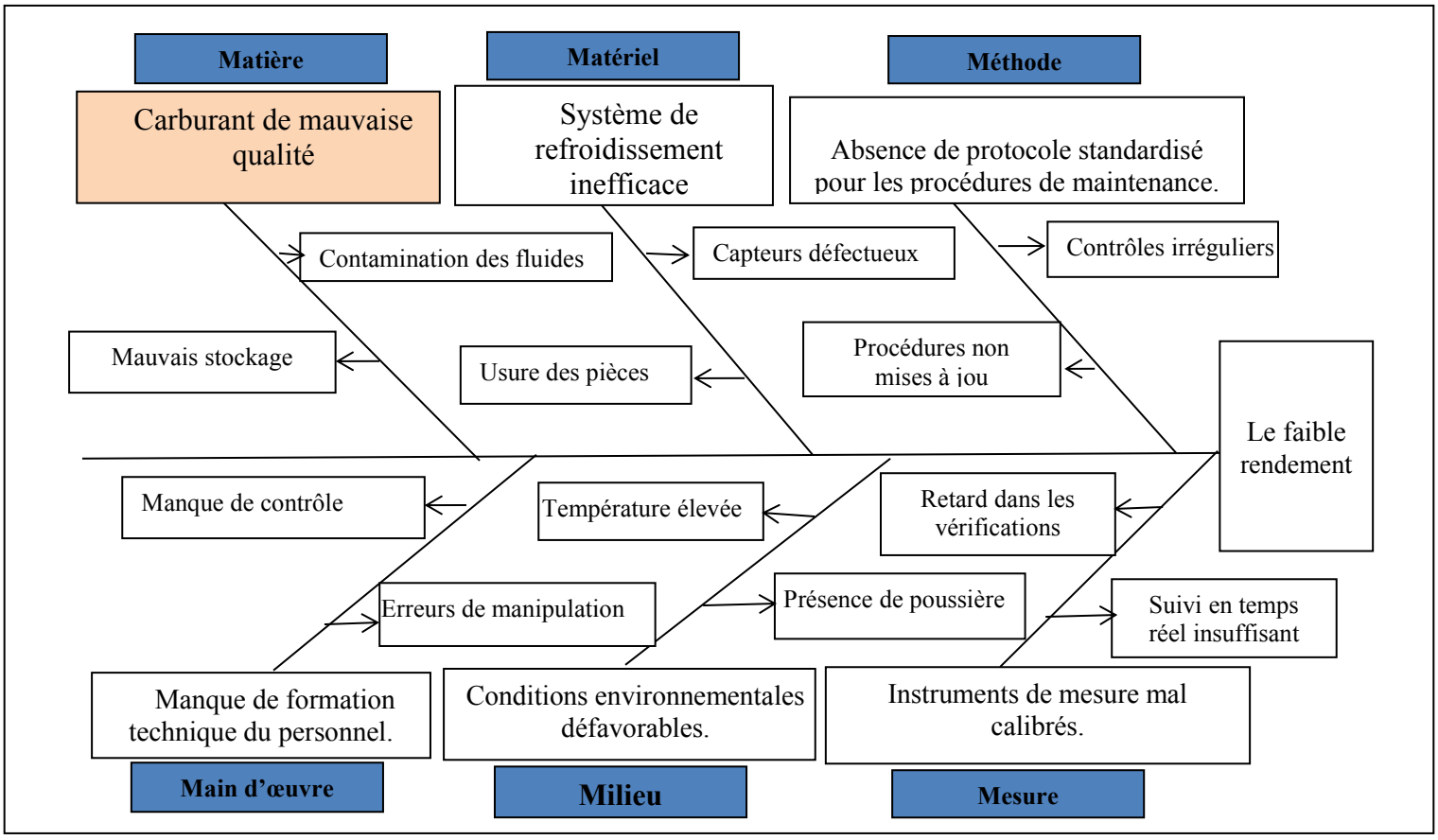


Figure 08: Diagramme cause- éffet

L'utilisation du diagramme **d'Ishikawa** appliqué au **groupes électrogènes** offre un cadre rigoureux pour analyser les dysfonctionnements complexes. En combinant cette méthode classique avec les technologies modernes de surveillance et d'analyse prédictive, les entreprises peuvent réduire les arrêts non planifiés, optimiser les coûts de maintenance et prolonger la durée de vie de leurs équipements critiques.

III-6-La prise de décision multicritères (MCDM)

III-6-1-Introduction :

Le processus de prise de décision constitue l'une des fonctions les plus essentielles au sein d'une entreprise, car il conditionne en grande partie sa réussite ou son échec. La pertinence et la qualité des décisions adoptées déterminent directement la performance organisationnelle.

Face à la diversité croissante des problématiques et à la complexité des choix à effectuer, les approches multicritères d'aide à la décision (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) ont été développées afin d'impliquer les décideurs dans une analyse structurée. Ces méthodes jouent un rôle fondamental, notamment dans la gestion de l'énergie durable, en apportant des solutions claires, rationnelles et efficaces aux problèmes complexes, tout en améliorant la qualité du processus décisionnel.**[20]**

Ce chapitre débute par une présentation générale des méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM), accompagnée de leurs principales classifications. Par la suite, six méthodes ont été sélectionnées — trois issues de chaque catégorie — en fonction de leur pertinence pour notre étude. Chacune de ces méthodes fera l'objet d'une analyse détaillée, incluant les étapes fondamentales de leur application ainsi que leur processus de mise en œuvre.**[21]**

III-6-2-Definition:

La prise de décision multicritères (MCDM) constitue un cadre méthodologique essentiel permettant aux décideurs d'identifier la meilleure alternative parmi plusieurs options disponibles. Elle s'avère particulièrement efficace pour traiter des situations complexes où interviennent plusieurs critères conflictuels. À cette fin, différentes approches MCDM ont été

développées, telles que **Fuzzy AHP**, **BWM (Best Worst Method)**, **DEMATEL**, **TOPSIS** et **SAW (Simple Additive Weighting)**, afin d'améliorer la qualité et la rationalité des décisions prises.**[20]**

III-6-3-Classification des méthodes:

La classification des méthodes d'aide à la décision multicritères repose sur le type d'informations qu'elles permettent de mobiliser pour résoudre un problème donné. Il est donc essentiel de sélectionner la méthode la plus appropriée en fonction de la nature du problème à traiter.

Les approches multicritères sont généralement regroupées en trois grandes catégories :

- **Les méthodes d'agrégation**, qui combinent les différents critères en une valeur unique.
- **Les méthodes interactives**, basées sur un dialogue progressif entre le décideur et le système.
- **Les méthodes de surclassement**, qui comparent les alternatives deux à deux selon des critères de préférence.**[21]**

III-6-3-1-Méthodes d'agrégation :

Une fois que la liste des actions potentielles et des critères à prendre en considération est établie, il faut juger chacune de ces actions vis-à-vis de chaque critère et également Agréger ces jugements pour déterminer l'action qui sera globalement la plus Profitable [23].

Les méthodes d'agrégation consistent à substituer au problème Multicritère initial.

$$\mathbf{Max}\{\boldsymbol{g1}(\boldsymbol{x}),\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}),\ldots\ldots\boldsymbol{gj}(\boldsymbol{x}),\ \ldots,\boldsymbol{gk}(\boldsymbol{x})/\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}\} \qquad \textbf{(1)}$$

Le problème uni critère suivant :

$$\mathbf{Max}\{\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})/\boldsymbol{x}\in\boldsymbol{A}\} \qquad \textbf{(2)}$$

Où $\boldsymbol{U}\ (\boldsymbol{x})$: appelée fonction d'utilité, est du type :

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{U}\ [\boldsymbol{g1}(\boldsymbol{x}),\boldsymbol{g2}(\boldsymbol{x})\ \ldots\ \ldots,\boldsymbol{gj}(\boldsymbol{x}),\ \ldots..,\boldsymbol{gk}(\boldsymbol{x})] \qquad \textbf{(3)}$$

Et agrège les k critères en un critère unique de synthèse [22].

Il faut encore construire cette fonction d'utilité. Souvent, elle possèdera la forme d'une somme pondérée des critères :

$$\mathbf{U(x)} = \sum \boldsymbol{k\ j}=\mathbf{1}\ \boldsymbol{\lambda j}\ \boldsymbol{gj}(\boldsymbol{x}) \qquad \textbf{(4)}$$

Où les coefficients λ représentent les pondérations.

III-6-3-2-Méthodes interactives :

Une méthode interactive est un processus séquentiel se composant de plusieurs itérations. Chaque itération comprend une phase de calcul au cours de laquelle l'homme d'étude élabore une solution de compromis, et une phase de décision au cours de laquelle le décideur élabore progressivement la modélisation de ses préférences [23].

- **Première itération : phase de calcul :**

On commence par déterminer une solution de compromis qui, en général, est une solution efficace dans le sens où il n'est plus possible d'améliorer tous les critères simultanément.

- **Première itération : phase de décision :**

La solution est soumise au décideur qui évalue les résultats obtenus par la solution sur tous les critères. Trois cas peuvent alors se présenter : Le décideur est satisfait et le processus s'arrête. Le décideur souhaite améliorer simultanément tous les niveaux mais cela peut être impossibles la solution est efficace et le processus s'arrête car la méthode ne peut plus aider le décideur. Le décideur propose de faire une concession maximale sur un critère qu'il choisit, afin d'améliorer les résultats sur les autres critères. On dispose dès lors d'une information supplémentaire [23].

- **Deuxième itération : phase de calcul :**

On cherche une nouvelle solution avec la prise en considération des contraintes supplémentaires.

- **Deuxième itération : phase de décision :**

On présente cette nouvelle solution devant le décideur qui peut avoir les trois mêmes réactions[23] .

Si un nouveau critère a été choisi sur lequel il est prêt faire une concession, le processus se Pour suit une troisième itération et ainsi de suite ...(pour plus de détaille voir référence [23])

III-6-3-3-Méthodes de sur-classement :

Les fondations de la théorie de la relation de sur-classement « Outranking Relation Theory - ORT » ont été introduites par Bernard Roy à la fin des années 1960. Depuis lors, cette théorie a été employée par les chercheurs qui travaillent sur les approches multicritères, principalement en Europe[23].

Toutes les techniques de la théorie de sur-classement fonctionnent par deux étapes importantes

La première phase implique le développement d'une relation de sur-classement tandis que la seconde étape implique l'exploitation de la relation de sur-classement afin de faire l'évaluation des solutions pour des objectifs de choix, de classement ou de classification/tri.

Selon Alain Schärlig (1985), les méthodes de sur-classement se caractérisent par une attitude d'agrégation partielle. Nous rappelons la notion d'une relation de sur-classement [23].

III-6-4-Les méthodes d'aide à la décision multicritères MCDM :

III-6-4-1-Méthode AHP :

Le processus de hiérarchie analytique est l'une des méthodes **MCDM** les plus utilisées et aide à comprendre le problème et à choisir une décision qui correspond à l'objectif des spécialistes. Sa force réside dans sa facilité de compréhension en général. Le programme AHP désassemble d'abord le problème de décision d'origine dans une structure hiérarchique et contient l'objectif de décision, les alternatives, les critères et la comparaison pour obtenir les priorités de tous les éléments

Le programme AHP se déroule en quatre étapes pour obtenir l'installation de toutes les alternatives [22].

- **Etape 1 : Structurer le problème dans une hiérarchie**

Dans sa première étape, il construit la racine du problème, la décision, et le deuxième niveau contient des critères qui représentent les différentes dimensions qui peuvent être considérées comme des alternatives [24].

Dans une hiérarchie plus complexe, les normes peuvent être plus divisées en sous-normes, sous-sous-normes, etc. ; Ainsi, il peut y avoir plus de niveaux supplémentaires ajoutés. Cependant, la hiérarchie doit être d'au moins trois niveaux [24].

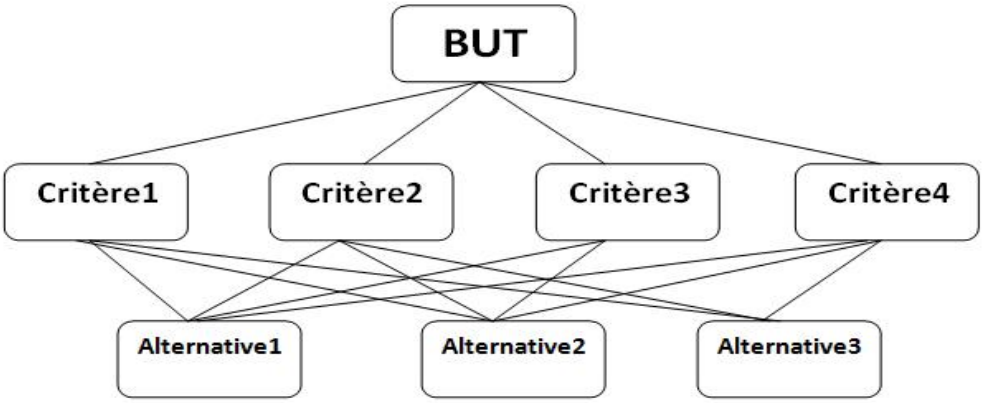


Figure 09: Structure de la hiérarchie AHP.

- **Etape 2 : Effectuez le calcul de priorité.**

La deuxième étape consiste à calculer la priorité de chaque critère par rapport à l'objectif et la priorité de chaque alternative par rapport à un critère spécifique. La priorité est représentée par l'absolu un nombre entre zéro et un qui indique l'importance de chaque alternative par rapport à pour un critère spécifique et l'importance de chaque critère parrapport à l'objectif supérieur dans la résolution de problèmes. La technique utilisée pour calculer la priorité est appelée d'application Comparaison. Cette technique consiste généralement à comparer toutes les alternatives deux à deux avec Juger la meilleure alternative [24]

Tableau 07: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.

Degré d'importance	Définition : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.
1	Importance égale
3	Importance modérée
5	Forte importance
7	Importance très forte
9	Importance extrême
Les degrés 2, 4, 6 et 8 peuvent être utilisés pour exprimer des valeurs intermédiaires. Degrés de 1.1, 1.2, 1.3, etc. Peut être utilisé pour des alternatives qui sont très proches en importance	

- **Etape 3 : Vérifier la cohérence de la matrice de comparaison par paires :**

La troisième étape consiste à vérifier la cohérence des matrices de comparaison par paires et nécessite le calcul de l'indice de cohérence (***CI***). Valeur propre de la matrice et n est le nombre de lignes indépendantes dans la matrice [24] . Sila matrice est parfaitement cohérente alors :

$$\boldsymbol{CI} = \lambda\text{max-N/N} \qquad \textbf{(5)}$$

$$\lambda\text{max} = \sum_{j}^{n}=1\frac{(\boldsymbol{S.A})\boldsymbol{j}}{(\boldsymbol{n.A})\boldsymbol{j}} \qquad \textbf{(6)}$$

- **Etap4 : Synthétiser les priorités finales :**

La dernière étape consiste à résumer un ensemble de priorités globales afin de prendre la décision alternative finale.

Problèmes de décision complexes. Choisissez la meilleure décision parmi un certain nombre d'alternatives Il a été évalué selon plusieurs critères. Dans ce processus, les messages directs utilisent une simple comparaison par paires Dispositions pour le développement de priorités générales pour l'arrangement des alternatives.

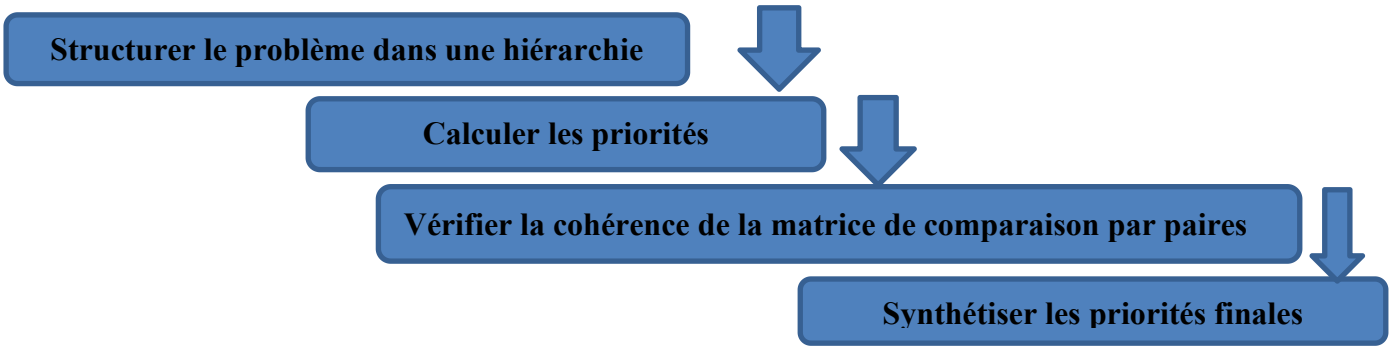


Figure 09.1: les étapes de la méthode AHP.

En fin de compte, nous voyons que le programme AHP a reçu le plus d'attention parmi les universitaires et est fréquemment utilisé dans le monde entier en raison de sa simplicité, de sa qualité et de sa facilité d'utilisation[24].

III-6-4-2-La méthode FUZZY-AHP :

Fuzzy-AHP la logique floue est une approche qui traite des données incertaines et des connaissances non implémentées. Lorsque les décideurs doivent tenir compte de circonstances incertaines.

Avec une incertitude dans la pensée et la perception humaines. Clusters flous de type 2 Clusters flous de type 1 généralisés, ce qui crée plus d'incertitude lors de la définition de la

fonction d'appartenance. Certains problèmes de prise de décision floue multicritères sont étendus à l'aide d'ensembles flous de type 2. Les ensembles généraux d'ambiguïté de type 2 étant plus complexes, l'utilisation d'ensembles flous d'intervalle de type 2 a été proposée pour traiter l'incertitude. Maillage Pro Flou[25].

- **Etape 1 : Critères de comparaison**

Après établissement du réseau, des matrices de comparaison floues évaluées parmi tous les critères des systèmes du réseau selon le tableau 08 [25].

Tableau 08: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP.

Variables linguistiques	Valeurs numérique	Échelles floues d'intervalle trapézoïdal
Absolument important	9	(9. 9. 9)
Fortement important	7	(6. 7. 8)
Très important	5	(4. 5 .6)
Faible importance	3	(2 .3 .4)
D'importance égale	1	(1. 1 .1)

- **Etape 2 : Calcul des moyennes géométriques et des poids flous :**

Calcul des moyennes géométriques et des poids flous : La moyenne géométrique de chaque ligne calculée après que les poids flous sont calculés par normalisation. La moyenne géométrique de chaque ligne [25] .

$$\boldsymbol{ri} = (\boldsymbol{a_{il}} \otimes ..... \otimes \boldsymbol{a_{im}})^{1/n} \; \forall \boldsymbol{i}$$

$$\boldsymbol{Wi} = \boldsymbol{ri} \otimes (\boldsymbol{r_1} \oplus ..... \oplus \boldsymbol{r_n})^{-1}$$

$$\boldsymbol{Ui} = \sum_{i=1}^{n} \text{Wi} \ , \boldsymbol{rij} \qquad (7)$$

Où : $\boldsymbol{Ui}$ **:** est l'utilité floue de l'alternative ou du critère.

Obtention de super matrices Pour obtenir des matrices non granulaires, la super-matrice non pondérée qui inclut à la fois les dépendances internes/externes et la rétroaction est traitée à l'aide des poids obtenus. La super-matrice pondérée est calculée après normalisation à la super-matrice non pondérée. L'hyper-borne est calculée en multipliant $\mathbf{2}^{\boldsymbol{k+1}}$ fois par l'hyper-matrice pondérée où k est le très grand nombre [25].

- **Etape 4 : Calcul des pondérations alternatives :**

Les poids des alternatives sont calculés en multipliant les poids des principaux critères, sous-critères, limites et alternatives déterminés par l'expert. La normalisation est également appliquée pour tous les critères [25].

- **Etape 5 : Sélection de la meilleure alternative :**

Sélection de la meilleure alternative Enfin, une alternative qui a le poids maximum est sélectionnée parmi toutes les alternatives comme étant la meilleure alternative[25].

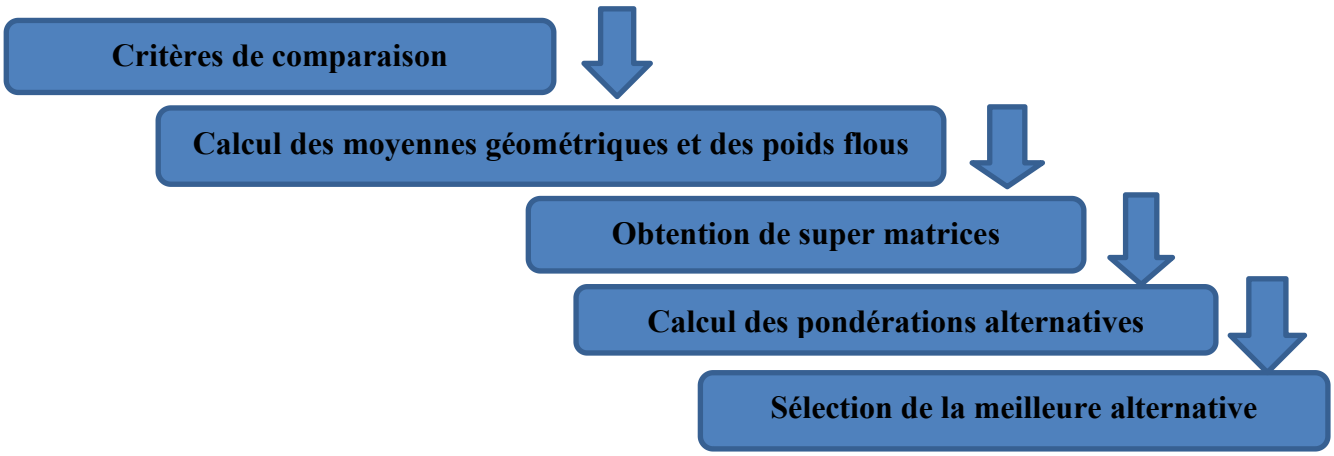


Figure 09.2: les étapes de la méthode FUZZY-AHP.

III-6-4-3- Best and Worst Methode (BWM) (méthode de meilleure et pire):

Pour promouvoir le développement durable et surmonter les contradictions inhérentes à ses dimensions environnementales, économiques et sociales, il est essentiel d'adopter une approche intégrée dans le processus décisionnel. C'est dans ce contexte que la **méthode de décision multicritère BWM (Best Worst Method)**, proposée par F. Rezaei, s'impose comme une solution efficace. Cette méthode est largement reconnue par les décideurs et les ingénieurs pour sa capacité à hiérarchiser les critères de manière structurée et cohérente.

La BWM repose sur l'évaluation d'un ensemble d'alternatives à partir de plusieurs critères, dans le but de sélectionner l'option optimale. Elle se distingue en demandant au décideur d'identifier :

- ✓ Le **meilleur critère** (le plus important)
- ✓ Le **pire critère** (le moins important)

Ces deux critères servent ensuite de référence pour comparer tous les autres, ce qui permet de calculer les poids de chaque critère de manière plus stable et cohérente.

Étapes de la méthode BWM :

- **Étape 1** : Identification des critères
  Un groupe de décideurs définit les critères pertinents pour le problème étudié. Parmi ces critères, les décideurs sélectionnent le **meilleur** et le **pire**.
- **Étape 2** : Comparaisons par paires
  Le critère « meilleur » est comparé aux autres à l'aide d'une échelle d'importance allant de 1 à 9. De même, les autres critères sont comparés au critère « pire ». Ces comparaisons donnent lieu à deux vecteurs (ou matrices) qui sont utilisés pour calculer les poids optimaux via un modèle de programmation linéaire.[26]

$$\boldsymbol{AB} = (\boldsymbol{AB_1}, \boldsymbol{AB_2}, \ldots, \boldsymbol{AB_n}) \quad \textbf{(8)}$$

$$\boldsymbol{AW} = (\boldsymbol{A1_w}, \boldsymbol{A2_w}, \ldots, \boldsymbol{An_w}) \quad \textbf{(9)}$$

Où $\boldsymbol{ABj}$ présente le degré d'importance du meilleur critère B sur le critère j, et $\boldsymbol{AjW}$ indique la préférence du critère j sur le pire critère $\boldsymbol{W}$.

Tableau 09: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans BWM.

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale
3	Importance modérée
5	Forte importance
7	Importance très forte
9	Importance extrême

- **Etape 3 : cette dernière étape correspondant au calcul du poids optimal :**

Cette dernière étape correspondant au calcul du poids optimal, la méthode présente au modèle : non-linéaire dans lequel pondéré est donné avec un intervalle et le pondéré optimal est

le centre de l'intervalle de chaque critère et linéaire modèle éd. (Qui est utilisé dans cette étude) présente une solution unique correspondant à la pondération optimale et aucun rapport de cohérence n'a été nécessaire dans ce cas contrairement au mode non linéaire m priorités.

Le problème est linéaire qui a une solution unique, correspondant aux poids optimaux **(w*1, w*2, ..., w*n), ξ*** est considéré comme un indice de cohérence du modèle et une valeur de **ξ*** proche de zéro indique un haut niveau de cohérence Pour la mise en œuvre de BWM,

les comparaisons par paires des critères d'évaluation :

$$\begin{cases} (W_B - ab_j w_j) \leq \boldsymbol{\xi} * \textbf{ pour tous} j \\ (W_B - ab_j w_j) \leq \xi * \text{ pour tous} j \end{cases} \quad \textbf{(10)}$$

$$\sum_j \boldsymbol{Wj} = \mathbf{1}$$

$$\boldsymbol{Wj} \geq \mathbf{0}\ \boldsymbol{pour\ tous j}$$

Processus de calculatrice raster

Afin de déterminer les cartes d'adéquation du placement du **CSP** pour **AHP** et **BWM** présentés dans cette étude. Un outil de calcul raster dans Arc GIS est utilisé en calculant l'indice de priorité global pour chaque cellule de la zone d'étude, sur la base de l'équation :

$$\mathrm{OPL}_i = \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{Sij} * \boldsymbol{Wi} \quad \textbf{(11)}$$

Où $\boldsymbol{OPL_i}$ correspond à l'indice de priorité global de $\boldsymbol{i}$ cellule du ou des pixels correspondant à la région potentielle $\boldsymbol{Wj}$ est le poids attribuable à chaque critère d'évaluation pour la couche j et gagné par, AHP et BWM, Sij est la cellule note i pour le critère j et n est le nombre total de critères. Les résultats de l'opération sont donnés sous forme de carte raster [27].

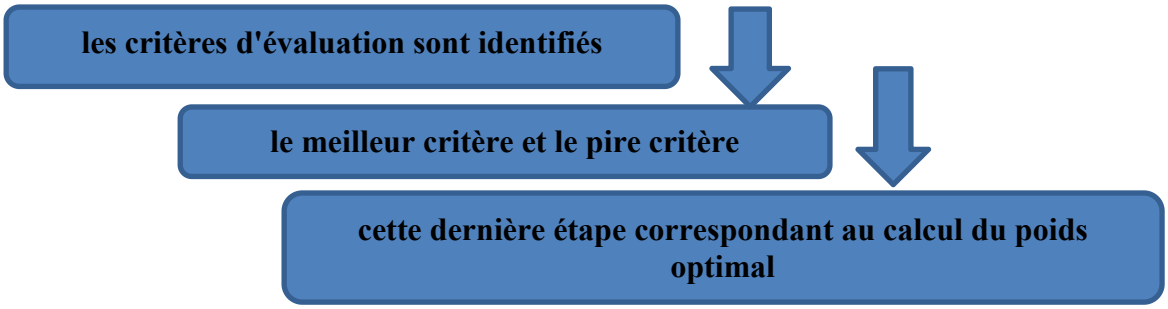


Figure 09.3: les étapes de la méthode BWM.

III-6-4-4-Méthode DEMATAL :

Décision expérimentale évaluation Laboratoire est basé sur la théorie des graphes, car le principe de base de cette méthode est que la meilleure a lternative est la plus proche de la solution idéale et la plus éloignée de la solution anti-idéale. Il est très efficace pour évaluer et formuler toutes les relations de cause à effet qui se chevauchent dans tout modèle structuré. Il est largement utilisé au Japon. **[28]**

Pour prendre des décisions dans la méthode **DEMATEL**, il faut suivre les étapes de base suivantes :

- **Etape 1 : Déterminer l'échelle de notation :**

Déterminer l'échelle de notation. Supposons que dans un problème composé d'un nombre **n** de facteurs à considérer, les relations binaires et le degré d'influence des critères sur les critères soient étudiés. Toutes les comparaisons par paires entre critère et critère sont notées **a*ij*** qui prend un score valide entre 0 (aucun effet), 1 (effet faible), 2 (effet moyen), 3 (effet élevé) et 4 (effet très élevé) .**[28]**

Tableau 10: L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans DEMATAL.

Définition	Valeur numérique
Aucun effet	1
Effet faible	2
Effet moyen	3
Effet élevé	4
Effet très élevé	5

- **Etape 2 : Créer une matrice :**

Créer une matrice de relation directe initiale. Chaque expert produira une matrice directe **n x n**. Chaque valeur de la matrice représente l'ampleur de l'interaction entre les facteurs.
Lorsque **i = j**, les valeurs diagonales du tableau sont définies sur 0 .

Supposons que m soit le nombre d'experts ayant participé à l'étude. Une matrice moyenne

$\boldsymbol{Z}$, c'est-à-dire $\boldsymbol{Z} = [Z_{ij}]\boldsymbol{n}$ x $\boldsymbol{n}$ (1) est ensuite dérivée par la moyenne des mêmes facteurs

dans les différentes matrices directes des experts comme suit [16] :

$$Z_{ij} = (a_{ij}(\mathbf{1}) + a_{ij}(\mathbf{2}) + \cdots + a_{ij}(\boldsymbol{k}) + \cdots + a_{ij}(\boldsymbol{m})) \quad \textbf{(12)}$$

- **Etape 3 : Calculer la matrice de relation directe normalisée :**

Calculer la matrice de relation directe normalisée. La matrice de relation directe

Normalisée $\boldsymbol{X}$, c'est-à-dire $\boldsymbol{X} = [X_{ij}]\boldsymbol{nxn}$ et $\mathbf{0} \leq X_{ij} \leq \mathbf{1}$. Tous les éléments diagonaux sont égaux peut être acquise à partir de l'équation à zéro [16] :

$$\mathbf{S} = \frac{\mathrm{Z}}{max_{1\leq i\leq n} \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{Z_{ij}}} \qquad \textbf{(13)}$$

$$\mathbf{1} \leq \boldsymbol{i} \leq \boldsymbol{n} \text{ et } \mathbf{1} \leq \boldsymbol{j} \leq \boldsymbol{n} \qquad \textbf{(14)}$$

- **Etape 4 : Dérivez la matrice**

Dérivez la matrice de relation totale T. La relation totale matrice T peut être obtenue en utilisant l'équation (14), où I est noté comme l'identité matrice :

$$\boldsymbol{T} = \left(t_{ij}\right)_{nxn} = \boldsymbol{X}(\mathbf{1} - \boldsymbol{X})^{-1} \qquad \textbf{(15)}$$

La somme des lignes et la somme des colonnes sont notées séparément R et C dans la relation totale matrice $\boldsymbol{T}$ [28].

- **Etape 5 :**

La somme des lignes et la somme des colonnes sont notées séparément D et R dans la matrice de relation totale $\boldsymbol{T}$.

$$\mathbf{D} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{t_{ij}} \qquad \textbf{(16)}$$

$$\mathbf{R} = \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{t_{ij}} \qquad \textbf{(17)}$$

Indique la somme des effets directs et indirects du critère i sur les autres critères, appelé degré d'influence du critère i ; ri indique que les critères i sont affectés par les effets directs et indirects d'autres critères, appelés degré de critère affecté [28].

- **Etape 6 :**

$\boldsymbol{R} + \boldsymbol{D}$ et $\boldsymbol{R} - \boldsymbol{D}$ peuvent être obtenus à partir de $\boldsymbol{R}$ et $\boldsymbol{D}$. Si $\boldsymbol{R} - \boldsymbol{D} > 0$, le facteur est considéré comme facteur cause. Si $\boldsymbol{R} - \boldsymbol{D} < 0$, le facteur est un facteur d'effet. Les choix ayant des valeurs plus élevées de $\boldsymbol{R} - \boldsymbol{D}$ ont une plus grande influence sur les autres et sont supposés avoir une priorité plus élevée, et ceux ayant des valeurs inférieures recevant plus d'influence d'un autre est supposés avoir une priorité plus faible. De même, la valeur de R+D indique le degré d'importance et les choix ayant des valeurs plus élevées de $\boldsymbol{R} + \boldsymbol{D}$ sont plusimportants et ceux ayant des valeurs plus faibles de $\boldsymbol{R} + \boldsymbol{D}$ sont moins importants dans le système [28].

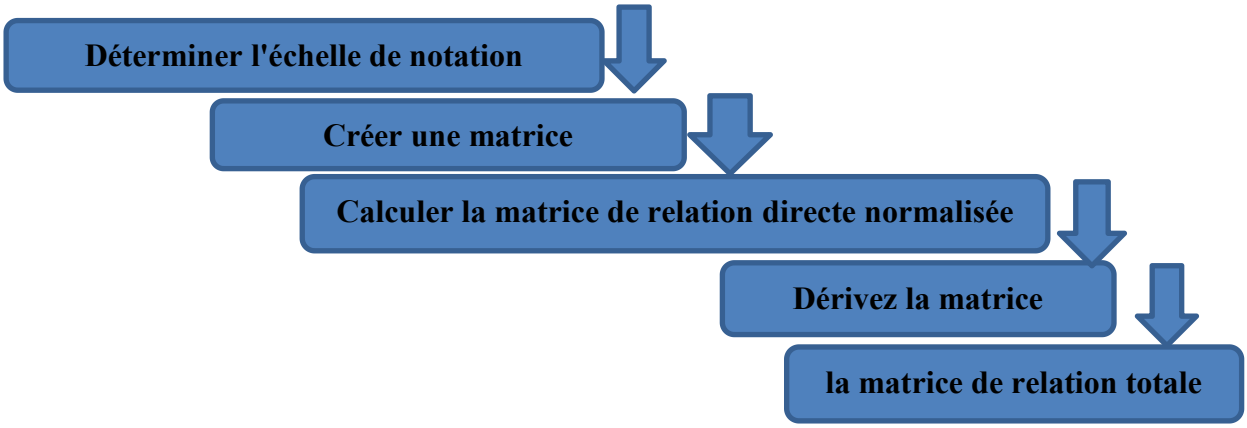


Figure 09.4: les étapes de la méthode Dematal.

III-6-4-5- Méthode TOPSIS :

La méthode **TOPSIS** (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), développée par **Hwang et Yoon**, est une approche bien connue pour résoudre les problèmes de **prise de décision multicritère (MCDM)**. Cette méthode repose sur le principe selon lequel la meilleure solution doit être la plus proche de la **solution idéale positive (PIS)** et la plus éloignée de la **solution idéale négative (NIS)**.

Dans ce contexte, chaque critère est formulé de manière à être **maximisé** ou **minimisé** selon le besoin, et une **distance euclidienne** est utilisée pour évaluer la proximité de chaque alternative aux solutions idéales. Ainsi, **l'alternative optimale** est celle qui présente une **distance minimale au PIS** et une **distance maximale au NIS**.

La méthode TOPSIS classe les alternatives sur un **intervalle continu entre 0 et 1**, où :

1 représente l'alternative la plus proche de la solution idéale (le meilleur choix),

0 correspond à la plus éloignée (la moins favorable),

et les autres alternatives se positionnent entre ces deux extrêmes.

Ce système de classement permet une **pondération cohérente des critères** et facilite l'identification des solutions les plus pertinentes. TOPSIS modélise le problème MCDM comme un espace géométrique à **n dimensions**, chaque alternative étant un point dans cet espace.

Pour que TOPSIS soit applicable, il est généralement supposé que tous les critères sont **monotoniquement croissants ou décroissants**, condition essentielle pour déterminer clairement le PIS et le NIS.**[29]**

Le processus TOPSIS génère d'abord la matrice de décision $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{aij})\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ calcule ensuite la matrice mise à l'échelle $\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{rij})\ \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ et la matrice pondérée La matrice normalisée $\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{tij})\ \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ La solution parfaite $\boldsymbol{S}+$ et la solution anti parfaite S- sont Déterminé sur la base de la matrice échelonnée-pondérée. Ensuite, il calcule la deuxième dimension La distance euclidienne de l'alternative i à la solution idéale $\boldsymbol{S}+$ et l'inverse Solution S- afin d'obtenir la proximité relative de chaque alternative à l'idéal La solution.

L'ordre des alternatives dépend de la valeur de leur proximité relative Comme indiqué dans les étapes suivantes**[30].**

- **Etape 1 : La matrice de décision est générée :**

La matrice de décision est générée sous la forme $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{Xij})\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ qui contient **m** alternatives, notés $\boldsymbol{d1}, \boldsymbol{d2}, \ldots \boldsymbol{dm}$et n critères, notés $\boldsymbol{C1}, \boldsymbol{C2}, \ldots, \boldsymbol{Cn}$, avec la performance de chaque alternative sur un critère donné comme $\boldsymbol{Xij}$.

- **Etape 2 : La matrice de décision doit être normalisée :**

Calcul de la matrice de décision normalisée (NDM) pour représenter la performance relative des alternatives, la NDM a construit comme suit :

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{L_{ij}} == \frac{\text{Xij}}{\sqrt{\sum\ x^2}}\ \mathbf{i=1, 2\ \ldots, m,\ j = 1, 2, \ldots, n} \qquad \textbf{(18)}$$

- **Etape 3 : Détermination de la matrice**

Détermination de la matrice de décision pondérée normalisée (WNDM) En multipliant chaque élément de chaque colonne de NDM, on obtient une matrice de décision pondérée.

$$\mathbf{V=}\ \boldsymbol{V_{ij}} \mathbf{=}\ \boldsymbol{W_i} * \boldsymbol{L_{ij}} \qquad \textbf{(19)}$$

- **Etape 4 : Identification du PIS et du NIS**

Identification du PIS et du NIS le PIS (I+) et le NIS (I-) sont définis par rapport à la matrice de décision pondérée comme suit :

$$\boldsymbol{NIS} = \text{I}^{-} = \{\text{V}^{-}1, \text{V}^{-}2\ , \ldots\ldots\ldots\ldots \text{V}^{-}\text{m}\}\ ;\ \text{ou} \qquad \textbf{(20)}$$

$$\text{V}^{-}\text{i} = \{(\mathbf{min}\ (\text{V}^{-}\boldsymbol{ij})\ \boldsymbol{if\ m \epsilon J}\ ;\ (\boldsymbol{maxi}\ \text{V}^{-}\ \boldsymbol{ij}\ \mathbf{if\ m}\ \boldsymbol{\epsilon}\ \mathbf{J})\}$$

Avec J critère favorable (bénéficier) et J'critère défavorable (non bénéficier).

- **Etape 5 : La solution idéale S+ et la solution anti-idéale S- sont définies comme suit :**

Distance de séparation entre PIS et NIS de chaque alternative

$$Si+ = [\ \sum_{i=1}^{m} (V_i^+ - V_{ij})^{\,2}\ ]^{0.5} \qquad i=1,2,\ldots,m \qquad (21)$$

$$Si- = [\ \sum_{i=1}^{m} (V_i^- - V_{ij})^{\,2}\ ]^{0.5} \qquad i=1,2,\ldots,m \qquad (22)$$

- **Etape 6 : La proximité relative de chaque alternative avec la solution idéale:**

Proximité relative de la solution idéale. La proximité relative de la solution idéale est calculée comme :

$$P_i = \frac{S^- i}{(S^+ i + S^- i)},\ 0 \le P_i \le 1 \qquad (23)$$

- **Etape 7 : Classement de l'ordre de préférence :**

Le classement des alternatives dans la méthode **TOPSIS** repose sur les **valeurs de proximité relative (Pi)**. Plus la valeur de Pi est élevée, plus l'alternative est proche de la **solution idéale positive**, ce qui indique une **meilleure performance**. Les alternatives sont donc **classées par ordre décroissant** de leur Pi, afin d'identifier les options les plus favorables.

Ainsi, l'alternative ayant la **valeur de Pi la plus élevée** se voit attribuer le **premier rang**, tandis que celles avec des valeurs inférieures occupent des positions plus basses. Ce classement permet de **comparer objectivement les performances** des différentes options en fonction de leur proximité à la solution optimale.[31]

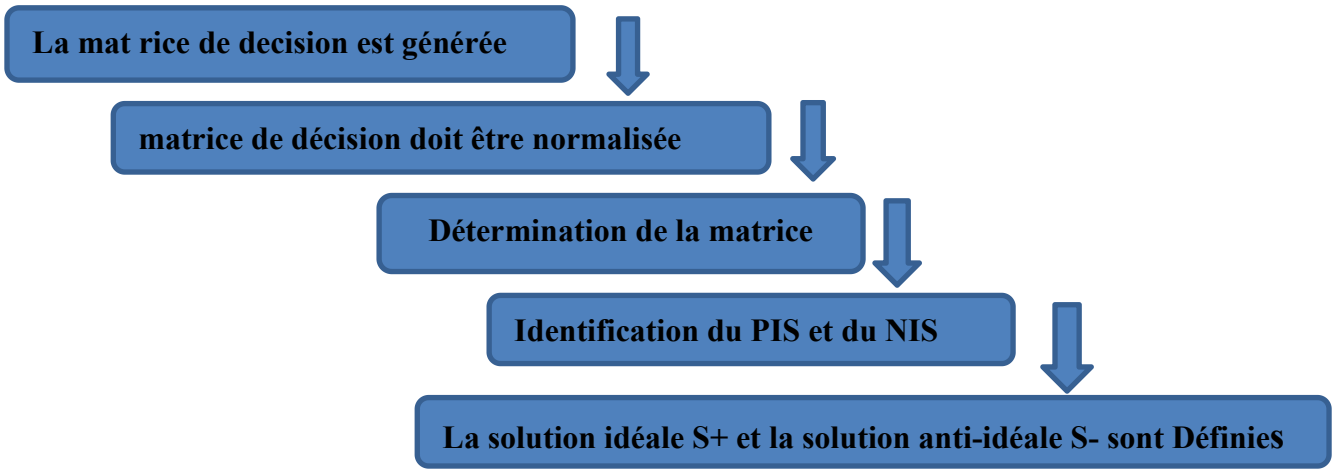


Figure 09.5: Processus de la méthode TOPSIS.

III-6-4-6- SAW: Simple additive weighting Method:

La méthode SAW (Simple Additive Weighting) figure parmi les techniques les plus anciennes et les plus simples, tout en restant l'une des plus répandues dans la pratique. Cette méthode consiste à calculer un score global pour chaque alternative en combinant les valeurs des critères et leurs poids respectifs en une seule mesure. Les alternatives ainsi évaluées sont ensuite classées selon un ordre décroissant de score. La méthode SAW sert de fondement à plusieurs autres méthodes d'aide à la décision multicritère (MADM), telles que l'AHP (Analytic Hierarchy Process) et PROMETHEE, qui exploitent sa propriété additive pour déterminer les scores finaux des options [31].

Également appelée méthode de notation linéaire pondérée ou technique de combinaison, la SAW est une approche simple et couramment utilisée pour résoudre des problèmes à attributs multiples. Elle repose sur une moyenne pondérée où chaque alternative reçoit un score calculé en multipliant la note attribuée à chaque critère par le poids d'importance défini par le décideur, puis en additionnant ces produits sur l'ensemble des critères. Cette procédure représente une transformation linéaire proportionnelle des données initiales, garantissant que l'ordre relatif des scores normalisés reste inchangé, ce qui constitue un avantage notable de cette méthode [31]

- **Étape 1 :**

Construire une matrice de comparaison par paire ($\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{n}$) pour critères en ce qui concerne l'objectif en utilisant l'échelle de Sauty de comparaisons par paires En d'autres termes, il est utilisé pour comparer chaque critère avec l'autre critère ,un par un [31].

- **Étape 2 :**

Construire une matrice de décision ($\boldsymbol{m\ x\ n}$) qui comprend le personnel de m et n critères [31].

Calculer la matrice de décision normalisée des critères positifs :

Pour les critères maximisés $$X_{ij} = \frac{aij - aijmin}{ajmax - ajmin} \quad \textbf{(24)}$$

Pour les critères minimisés $$X_{ij} = \frac{ajmax - aj}{aj\ max - ajmin} \quad \textbf{(25)}$$

$\boldsymbol{aij\ max}$: la valeur maximale du critère.

aij min : la valeur minimale du critère.

Xij: la valeur normale.

a*ij* : la valeur de la simulatio

- **Étape 3 :**

Évaluer chaque alternative, Ai par la formule suivante :

$$\mathbf{Ai} = \sum \boldsymbol{wj} * \boldsymbol{xij} \qquad \textbf{(26)}$$

Où ***xij*** est le score de l'i alternatif par rapport à la j critères, **wj** sont les critères pondérés [31].

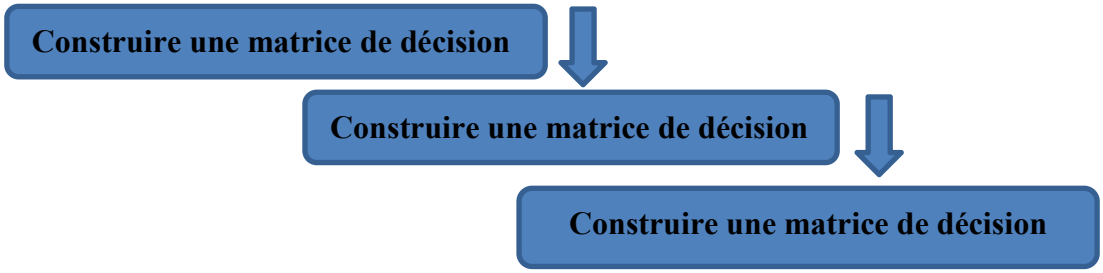


Figure 09.6: les étapes de la méthode SAW

• Remarque :

Quant à la méthode DEMATEL, c'est une méthode efficace pour les décideurs, mais elle ne nous aide pas à choisir le meilleur endroit pour implanter une centrale solaire, et elle est davantage utilisée dans le domaine de l'informatique.

III-6-5- Conclusion :

Après avoir terminé l'étude théorique, nous avons abordé dans ce chapitre un ensemble de méthodes d'aide à la décision multicritère (MCDM), à savoir : AHP, FUZZY-AHP, BWM, DEMATEL, TOPSIS et SAW. Ces méthodes ont été étudiées dans le but de choisir le site le plus approprié pour l'installation d'un groupe électrogène de type 3512. Chaque méthode a été présentée de manière détaillée, en exposant les étapes fondamentales qu'elle implique."

III-7-Fiabilité

III-7-1- Définition

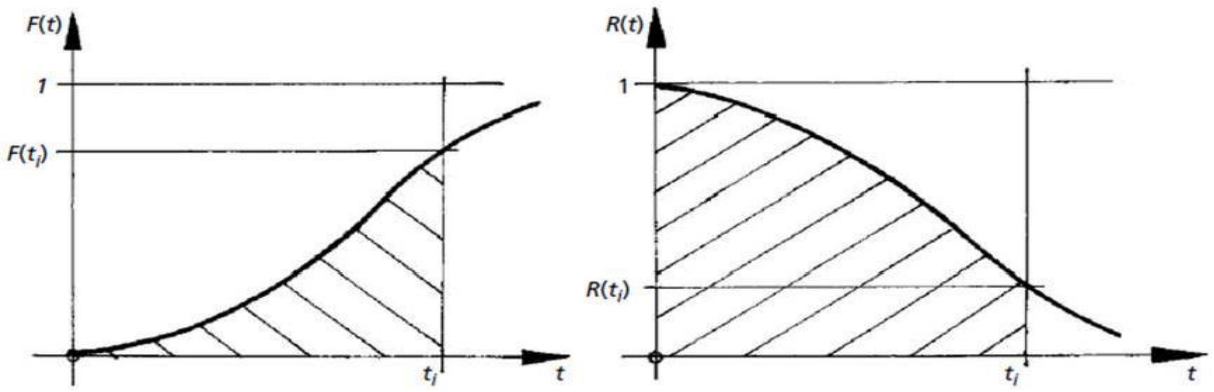
Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné (NF EN 13306) ou « caractéristique d'un bien exprimée par la probabilité qu'il

accomplisse une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné » (NF X 60–500).

III-7-2- Application de la fiabilité

Un dispositif mis en marche la $1^{ère}$ fois à t=0 tombera inexorablement en panne à un instant T non connu à priori. T (date de la panne), est une VA de la fonction de répartition F(t).

- ✓ F(t) probabilité de défaillance avant un instant ti
- ✓ R(t) probabilité de bon fonctionnement à ti
- ✓ F(t)+R(t) =1
- ✓ $\int_0^t f(t).dt + \int_t^{+\infty} f(t).dt = 1$



a) Fonction de réparti **b) Fonction de fiabilité**

Figure 10. Probabilités complémentaires

III-7-3- Différentes lois de la fiabilité

Pour évaluer la fiabilité, il est donc nécessaire de recourir à certains outils mathématiques de calcule de probabilité. L'objet n'est pas ici de présenter de façon détaillée les différentes lois, retenons simplement que l'utilisation de quelques-unes peut être nécessaire pour la détermination de la fiabilité.

III-7-3-1-. Loi exponentielle

Elle est particulièrement bien adaptée lorsque le taux de défaillance est constant. De ce fait, on l'emploie dans le cas de matériels électrique ou électroniques et pour les systèmes mécaniques lors de leur période maturité.

L'espérance mathématique est E(t) = 1/ƛ, et son expression est R(t) = e-ƛt représente l'allure de la fiabilité en fonction du temps. Voir figure 10.1.

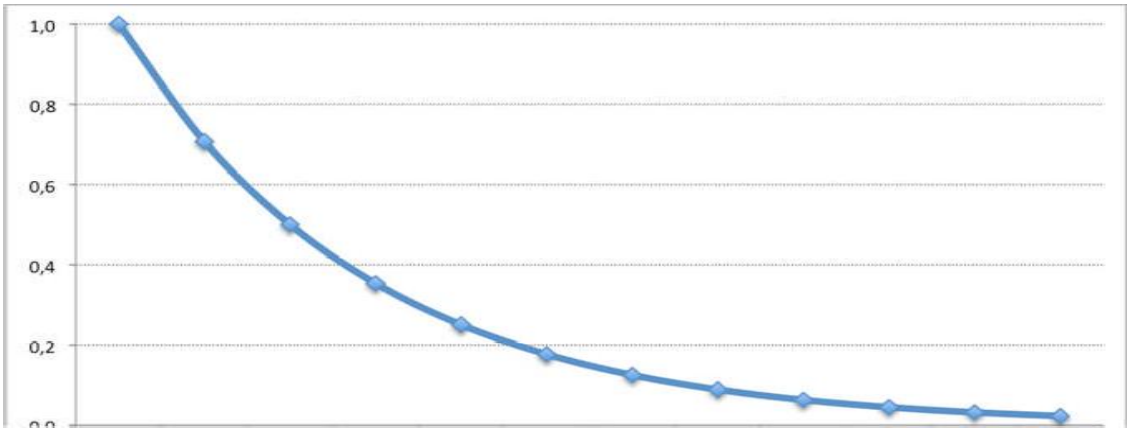


Figure 10.1Tracé de la loi exponentielle

Sur papier semi-logarithmique R(t) devient log R(t) et le nuage de points correspondant au TBF ajustable par une droite prouve que le taux de défaillance est constant.

A cette fonction R(t) est associée une fonction F(t) = 1 – R(t) dite fonction de réparation. Elle représente en quelque sorte la probabilité, en fonction du temps, de connaitre une défaillance [30].

La densité de probabilité f(t) peut se définir comme la réparation probable des défaillances, appelée aussi distribution des défaillances :

$$f(t) = ƛ(t) \times R(t) = ƛ\, e^{-ƛt}$$

Le taux de défaillance est quant à lui :

$$ƛ(t) = f(t)/R(t)$$

III-7-3-2-Loi de Weibull

Contrairement à la loi exponentielle, la loi de Weibull convient quel que soit la valeur du taux de défaillance. Grace à sa souplesse elle s'adapte à toutes les valeurs de ƛ(t) mais elle permet en plus de déterminer dans quelle période de sa vie (jeunesse, maturité, obsolescence) se trouve le système étudié [32].

Outre son adaptabilité à toutes les situations, le modèle de Weibull livre d'autres informations en plus de niveau de fiabilité d'un dispositif à un instant t.

Les trois paramètres β, η et γ de son expression :

$$\mathbf{R(t) = } e^{-(\frac{t-y}{\eta})^{\beta}}$$

Permettent une analyse plus fine et donc une image plus précise de l'état du système. Le paramètre β fournit des indications à la fois qualitatives et quantitatives du taux de défaillance instantané. Il est dit indicateur de la forme de la courbe de densité de probabilité, si sa valeur est < 1, alors ƛ(t) est décroisant, indiquant que le système est en période de jeunesse.

Maintenant, si β est égal ou très voisin de 1, c'est le signe d'un comportement régulier du système avec un taux de défaillance sensiblement constant. C'est donc la période de maturité qui est la plus longue dans le cycle de vie d'un matériel.

Enfin si la valeur du paramètre de forme β est supérieure à 1, alors le modèle de Weibull est encore plus instructif. Dans ce cas, β révèle d'abord une phase d'obsolescence et c'est l'expression quantitative qui retiendra davantage l'attention, car il est possible de lier la valeur au degré d'obsolescence de matériel.

III-7-4- Conclusion

L'intégration des outils ABC, AMDEC, MCDM et Ishikawa dans la gestion de la maintenance du groupe électrogène permet de :

- Structurer la prise de décision
- Optimiser la disponibilité et la fiabilité
- Réduire les coûts et les interruptions
- Favoriser une culture de maintenance préventive et proactive.

Utilisation de la méthode hybride AMDEC- MCDM pour la détection des modes de défaillance critiques d'un système de groupe électrogène

IV-1-Introduction

L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDEC) est l'une des méthodes les plus systématiques pour identifier les modes de défaillance potentiels dans un processus, un produit ou un service, ainsi que leurs effets, leurs causes et les risques associés. Cette approche aide les entreprises à identifier et à hiérarchiser les domaines à améliorer en repérant de manière structurée les points de défaillance potentiels et en évaluant les risques étape par étape. L'identification, l'évaluation et la priorisation des risques susceptibles d'entraîner une défaillance d'un produit, d'un processus ou d'un service font partie intégrante du processus AMDEC. Elle permet de déterminer les causes probables de défaillance, les effets de ces défaillances et la probabilité qu'elles se produisent. Les entreprises peuvent utiliser l'AMDEC pour les aider à décider des actions à entreprendre afin de réduire les risques identifiés. [33–34]

L'AMDEC offre une approche interdisciplinaire et aide à identifier les problèmes potentiels ou les risques liés à la conception d'un produit ou d'un processus. Elle facilite l'identification des zones à haut risque et la formulation de stratégies préventives ou de réduction des risques. L'AMDEC présente également des avantages pour le processus de production, car elle permet de détecter les problèmes potentiels et d'élaborer des plans pour réduire ou éliminer les risques.

Les modes de défaillance ayant les indices de criticité (RPN) les plus élevés, souvent qualifiés de critiques, servent d'indicateurs pour identifier les domaines nécessitant une refonte ou d'autres interventions. [35–36]. Par la suite, un plan d'action ainsi que des recommandations de gestion ou d'amélioration sont généralement élaborés. Les ingénieurs sont orientés vers des solutions de conception plus fiables grâce à un processus itératif de réévaluation des modes de défaillance après la mise en œuvre des solutions.

Malgré sa large adoption, l'AMDEC est reconnue pour présenter certaines limites. La plupart de ces limites sont liées à la nature non injective et non surjective de la fonction RPN. [37]

L'incertitude liée au classement, découle du fait que différents modes de défaillance peuvent obtenir la même note sur l'échelle du RPN, malgré des rapports différents entre la Gravité, la

Probabilité d'Occurrence et la Détectabilité. De plus, certaines valeurs de l'échelle du RPN, qui va généralement de 1 à 1000 dans la méthode conventionnelle, peuvent ne jamais être atteintes. Cet aspect non surjectif de la fonction RPN provient de son comportement non injectif [36].

Plusieurs études [38] ont montré que l'importance des variables de risque varie selon le contexte et le secteur d'application. Cependant, la méthode RPN classique ne permet pas de refléter cette variabilité, car elle suppose une importance égale et constante entre la Gravité, l'Occurrence et la Détectabilité.

L'évaluation précise des trois variables de risque constitue un autre défi pour la méthode RPN classique, comme le soulignent [39–40]. D'une part, les données de terrain disponibles peuvent ne pas répondre aux exigences de la méthode d'origine. D'autre part, l'équipe AMDEC peut manquer d'expertise pour analyser efficacement chaque scénario, que ce soit par une approche quantitative ou qualitative. En outre, l'absence de données suffisantes peut compliquer la hiérarchisation des facteurs de risque. L'évaluation qualitative peut entraîner des priorisations différentes [41], même au sein d'une même équipe AMDEC , ce qui met en évidence l'influence de l'expérience des membres et la dépendance au jugement de l'équipe comme limites de cette approche.

Les modèles AMDEC non traditionnels, bien que plus complexes, sont privilégiés par de nombreux utilisateurs en raison du besoin d'outils plus efficaces pour interpréter les modes de défaillance. Dans ce cadre, les recherches récentes [42–43] se sont attachées à atténuer les limites du RPN traditionnel tout en conservant sa simplicité d'utilisation et le niveau de connaissances préalables requis. L'objectif principal de ces travaux est de réduire la non-surjectivité et la non-injectivité inhérentes à la fonction RPN classique. Il convient toutefois de noter que, malgré cet objectif, ces études continuent à utiliser divers modèles qui restent eux-mêmes non injectifs et non surjectifs.

Dans une entreprise pétrolière située en zone désertique, le groupe électrogène revêt une importance stratégique majeure. En l'absence de réseau électrique fiable ou permanent, il constitue souvent la seule source d'alimentation pour les équipements critiques tels que les systèmes de forage, de pompage, les instruments de contrôle, les unités de communication et les dispositifs de sécurité. Toute interruption de courant peut entraîner l'arrêt des opérations, des

pertes économiques considérables, voire des situations dangereuses. C'est pourquoi la maintenance préventive et curative du groupe électrogène doit être une priorité. Une gestion rigoureuse de son état de fonctionnement, incluant des contrôles réguliers, le remplacement planifié des pièces d'usure et l'analyse des défaillances potentielles, permet d'assurer une disponibilité maximale et de prévenir les pannes inopinées. Dans un environnement aussi exigeant que le Sahara, où les conditions climatiques extrêmes accentuent l'usure des machines, une attention particulière à la maintenance du groupe électrogène est indispensable pour garantir la continuité et la sécurité des opérations.

Le présent chapitre propose une méthode hybride modifiée pour la hiérarchisation des pannes du groupe électrogène, en combinant l'approche AMDEC , et des techniques MCDM (VIKOR, EDAS, MOORA et TOPSIS). La technique TOPSIS est utilisée pour intégrer les autres approches. L'objectif est d'offrir un modèle à la fois simple et réaliste, capable de pallier l'absence de facteurs de risque clairement identifiables et de surmonter les limites des fonctions RPN non injectives et non surjectives, au bénéfice des utilisateurs de la méthode FMEA. Les termes linguistiques et valeurs pour les paramètres de l'AMDEC, sont représentés dans le tableau 11.

IV-2- Application de la méthode PARETO

Le tableau11 représenté la cumule des pannes du groupe électrogène. La courbe abc, est représentée par la figure 11

IV-2-1-Interprétation de la courbe ABC

La courbe ABC représente la contribution cumulative de chaque panne au temps total d'arrêt. Elle permet de classer les pannes selon leur impact.

Zone A (≈ 80 % des arrêts)

- Représente les **pannes les plus critiques**.
- Ici, les **5 premières pannes** (P16, P24, P13, P5, P9) représentent à elles seules **environ 80 %** du temps total d'arrêt.(voire Tableau 03)
- **Action prioritaire** : Ces pannes doivent être analysées et traitées en priorité pour réduire les arrêts.

Zone B (≈ 80–95 %)

- Pannes avec **impact modéré** (P4 à P3).
- Contribuent encore significativement aux arrêts, mais moins que celles de la zone A.
- **Action secondaire** : Surveillance, maintenance préventive.

Zone C (dernier 5 %)

- Nombreuses petites pannes (P10 à P15).
- Impact global très faible malgré leur nombre.
- **Action minimale** : À gérer de manière standard, sans priorisation spécifique.

Tableau:11- la cumule des pannes du groupe électrogène

Rang	Panne	Temps d'arrêt (h)	% des pannes	Cumul %	Zone
1	P16	1512	35,036496350365	35,036496350365	A
2	P24	1200	27,8067431352103	62,8432394855753	A
3	P13	384	8,89815780326729	71,7413972888426	A
4	P5	192	4,44907890163365	76,1904761904762	A
5	P9	168	3,89294403892944	80,0834202294056	A
6	P4	144	3,33680917622523	83,4202294056309	B
7	P11	144	3,33680917622523	86,7570385818561	B
8	P21	96	2,22453945081682	88,9815780326729	B
9	P22	96	2,22453945081682	91,2061174834897	B
10	P19	96	2,22453945081682	93,4306569343066	B
11	P3	48	1,11226972540841	94,542926659715	B
12	P10	48	1,11226972540841	95,6551963851234	c
13	P12	48	1,11226972540841	96,7674661105318	c
14	P26	36	0,834202294056309	97,6016684045881	C
15	P14	12	0,278067431352103	97,8797358359402	C

16	P20	12	0,278067431352103	98,1578032672923	C
17	P17	8	0,185378287568069	98,3431815548604	C
18	P25	6	0,139033715676051	98,4822152705364	C
19	P23	5	0,115861429730043	98,5980767002665	C
20	P8	4	0,0926891437840343	98,6907658440505	C
21	P6	3	0,0695168578380257	98,7602827018885	C
22	P2	2	0,0463445718920172	98,8066272737805	C
23	P7	2	0,0463445718920172	98,8529718456726	C
24	P1	1	0,0231722859460086	98,8761441316186	C
25	P18	0,5	0,0115861429730043	98,8877302745916	C
26	P15	48	1,11226972540841	100	C
	somme	4315,5	100		

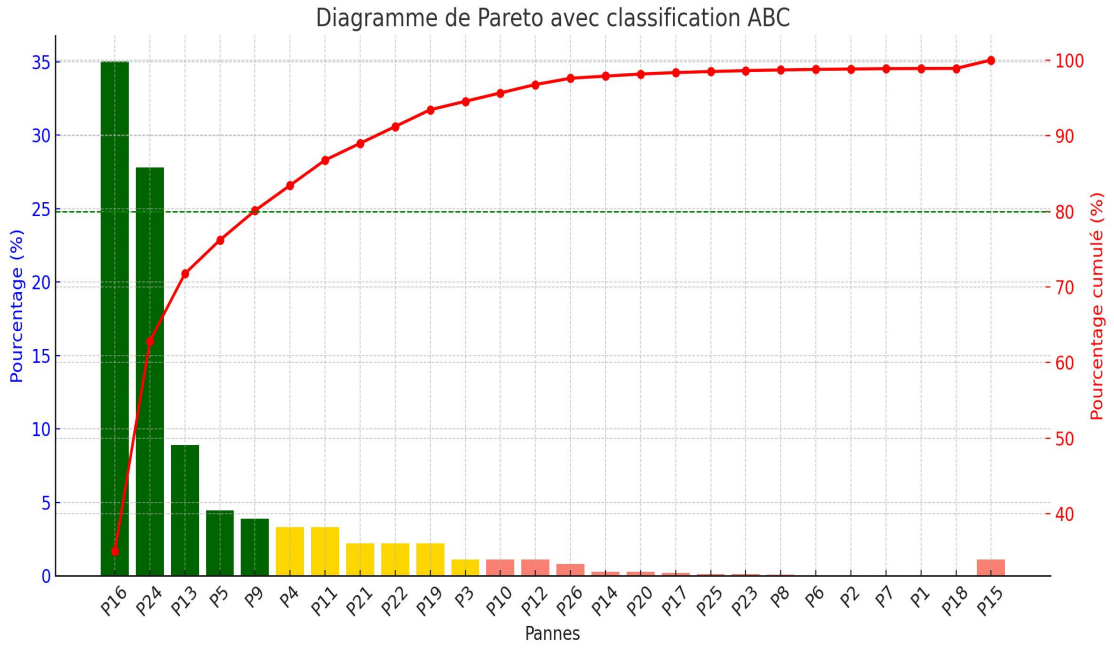


Figure:11 Diagramme de pareto avec classification ABC

Tableau 12 : Termes linguistiques et valeurs pour les paramètres de l'AMDEC

Gravité (S)	Occurrence (O)	Détection (D)	Score
Très dangereux (VH)	La défaillance est pratiquement inévitable (FI)	Incertitude absolue (AU)	10
Dangereux (H)	Très élevée (VH)	Très éloignée (VR)	9
Extrême (E)	Défaillances répétées	Éloignée (R)	8
Majeur (MA)	Élevée (H)	Très faible (RL)	7
Significatif (S)	Moyennement élevé (MH)	Faible (L)	6
Modéré (MO)	Modéré (M)	Modéré (M)	5
Faible (L)	Relativement faible (RL)	Moyennement élevé (MH)	4
Mineur (MI)	Faible (L)	Élevée (H)	3
Très mineur (VM)	Éloigné (R)	Très élevée (VH)	2
Aucun (N)	Presque impossible (NI)	Presque certain (AC)	1

IV-3- Méthodologie

la structure du modèle d'évaluation des risques associé au groupe électrogène. Ce modèle se déploie en trois étapes principales.

La première étape consiste à identifier les variables de risque ainsi que les différents modes de défaillance possibles.

Ensuite, les facteurs de risque sont définis comme des critères dans le cadre de l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), en prenant en compte trois dimensions essentielles : la Gravité (G), l'Occurrence (O) et la Détectabilité (D).

Ces éléments, correspondant à diverses défaillances, sont analysés au sein d'une matrice d'évaluation.

Enfin, les poids attribués à chaque facteur de risque sont calculés à l'aide de la méthode d'entropie, afin de déterminer leur importance relative dans l'évaluation globale des risques.

IV-3-1- Phase 1 : Identification des pondérations influentes

Les pondérations des critères sont utilisées pour déterminer leur importance relative dans le cadre de l'évaluation [42-43]. Dans cette étude, la méthode d'entropie est retenue à cet effet.

IV-3-1-1- Méthode d'entropie :

Étant donné qu'un certain volume de données est intégré dans la matrice de décision pour un ensemble de matériaux ou d'alternatives possibles, la méthode d'entropie permet d'estimer la

pondération dans une situation donnée. Cette méthode repose sur l'exploitation d'une matrice de décision préétablie. Conformément à la théorie de l'information, plus une distribution de probabilité discrète est étalée, plus l'incertitude qu'elle véhicule est grande, à l'inverse d'une distribution concentrée (Deng et al., 2000) [44].

Ainsi, à partir des informations disponibles pour chaque critère, la méthode d'entropie permet de calculer l'importance relative de chacun. Pour le j^{e} critère, l'entropie est déterminée à partir de l'ensemble des résultats normalisés selon la formule suivante :

$$E_j = \frac{-[\sum_{i=1}^{m} P_{ij} ln(P_{ij})]}{ln(m)}; \quad (1)$$

j=1,2,…,n and i=1,2,…,m

La matrice de décision normalisée fournit les valeurs Pij, définies comme suit :

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i}^{m} r_{ij}}; \quad (2)$$

où rij est un élément de la matrice de décision et Ej représente la valeur d'entropie de l'information pour le j critère. Ainsi, les poids des critères wj sont obtenus à l'aide de l'expression suivante :

$$W_j = \frac{1-E_j}{\sum(1-E_j)}; j = 1,2, \ldots, n \quad (3)$$

où (1−Ej) représente le niveau de diversité de l'information contenue dans les résultats du jth critère.

IV-3-2- Phase 2 : Utilisation de différentes méthodes pour obtenir le classement des modes de défaillance

IV-3-2-1- MCDM approaches: VIKOR, EDAS et MOORA.

a) VIKOR

Les étapes suivantes décrivent le processus de calcul mathématique de l'algorithme VIKOR :

Calcul de la valeur normalisée : La normalisation s'effectue en considérant que chaque critère *i* est associé à une alternative numérique *j*.

$$f_{\text{ij}} = \frac{x_{\text{ij}}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{\text{ij}}^2}}, j = 1,2,\ldots..,m,\ i = 1,2,\ldots,n \qquad (4)$$

1) Trouver la meilleure valeur f_i^+ et la pire valeur f_i^- les valeurs de chaque fonction critère, $i = 1,2,\ldots,n$

$$f_i^+ = \begin{Bmatrix} \max\limits_i f_{\text{ij}} & \text{pour le critére de prestation} \\ \min\limits_i f_{\text{ij}} & \text{pour le critére de cout} \end{Bmatrix}, j = 1,2,\ldots,m \qquad (5)$$

$$f_i^- = \begin{Bmatrix} \min\limits_i f_{\text{ij}} & \text{pour le critére de prestation} \\ \max\limits_i f_{\text{ij}} & \text{pour le critére de cout} \end{Bmatrix}, j = 1,2,\ldots,m \qquad (6)$$

où J is est le nombre d'alternatives, **n** est le nombre de critères et f_{ij} est l'évaluation de la i^{th} La valeur de la fonction critère pour l'alternative a_j.

1) Déterminez les mesures d'utilité et de regret en utilisant les valeurs fournies pour les alternatives de matériaux. $j = 1,2,\ldots,m$;

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{\text{ij}})}{(f_i - f_i^-)}\right] \qquad (7)$$

$$R_j = \max_i \left[\frac{w_i(f_i^* - f_{\text{ij}})}{(f_i^* - f_i^-)}\right] \qquad (8)$$

Dans la formulation de la mesure de classement, w_i représente le poids du i^{th} critère, tandis que S_j et R_j sont utilisés.

2) Calculez les valeurs de Q_j en utilisant la formule suivante:

$$Q_j = \frac{v(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + \frac{(1-v)(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \qquad (9)$$

$$S^* = \min_j S_j \ , \ S^- = \max_j S_j \ , \ R^* = \min_j R_j \ , R^- = \max_j R_j$$

La valeur de v se situe dans l'intervalle [0, 1]. Typiquement, v est supposé être 0.5.

3) Déterminez l'ordre de classement des alternatives pour un paramètre donné en calculant leurs valeurs d'indice de classement par ordre décroissant

b) Évaluation basée sur la distance à la solution moyenne (EDAS)

Ghorabaee et al. (2015) ont développé la méthode EDAS (Évaluation basée sur la distance à la solution moyenne), où la meilleure option est choisie en fonction de la distance à la solution moyenne. Cette méthode a été appliquée au problème de classification des stocks. Comme indiqué ci-dessous, les étapes à suivre avec la méthode EDAS sont les suivantes [38]:

Étape 1 : Choisir les critères importants ainsi que les alternatives à utiliser pour évaluer chaque alternative.

Étape 2 : Comme indiqué ci-dessous, construire la matrice de décision (D)

$$D = \left[D_{ij}\right]_{nxm} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ d_{31} & d_{32} & \dots & d_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

où D_{ij} représente la performance de la i_{th} de l'alternative sur le j_{th} critère.

Étape 3 : Comme indiqué ci-dessous, estimer la solution moyenne en se basant sur l'ensemble des critères.

$$AV = \left[AV_j\right]_{1xm} \quad (11)$$

Où

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_{ij}}{n} \quad (12)$$

Étape 4 : Calculez la distance positive à la solution moyenne (PDA) et la distance négative à la solution moyenne (NDA) selon la nature des critères, qu'ils soient bénéfiques ou non bénéfique

$$PDA = \left[PDA_{ij}\right]_{nxm} (13)$$

$$NDA = \left[NDA_{ij}\right]_{nxm} (14)$$

Pour le j_{th} critère bénéfique

$$PDA_{ij} = \frac{max \quad \left(0,(D_{ij} - AV_j)\right)}{AV_j} \quad (15)$$

$$NDA_{ij} = \frac{max \quad \left(0,(AV_j - D_{ij})\right)}{AV_j} \quad (16)$$

Pour le j_{th} critères non bénéfiques

$$PDA_{ij} = \frac{max \quad \left(0,(AV_j - D_{ij})\right)}{AV_j} \quad (17)$$

$$NDA_{ij} = \frac{max \quad \left(0,(D_{ij} - AV_j)\right)}{AV_j} \quad (18)$$

Dans ce contexte , PDA_{ij} représente la distance positive, et NDA_{ij} signifies the signifie la distance négative à la solution moyenne pour la i_{th} alternative et j_{th} critère.

Étape 5 : Utilisez la formule ci-dessous pour obtenir la somme pondérée de la PDA et de la NDA sur toutes les options.

$$SP_i = \sum_{j=1}^{m} w_j PDA_{ij} \quad (19)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^{m} w_j NDA_{ij} \quad (20)$$

Où, w_j est le poids de j_{th} critère

Étape 6 : Appliquez l'équation suivante pour normaliser les valeurs SP et SN pour chaque option

$$NSP_i = \frac{SP_i}{max_i(SP_i)} \quad (21)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{max_i(SN_i)} \quad (22)$$

Étape 7 : Déterminez le score d'évaluation (AS) de chaque alternative en utilisant la formule ci-dessous.

$$AS_i = \frac{1}{2}(NSP_i + NSN_i) \quad (23)$$

Où $0 \leq AS_i \leq 1$

Étape 8 : La meilleure option est choisie comme celle ayant le score d'évaluation le plus élevé.

C) MOORA [17]

Basée sur la méthodologie de l'analyse multicritère, la méthode MOORA consiste à considérer les étapes suivantes:

-Définition d'une matrice X comme suit

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \iddots & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \iddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

Où xij est la réponse de l'alternative j par rapport à l'objectif ou l'attribut i, m étant le nombre d'alternatives et n le nombre d'objectifs.

Comme il est bien connu, la méthode MOORA comporte deux composantes principales : le Système de Ratio et le Point de Référence. Celles-ci seront déterminées dans les étapes suivantes.

2. La réponse normalisée de l'alternative j par rapport à l'objectif ou à l'attribut i est donnée par :

$$x_{\mathrm{ij}}^{*} = \frac{x_{\mathrm{ij}}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{\mathrm{ij}}^{2}}}, \; j = 1,2,\ldots..,m, \; i = 1,2,\ldots,n \quad (25)$$

3. En supposant que, parmi les n objectifs, les g premiers doivent être maximisés et les n−g restants doivent être minimisés, l'évaluation normalisée de l'alternative j par rapport à l'ensemble des objectifs est donnée par :

$$y_j^{*} = \sum_{i=1}^{g} w_i x_{ij}^{*} - \sum_{i=g+1}^{n} w_i x_{ij}^{*}, \quad (26)$$

où w_i est le poids associé à l'objectif i.

4. La ith coordonnée du point de référence,ri, résulte d'une métrique de type min-max de Tchebychev, et s'exprime comme suit :

$$min\{max(r_i - x_{ij}^*)\}, \quad (27)$$

IV-3-3- Modèle hybride MCDM fondée sur l'approche AMDEC

Différentes stratégies peuvent conduire à des résultats variés. La prise de décision devient simple lorsque tous les classements des alternatives, selon diverses techniques d'évaluation, sont cohérents. Certaines recherches [45–46] ont exploré la méthode hybride MCDM, qui s'est révélée être une approche fiable pour la classification.

Dans cette étude, cinq méthodologies distinctes utilisant des stratégies de pondération par entropie sont employées pour évaluer les risques de défaillance. Cependant, une technique d'intégration appropriée est nécessaire pour déterminer le degré d'utilité global de chaque option. Lorsqu'il s'agit de classer différents types de défaillances, les gestionnaires de risques peuvent prendre des décisions plus éclairées grâce au modèle intégré proposé. Ainsi, pour obtenir un résultat exhaustif, il est recommandé aux gestionnaires de risques d'incorporer plusieurs méthodologies de prise de décision multicritère (MCDM). Les étapes spécifiques des diverses techniques MCDM intégrées, basées sur le concept de TOPSIS utilisé pour combiner les scores d'évaluation, sont décrites ci-après.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^2}}, \quad (28)$$

a) Normalisation de la matrice de décision

$$V_{ij} = r_{ij} \times W_j \quad (29)$$

Wj représente le poids attribué au critère j selon la méthode de l'entropie.

b) Détermination des solutions idéales positive (z^+) et négative (z^-)

$$Z^+ = \underbrace{max}_{n}\{RRPN, REDAS, RVIKOR, RMOORA\}\{Z_1^+.Z_2^+.Z_3^+.Z_4^+.Z_5^+\} \quad (30)$$

$$Z^- = \underbrace{max}_{n}\{RRPN, REDAS, RVIKOR, RMOORA\}\{Z_1^-.Z_2^-.Z_3^-.Z_4^-.Z_5^-\} \quad (31)$$

Étape 3 : Déterminer la distance entre chaque mode de défaillance et Z^+ et Z^-

Il est possible de déterminer la distance entre chaque mode de défaillance et les solutions idéales positive et négative, notées respectivement Z^+ PIS (a_n^+) et Z^- NIS(a_n^-) :

$$a_n^+ = \sqrt{(RRPN - Z_1^+)^2 + (REDS - Z_2^+)^2 + (RVIMOP - Z_3^+) + (RMOOR - Z_4^+)^2} \quad (32)$$

$$a_n^+ = \sqrt{(RRPN - Z_1^-)^2 + (REDS - Z_2^-)^2 + (RVIMOP - Z_3^-) + (RMOOR - Z_4^-)^2} \quad (33)$$

$$n = 1,2, \ldots, m$$

Étape 4 : Élaboration de l'indice final de classement

L'indice final de classement (FRIn) [32] constitue un critère fiable qui sert de référence pour l'établissement du classement global des alternatives. Il permet de mesurer la performance relative de chaque alternative par rapport à la solution idéale positive (PIS) et à la solution idéale négative (NIS), dans le cadre des techniques MCDM adoptées dans notre modèle proposé.

Pour établir cet indice, on utilise l'expression suivante fondée sur les distances de séparation :

$$FRI_n = \left(\frac{a_n^-}{\sum_{n=1}^{m} a_n^-}\right) - \left(\frac{a_n^+}{\sum_{n=1}^{m} a_n^+}\right) \quad (34)$$

$$-1 \leq FRI_n \leq 1$$

IV-4- ÉTUDE DE CAS

Cette étude porte sur la maintenance des groupes électrogènes dans une entreprise, située dans le sud de l'Algérie. L'analyse a porté sur les statistiques de pannes sur une période de trois ans, répertoriant dans le Tableau 1 chaque défaillance fonctionnelle du groupe électrogène ainsi que les différents types de défaillances "Pi". Après examen par des spécialistes du groupe électrogène, un total de trente modes de défaillance distincts ont été identifiés.

IV-4-1- Résultats et discutions

Notamment, le Tableau 2 classe les modes de défaillance P12 et P28 à la douzième position. Une situation similaire concerne (P2, P4 et P10), (P7, P21), (P24, P30), (P7, P21), (P3, P29), (P14, P15), (P7, P21), et (P8, P18), illustrant une limitation courante souvent discutée lors de l'application du RPN (Risk Priority Number) pour identifier les scénarios de défaillance. De plus, P13, P26 et P11 sont mis en évidence comme les trois modes de défaillance les plus significatifs.

Tableau13:. Résultats de la méthode AMDEC

Pannes	F	G	N	RPN	RANG
P13	7	5	7	245	1
P26	10	2	10	200	2
P11	5	5	6	150	3
P5	5	4	5	100	4
P16	3	10	3	90	5
P27	4	3	5	60	6
P6	5	2	5	50	7
P19	4	3	4	48	8
P23	5	1	5	25	9
P1	4	2	3	24	10
P17	4	1	5	20	11
P12	2	3	3	18	12
P28	3	2	3	18	12
P2	4	1	4	16	14
P4	2	4	2	16	14
P10	2	2	4	16	14
P7	4	1	3	12	17
P21	2	3	2	12	17
P24	1	9	1	9	19
P30	1	3	3	9	19
P3	2	2	2	8	21
P29	1	4	2	8	21
P14	1	2	3	6	23
P15	1	3	2	6	23
P9	1	5	1	5	25
P8	2	1	2	4	26

P18	2	2	1	4	26
P22	1	3	1	3	28
P20	1	2	1	2	29
P25	1	1	1	1	30

En comparant les valeurs attribuées aux variables de risque pour P13 (7,5,7), P26 (10,2,10) et F11 (5,5,6) avec leur classement RPN, il devient évident que la réduction du score de gravité a influencé la classification de P26, malgré les valeurs plus élevées d'Occurrence et de Détectabilité pour les autres défaillances. Ces résultats illustrent comment l'approche FMEA conventionnelle impacte la pondération relative de chaque indicateur de risque d'une manière échappant au contrôle des experts.

Ces pondérations, souvent déterminées de manière subjective, peuvent conduire à des classements incohérents ou biaisés. Pour remédier à ces lacunes, la présente recherche propose une méthodologie hybride plus fiable, combinant plusieurs techniques d'analyse multicritère (MCDM) : EDAS, RPN, MOORA et VIKOR. La méthode TOPSIS, est utilisée pour regrouper les classements de différentes méthodes, dans un classement unique et fiable.

Cette approche intégrée permet de prendre en compte les forces et les faiblesses de chaque méthode individuelle, offrant ainsi une évaluation plus robuste et objective des modes de défaillance. Par exemple, l'utilisation de la méthode VIKOR permet de mieux distinguer les modes de défaillance en tenant compte des compromis entre les différents critères, tandis que la méthode EDAS évalue les alternatives en fonction de leur distance par rapport à une solution idéale. La combinaison de ces méthodes, avec l'intégration des pondérations déterminées par la méthode de l'entropie, permet d'obtenir un classement plus précis et fiable des modes de défaillance.

Cette hiérarchisation est le résultat de l'application des équations (1) à (34) détaillées dans l'étude, qui intègrent les différentes méthodes mentionnées.

Le Tableau 14 illustre comment différentes approches produisent des classements variés pour les types de défaillance. En conséquence, Les pannes P13, P26, P11, P5 et P16 sont

constamment classées parmi les plus critiques par toutes les méthodes, ce qui montre une forte cohérence entre les quatre approches Cependant, il est difficile de résoudre ou d'évaluer de tels problèmes en utilisant une seule approche. Il est évident qu'aucune méthode d'évaluation unique ne peut offrir une solution complète et idéale.

Tableau 14: Comparaison des cinq premières défaillances selon différentes méthodes

Pannes	RPN	VIKOR	EDAS	MOORA
P13	1	1	2	2
P26	2	3	1	1
P11	3	2	4	4
P5	4	4	5	5
P16	5	5	3	3

Il est difficile de traiter efficacement ce type de problème en s'appuyant sur une seule méthode, car aucune approche unique ne permet d'apporter une solution à la fois complète et optimale. Une méthode hybride est essentielle pour remédier ce problème.

Les différents poids des paramètres G, F et D, déterminés par la méthode d'entropie, sont présentés dans le Tableau 15.

Tableau 15: Les différents poids des paramètres G, F et D

	G	F	D	
WJ	0.37178971	0.33337259	0.2948377	1
WJ%	37%	33%	29%	100%

.

Le classement final des modes de défaillance, obtenu à l'aide des équations (34) à (34), est présenté dans le Tableau16. Il en ressort que le mode de défaillance P13 est le plus critique, suivi de P26 et P11. La figure 3, représente les cinq premières pannes par les cinq méthodes. Les différents poids des classement des méthodes selon la matrice des classements.

Tableau16: Classement final des modes de défaillance par tout les méthodes utilisées

N/P	**RPN**	VIKOR	**EDAS**	MOORA	**Modèle proposé**
P1	10	9	**19**	12	**11**
P2	14	13	**14**	13	**13**
P3	21	20	**23**	23	**22**
P4	14	14	**18**	15	**15**
P5	4	4	**5**	5	**5**
P6	7	8	**8**	6	**7**
P7	17	16	**19**	14	**17**
P8	26	22	**28**	28	**27**
P9	25	23	**22**	19	**23**
P10	14	17	**20**	18	**18**
P11	3	2	**4**	4	**3**
P12	12	15	**17**	17	**14**
P13	1	1	**2**	2	**1**
P14	23	27	**25**	25	**26**
P15	23	26	**24**	24	**24**
P16	5	5	**3**	3	**4**
P17	11	12	**13**	11	**10**
P18	26	21	**26**	26	**25**
P19	8	7	**7**	9	**8**
P20	29	29	**29**	29	**29**
P21	17	18	**21**	20	**21**
P22	28	28	**27**	27	**28**
P23	9	11	**11**	10	**9**
P24	19	19	**16**	8	**16**
P25	30	30	**30**	30	**30**
P26	2	3	**1**	1	**2**
P27	6	6	**6**	7	**6**
P28	12	10	**15**	16	**12**
P29	21	24	**9**	21	**19**
P30	19	25	**10**	22	**20**

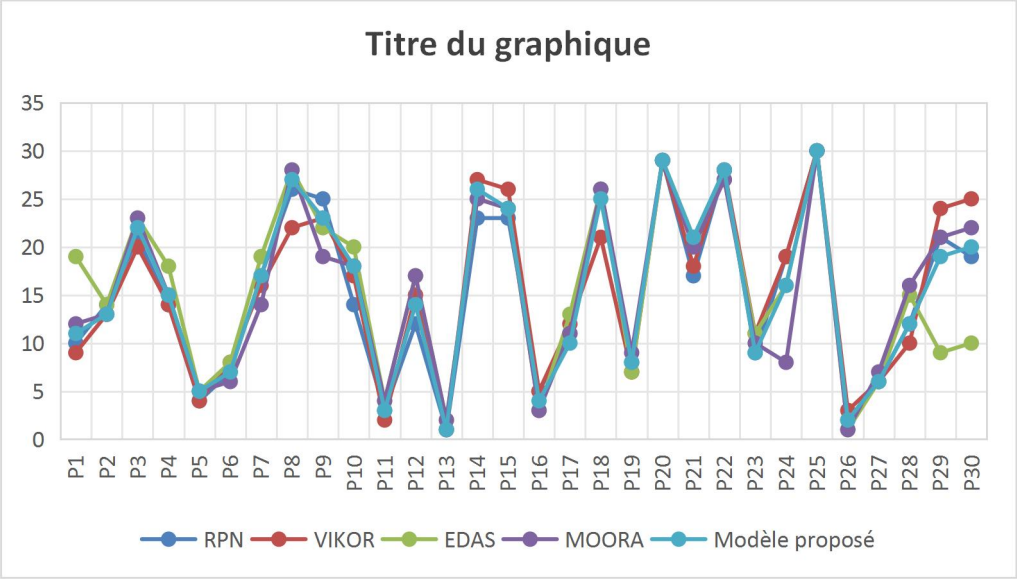


Figure :12 Classement des pannes par les différentes méthodes

Tableau :17 Les différents poids des méthodes selon la matrice des classements

	RPN	VIKOR	EDAS	MOORA	
WJ	0.25238031	0.25164685	0.2459643	0.25000854	
WJ%	25%	25%	25%	25%	100%

Tableau :18 Classement des six premiers pannes par les différentes méthodes

Classement	RPN	VIKOR	EDAS	MOORA	Modèle proposé
1	**P13**	**P13**	**P26**	**P26**	**P13**
2	**P26**	**P11**	**P13**	**P13**	**P26**
3	**P11**	**P26**	**P16**	**P16**	**P11**
4	**P5**	**P5**	**P11**	**P11**	**P16**
5	**P16**	**P16**	**P5**	**P5**	**P5**
6	**P27**	**P27**	**P27**	**P6**	**P27**

IV-5-Conclusion

Développée depuis les années 1950, la méthode l'AMDEC vise à détecter les défaillances potentielles avant leur apparition. Cette étude propose une amélioration de cette approche afin d'obtenir des résultats analytiques plus fiables et complets. Un modèle d'évaluation a été proposé pour classer les modes de défaillance des systèmes et machines, en vue d'améliorer leur gestion dans l'industrie pétrolière. Le groupe électrogène, équipement clé pour la production d'énergie électrique, a servi de cas d'étude ; les résultats identifient les vibrations (P13), les températures (P26), l'usure (P11) et le manque d'étanchéité (P16) comme les principales causes de défaillance critique. Les méthodes de hiérarchisation des risques reposent sur des concepts et calculs différents, entraînant des résultats variables à partir des mêmes données. L'approche multi-méthodes proposée assure une analyse plus stable, objective et adaptable à divers domaines de classification.

En résumé, le modèle proposé se distingue par l'utilisation de l'ENTROPIE pour pondérer les facteurs en tenant compte de leurs interactions, l'intégration de plusieurs méthodes MCDM via le concept TOPSIS pour établir un indice final de classement (FRIn), et l'identification du mode de défaillance le plus critique afin d'optimiser la maintenance.

Bien que le modèle proposé améliore les résultats par rapport aux approches précédentes, il reste limité par sa dépendance aux avis d'experts et aux données historiques. L'intégration de données réelles, de nouvelles variables, de techniques MCDM supplémentaires, Ainsi que l'usage de la théorie de la logique floue et de l'apprentissage automatique, sont des futures recommandations permettrait d'affiner l'évaluation et d'accroître la fiabilité des analyses.

Conclusion générale

Depuis sa création dans les années 1950, la méthode AMDEC s'est imposée comme un outil essentiel pour anticiper les défaillances dans les systèmes industriels. Ce travail a visé à perfectionner cette méthode en proposant un modèle d'évaluation plus complet et plus fiable, capable de mieux répondre aux exigences actuelles de gestion des risques, notamment dans le secteur pétrolier.

L'étude a porté sur un groupe électrogène, équipement central dans la production d'énergie électrique. L'analyse a révélé que les vibrations (P13), les températures élevées (P26), l'usure des composants (P11) et les défauts d'étanchéité (P16) sont les causes principales des défaillances critiques.

Nous avons appliqué les méthodes MCDM (EDAS, VIKOR, MOORA, et TOPSIS) pour choisir l'alternative optimale.

Les résultats ont également montré que les méthodes classiques de hiérarchisation des risques, bien qu'utiles, peuvent conduire à des interprétations différentes à partir des mêmes données, en raison de la diversité des critères et des calculs utilisés. Pour surmonter cette difficulté, une approche combinée a été développée. Elle repose sur l'utilisation de l'entropie pour pondérer objectivement les facteurs, l'intégration de plusieurs méthodes MCDM, et l'application du modèle TOPSIS pour obtenir un indice final de criticité (FRIn).

Cette démarche permet d'obtenir une analyse plus cohérente, objective et adaptable à différents contextes industriels, tout en facilitant la prise de décision en matière de maintenance préventive.

Néanmoins, malgré les améliorations apportées, le modèle conserve certaines limites, notamment sa dépendance aux jugements d'experts et aux données historiques. À l'avenir, l'intégration de données en temps réel, l'ajout de nouvelles variables, l'exploration d'autres techniques MCDM, ainsi que le recours à la théorie floue et aux outils de l'intelligence artificielle, tels que l'apprentissage automatique, pourraient renforcer la précision et la fiabilité des analyses.

Bibliographique

[1] Najahi, Y., Outil d'aide à l'implantation d'un système de gestion de la maintenance, Université Laval, 2003, 311p.

[2] Monchy, F., Maintenance : méthodes et organisations, Paris, Dunod, 2003. 505p.

[3] AFNOR. (1994). NF X 60-010 – Maintenance : Terminologie. Paris, France : Association Française de Normalisation.

[4] BOUANAKA MOHAMED LARBI « Contribution à la l'amélioration des performances opérationnelles des machines industrielles » ; Thèse de magister de l'université de Constantine – 2008/2009

[5] NF EN 60812 (2018) – Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE/AMDEC).

[6] AUBREVILLE Jean- Marie. Maintenance industrielle de l'entretien de base à l'opération de la sureté, Edition ellipse paris 2004.

[7]Arnold, J.R.T. (2013). Inventory Management and Control. Pearson Education.

[8]Génin, J.-M. (2017). Gestion des stocks et des approvisionnements. Éditions Dunod.
(NB : Cette référence est indicative. Veuillez adapter selon vos sources réelles.)

[9]Pareto, V. (1896). Cours d'économie politique. Lausanne: F. Rouge.

[10]Arnold, J. R. T. (2014). *Supply Chain Management and Logistics*. Pearson Education.
Ou toute autre référence académique en gestion des stocks intégrant la méthode ABC et la loi de Pareto.

[11]Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management (12th Edition). Pearson Education.

[12] ISET Nabeul Documents/chapitre-5-analyse-des-defaillances-et-aide-au-diagnostic.

[13]Analyse ABC – Théorie de gestion des stocks développée par G. Zipkin (1991) dans Foundations of Inventory Management.

[14] : François Monchy, Jean Vrenier « Maintenance Méthodes et Organisations », 3eme édition- DUNOD Paris : 2010.

[15] : BOUANAKA MOHAMED LARBI « Contribution à la l'amélioration des performances

opérationnelles des machines industrielles » ; Thèse de magister de l'université de Constantine – 2008/2009.

[16]NF EN IEC 60812 (2018). Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC). AFNOR.

[17]SienTecAL. (s.d.). Méthode AMDEC – Étapes, cotation et calcul de l'indice de criticité. Disponible sur : https://scientecal.com/methode-amdec

[18]Ishikawa, K. (1986). *Guide to Quality Control*. Asian Productivity Organization. Disponible également sur : https://www.isixsigma.com/tools-templates/cause-effect/cause-and-effect-aka-ishikawa-fishbone-diagram/

[19]Ishikawa, K. (1985). Guide to Quality Control. Asian Productivity Organization.
ISO (2015). ISO 9001:2015 – Systèmes de management de la qualité.

[20]Mardani, A., Zavadskas, E. K., Khalifah, Z., Zakuan, N., Jusoh, A., Nor, K. M., & Khoshnoudi, M. (2017). A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 216–256. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.053

[21]Roy, B. (1996). Multicriteria Methodology for Decision Aiding. Kluwer Academic Publishers.
Ou encore :
Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Springer.
DOI : https://doi.org/10.1007/b100605

[22]K. Kulakowski, "Understanding the Analytic Hierarchy Process," Underst. Anal. Hierarchy Process, no. 2012, 2020, doi: 10.1201/b21817.

[23] S. Sara et F. Dalal, ' application de la méthode SAW pour une optimisation des choix architecturaux durables , Application sur les équipements touristiques .Univ Oum el bouaghi 2018.

[24] Mu.E Pereyra-rojas,M ., "An Introduction to the analytic hieararchy processe using super decision," Practical decision making, 2017

[25] S. Senturk, Y. Binici, and N. Erginel, "The theoretical structure of Fuzzy Analytic Network Process (FANP) with Interval Type-2 Fuzzy Sets," IFAC-PapersOnLine, vol.

49, no. 12, pp. 1318–1322, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.706.

[26]Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, 49–57. DOI : 10.1016/j.omega.2014.11.009

[27] A. Gouareh, B. Settou, and N. Settou, "A new geographical information system approach based on best worst method and analytic hierarchy process for site suitability and technical potential evaluation for large-scale CSP on-grid plant: An application for Algeria territory," Energy Convers. Manag., vol. 235, p. 113963, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113963.

[28] S. Si, X. You, H. Liu, and P. Zhang, "DEMATEL Technique : A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications," vol. 2018, no. 1, 2018.

[29] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications – A State-of-the-Art Survey. Springer-Verlag.
ISBN : 978-3-540-10558-4

[30] J.M. Auberville. Maintenance industrielle, édition Marketing .Paris, 2004, page 216.

[31]Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Springer-Verlag.
ISBN : 978-3-540-10558-4

[32] S. Nakajima. La maintenance productive Totale, Mise en œuvre, édition AFNOR, 1989.

[33]Teng S-H, Ho S-Y. Failure mode and effects analysis: an integrated approach for product design and process control. International J QualReliabManag. 1996;13(5):8-26.

[34]Reiling JG, Knutzen BL, Stoecklein M. FMEA—the cure for medical errors. QualProg. 2003;36(8):67

[35]Garcia PA, Schirru R. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA.Progress in Nuclear Energy. 2005;46(3–4):359-373.

[36] Chang D-S, Sun K-LP. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA.Int J QualReliabManag. 2009;26(6):629- 643.

[37] Zhang Z, Chu X. Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. Expert Syst Appl. 2011;38(1):206-214.

[38] Yang J, Huang H-Z, He L-P, Zhu S-P, Wen D. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster–Shafer evidence theory under uncertainty. Eng Fail Anal. 2011;18(8):2084-2092.

fuzzy FMEA and fuzzy AHP. J ConstrEngManag. 2010;136(9):1028-1036.

[39] Liu H‐C. FMEA using uncertainty theories and MCDM methods. In: FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods. Singapore: Springer; 2016:13‐27.

[40] Mark FW. Failure mode and effect analysis (FMEA) as a quality by design (QbD) tool for

[41] Wang L‐E, Liu H‐C, Quan M‐Y. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid

[42] Gören HG (2018) A decision framework for sustainable supplier selection and order allocation with lost sales. J Clean Prod 183:1156–1169

[43] Deng, H., Yeh, C. and Willis, R. (2000) Inter-Company Comparison Using Modified TOPSIS with Objective Weights. Computers & Operations Research, 27, 963-973. http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(99)00069-6

[44] Lo, HW., Shiue, W., Liou, J.J.H. et al. A hybrid MCDM-based FMEA model for identification of critical failure modes in manufacturing. Soft Comput 24, 15733–15745 (2020). https://doi.org/10.1007/s00500-020-04903-x

[45] Liu HC, You JX, Ding XF, Su Q (2015b) Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. Int J QualReliab Manage 32(7):763–782

[46] Tsai TN, Yeh JH (2015) Identification and risk assessment of soldering failure sources using a hybrid failure mode and effect analysis model and a fuzzy inference system. J Intell Fuzzy Syst 28:2772–2784.