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
معـــــــهد المـــــناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Electromécanique

Utilisation de la méthode Hybride MCDM-AMDEC pour la maintenance d'une machine de forage

Par

AKRICHE FARES

Devant le jury :

Fares Noureddinne	**Président**	**MCB**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Aoulmi Zoubir	**Encadreur**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
Daouadi Rabah	**Examinateur**	**MCA**	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) عكي بشير فارس الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 405373582 و الصادرة بتاريخ 2023.03.29

المسجل بمعهد المناجم قسم إلكتروميكانيك

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها :

مذكرة ماجستير بعنوان:

utilisation de la méthode hybride M.C.D.M - A.M.D.E.C pour la maintenance d'une machine de forage.

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2025.06.04

إمضاء المعني (ة)

أقر وأصدق على إمضاء السيد/ ..... من الزرقاء في ..... 04 جوان 2025

عن رئيس ... إمضاء : لطرش رأضية

Remerciements

Je tiens à remercier ALLAH le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier ma famille ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidé(e) de près ou de loin à préparer ce travail, en particulier. Un grand merci assez particulier à mon encadreur qui m'a énormément aidé. Je remercie tous les enseignants du département d'électromécanique. Enfin je remercie tous les personnels de l'Institut des Mines, plus essentiellement le groupe

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents à qui je dois toutes mes études, que Allah me les garde.

À mes frères, ma sœur et son fils, à qui je souhaite tout le bonheur.

À tout la famille Akriche.

À tous mes amis.

Abréviations

TTR : Temps de réparation.

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

ABC : Méthode de Pareto.

MCDM : Multi-Critérié Décision-Making.

BWM: Best and Worst Méthod Technique of Order Preference Similarity the Ideal Solution.

FUZZY-AHP: Fuzzy Analytical Hierarchy Process Simple Additive Weighting Méthode.

DEMATEL: Décision Making Trial and Evaluation Laboratory Méthode.

SAW: Simple Additive Weighting Méthode.

G :la gravité

F :la fréquence

D :la détectabilité

C :la criticité

LISTE DES FIGURES

N°de Figure	TITRE	PAGES
CHAPITRE II		
1	Appareil de forage	13
2	Trépan	15
3	Tige de forage	15
4	Tige carrée	16
5	Table de rotation	16
6	Top drive	17
7	Tête d'injection	18
8	Schéma cinématique d'un mécanisme de levage	19
9	Système de mouflage	20
10	moufle fixe	21
11	Ensemble moufle et crochet	21
12	Le Treuil De Forage	23
13	Les pompes de forage	24
CHAPITRE IV		
1	Travail en ciel ouvert	59
2	L'entrée principale du souterrain	60
3	La foreuse B-BURG HD 1500 D	61
4	Comparaison des rangs des défaillances selon les méthodes MCDM (VIKOR, EDAS, RPN, Hybride)	67

LISTE DES TABLEAUX

N° des Tableaux	TITRE	PAGES
CHAPITRE III		
1	Historique de l'AMDEC	27
2	L'indice de fréquence F	32
3	Indice de gravité G	33
4	Indice de non détection D	34
5	Contenu d'un tableau d'AMDEC	35
6	L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP	39
7	L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP	41
8	L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans BWM	43
9	L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans DEMATAL	45
CHAPITRE IV		
1	Caractéristiques techniques de la foreuse B-BURG HD 1500D	62
2	L'analyse ABC	63
3	Termes linguistiques et valeurs pour G, F, D	73
4	La méthode AMDEC pour la machine de forage B-BURG	80
5	Classement décroissant des causses de défaillance par criticité	83
6	Evaluation de la criticité.	83
7	Le classement conventionnel de l'AMDEC	85
8	Poids estimés selon différentes méthodes (Par la méthode CRITIC)	85
9	Tableau de comparaison des classements des modes de défaillance selon RVikor, EDAS et RPN	86
10	Tableau de comparaison des classements des modes de défaillance selon RVikor, EDAS, RPN et l'approche hybride	87
11	Tableau des poids des critères (Wj) pour l'évaluation des modes de défaillance	88

LISTE DES ORGANIGRAMMES

N° des Organigrammes	TITRE	PAGES
CHAPITRE I		
1	Les types de maintenances	5
CHAPITRE III		
1	Démarche pratique de l'AMDEC machine	30
2	Structure de la hiérarchie AHP	39
3	les étapes de la méthode AHP	40
4	Les étapes de la méthode FUZZY-AHP	42
5	Les étapes de la méthode BWM	45
6	Les étapes de la méthode Dematal	47
7	Processus de la méthode TOPSIS	50
8	Les étapes de la méthode SAW	51
9	Opérateurs d'agrégation	53
CHAPITRE IV		
1	La courbe d'ABC	67
2	Diagramme cause-effet	70
3	Modèle AMDEC basé sur l'intégration CRITIC–MCDM proposé	72

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des organigrammes

I.1. Introduction : 3

I.2. Définition de la maintenance : 3

I.3. L'histoire de la maintenance industrielle : 3

I.4. Politique de maintenance : 4

I.5. Importance et rôle de la maintenance : 4

I.6. Objectifs de la maintenance : 4

I.6.1 Les objectifs de coût : 4

I.6.2 Les objectifs opérationnels : 5

I.7. Les Méthodes de maintenance : 5

I.7.1 La maintenance préventive : 6

I.7.1.1 La maintenance préventive systématique : 6

I.7.1.2 Maintenance préventive conditionnelle : 6

I.7.2 La maintenance corrective : 6

I.7.2.1 La maintenance palliative : 6

I.7.2.2 La maintenance curative : 6

I.8. Les opérations de la maintenance : 6

- Les inspections : 6
- Les visites : 7
- Le dépannage : 7
- La réparation 7
- Les révisions : 7
- Le contrôle : 7

I.9. Les niveaux de maintenance : 8

1*ér*niveau : 8

2*éme*niveau : 8

3*éme* niveau : 8

4*éme*niveau : 8

SOMMAIRE

5é*me*niveau : 8
I.10. Le Service de maintenance : 9
I.10.1 Fonction du service maintenance : 9
I.10.1.1 Fonction Préparation : 9
I.10.1.2 La fonction réalisation : 9
I.11.Conclusion : 11
II.1 Introduction : 13
II.2. Définition du forage : 13
II.3. Description de l'appareil de forage : 13
II.4. Classification : 14
II.5. Fonction d'un appareil de forage : 14
A. Equipements de fond (garniture) : 15
- Le trépan : 15
- Les tiges de forage : 15
- Tiges carrées : 16

B. Equipements de surface (installation) : 16
B.1. Fonction rotation : 16
B.2. Fonction levage : 18
B.3.Le Mouflage : 20
LE TREUIL DE FORAGE : 23
C. Fonction Pompage : 24
C.1. Pompe de forage : 24
D. Fonction de sécurité : 24
D.1. L'installation de l'obturateur de sécurité : 24
II.6. Conclusion : 25
III.1 Introduction : 27
III.2. AMDEC : 27
III.2.1. Définition de l'AMDEC : 27
III.2.2. Historique de l'AMDEC : 27
III.2.3. Les avantages de l'AMDEC : 28
III.2.4. Le principe d'AMDEC : 28
III.2.5. Types d'AMDEC : 28
III.2.6. Terminologie : 29
III.2.7. Les étapes de AMDEC : 30
III.2.8. Caractéristiques essentielles de l'AMDEC : 31

SOMMAIRE

III.2.9. But d'AMDEC : 31
III.2.10. Mise en place des plans d'actions : 34
III.2.11. Présentation des résultats : 35
III.3. Méthode MCDM : 35
III.3.1. Définition MCDM : 35
III.3.2. Historique de l'aide à la décision : 35
III.3.3. Objectif de l'aide à la décision : 36
III.3.4. Classification des méthodes : 36
III.3.4.1 Méthodes d'agrégation : 36
III.3.4.2 Méthodes interactives : 37
III.3.4.3 Méthodes de sur-classement : 38
III.3.5. Les méthodes d'aide à la décision multicritères MCDM : 38
III.3.5.1 Méthode AHP : 38
III.3.5.2. La méthode FUZZY-AHP : 41
III.3.5.3. Best and Worst Methode (BWM) (méthode de meilleure et pire) : 43
III.3.5.4 Méthode DEMATAL : 45
III.3.5.5 Méthode TOPSIS : 47
III.3.5.6 SAW: Simple additive weighting Method: 50
III.3.6. Matrices multicritères : 52
III.3.7. Étapes générales du MCDM : 52
III.3.7.1. Structuration d'un problème de décision : 52
III.3.7.3. Détermination de la recommandation finale MCDM : 52
III.3.8. Catégories décisionnelles multicritères : 53
III.3.8.1. Fonctions d'utilité : 53
III.3.8.2. Fonction discriminante : 53
III.3.8.3. Relations de sur classement 53
III.3.8.4. Approches compensatoires, non compensatoires et compensatoires partielles 54
III.3.8.5. Prise de décision individuelle ou en groupe 54
III.3.8.6. Informations qualitatives/quantitatives ou certaines/incertaines 54
III.3.8.7. Méthodes basées sur des compromis et non basées sur des compromis 54
III.3.8.8. MODM ou MADM : 54
IV.1. Introduction 57
IV.2Présentation générale sur la mine de Boukhadra 57
IV.2.1Situation géographique 57
IV.2.2 Historique de la mine : 58
IV.2.3. LES DATES IMPORTANTES : 58

SOMMAIRE

IV.3. Gisement primaire : 59
IV.3.1. La mine à ciel ouvert : 59
IV.3.1.1. Ciel ouvert 59
IV.3.2. La mine souterraine : 60
IV.3.2.1. Souterrain 60
IV.4. Rôle stratégique du forage dans l'activité minière : 60
IV.5.1. Caractéristiques techniques principales 62
IV.5.2. Sous-systèmes techniques de la machine 62
IV.5.3. Justification du choix pour l'étude 62
IV.6. L'application Pratique des méthodes d'analyse 63
IV.6.1. Méthode d'analyse prévisionnelle « ABC (Pareto) » 63
IV.6.2 La courbe de Pareto 67
IV.7. Méthode Cause-Effets (ISHIKAWA) 69
IV.8. Méthodologie 70
IV.8.1. Évaluation des indices de l'AMDEC 72
IV.8.2. Détermination des poids des facteurs de risque à l'aide de la méthode CRITIC 72
IV.8.3. Approche d'intégration MCDM proposée : VIKOR et TOPSIS 73
IV.8.3.1. Méthode TOPSIS 73
IV.8.3.2 Méthode VIKOR 75
IV.8.4. Utilisation la méthode de l'AMDEC 78
IV.8.4.1. Synthèse (évaluation de la criticité) 82
IV.8.4.2. Classification des éléments suivant leur indice de criticité 82
IV.8.4.3. Solution et recommandation 83
IV.8.5. Utilisation de la méthode CRITIC 84
IV.8.6. Utilisation des méthodes EDAS, VIKOR et criticité 85
IV.9. Conclusion : 88

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte industriel de plus en plus concurrentiel, la performance et la disponibilité des équipements de production constituent des enjeux majeurs. Les arrêts imprévus, souvent causés par des pannes techniques, engendrent des pertes économiques significatives et affectent la continuité des activités. C'est dans ce cadre que la maintenance industrielle prend une importance stratégique, en s'appuyant sur des outils méthodologiques rigoureux permettant d'anticiper les défaillances et d'optimiser les interventions.

Parmi les méthodes les plus répandues figure l'**AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité)**, qui permet d'identifier les points faibles d'un système et de hiérarchiser les défaillances en fonction de leur criticité. Cependant, cette approche présente certaines limites, notamment dans la subjectivité des notations et l'absence de pondération rigoureuse entre les critères analysés.

Pour pallier ces insuffisances, il devient pertinent d'introduire une démarche hybride intégrant des techniques d'aide à la décision multicritères (**MCDM – Multi-Criteria Decision Making**). Ces méthodes permettent de structurer la prise de décision en tenant compte de plusieurs facteurs simultanément, offrant ainsi une hiérarchisation plus fiable et objective des risques.

Dans ce mémoire, nous proposons une application conjointe des méthodes **AMDEC** et **MCDM (notamment TOPSIS et VIKOR)** à une machine de forage utilisée dans la mine de **Boukhadra** : la **BBURG 1500 HD**. L'objectif principal est d'améliorer la stratégie de maintenance en identifiant les composants les plus critiques, en analysant leurs modes de défaillance et en proposant des actions correctives priorisées sur la base d'une évaluation multicritère.

CHAPITRE 01 : Généralité sur la maintenance

I.1. Introduction :

La maintenance industrielle occupe une place primordiale dans l'environnement de production moderne, car elle contribue directement à la continuité des activités, à la réduction des pannes et à l'optimisation des performances des équipements. Comme l'indique le chapitre 1, la maintenance industrielle se définit comme « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise » .

Ce premier chapitre propose une vue d'ensemble des notions fondamentales de la maintenance, en mettant en évidence ses principaux types : la maintenance corrective, qui intervient après la survenue d'une panne ; la maintenance préventive, réalisée selon un calendrier préétabli pour éviter les défaillances ; et la maintenance prédictive, qui s'appuie sur des technologies avancées pour surveiller l'état des équipements et anticiper les pannes potentielles.

L'étude de ces concepts vise non seulement à minimiser les arrêts imprévus, mais aussi à améliorer la productivité et à réduire les coûts de manière durable. Ainsi, la compréhension de la maintenance industrielle devient essentielle dans un contexte industriel en constante évolution, où la fiabilité et la performance sont des exigences incontournables.

I.2. Définition de la maintenance :

D'après LAROUSSE : « Ensemble de tout ce qui permet de maintenir ou de rétablir un système en état de fonctionnement ». [1]

D'après AFNOR (NF X 60 - 010) : Maintenir veut dire effectuer des opérations de conservation du potentiel du matériel (Dépannage, visites, graissage, réparation, modernisation). Afin d'assurer la continuité de marche et la qualité de production. [2]

I.3. L'histoire de la maintenance industrielle :

Depuis le début de la révolution industrielle, de nombreux événements se sont produits. Toutefois, ce sont les cinquante dernières années qui ont connu les changements les plus draconiens. Ces transformations ont eu un impact sur la maintenance et l'entretien de l'ensemble des complexes industriels. Les équipements industriels, avant la Seconde Guerre mondiale, étaient imposants, vieillissants et tournaient à un rythme assez lent. Ils étaient contrôlés à l'aide d'un système élémentaire et d'instrumentation. Ce facteur ne posait pas encore de problèmes, étant donné que la demande de l'époque n'était pas aussi élevée qu'elle l'est aujourd'hui. Les différents équipements étaient solides et robustes. Dans certaines usines, on retrouvait des machines qui fonctionnaient aussi bien après 20 ans qu'au premier jour.

Après la guerre, la reconstruction industrielle a repris. Le marché, devenu de plus en plus compétitif, poussa les propriétaires d'usine à accroître le rythme de leur production. L'utilisation excessive des machines provoqua une augmentation des pannes ainsi que des coûts de réparation de plus en plus élevés. L'accroissement de la production et de l'usage des équipements industriels mena au développement de la maintenance préventive.

Depuis les années 1980, les complexes industriels ainsi que les systèmes de production se sont spécialisés et complexifiés davantage. En parallèle, la compétitivité du marché et l'intolérance face aux pannes n'ont cessé de croître. Ce phénomène inévitable a également contribué à l'augmentation du coût de la maintenance industrielle.

Avec la demande croissante pour une production constante et le développement des connaissances sur la prévention des pannes, la découverte de nouvelles techniques et l'amélioration de la gestion de la maintenance ont grandement contribué à la compréhension des machines industrielles et des systèmes de production. Les professionnels commencèrent à accorder une attention particulière aux risques potentiels et à recueillir une panoplie de données variées. Cela permit aux industriels de mieux comprendre les risques de pannes ainsi que les moyens de les prévenir.[3]

I.4. Politique de maintenance :

XP X60-020 (1995) : Objectifs et orientation généraux d'une entreprise en matière de maintenance, tels qu'ils sont formellement exprimés par la direction générale.

I.5. Importance et rôle de la maintenance :

L'importance et le rôle de la maintenance sont illustrés par la nécessité d'assurer la disponibilité permanente et le bon fonctionnement des installations matérielles de production. En définitive, le rôle de la maintenance serait de permettre aux autres services de l'entreprise d'accomplir leurs fonctions, tout en assurant un rendement optimum des investissements. [4]

I.6. Objectifs de la maintenance :

I.6.1 Les objectifs de coût :

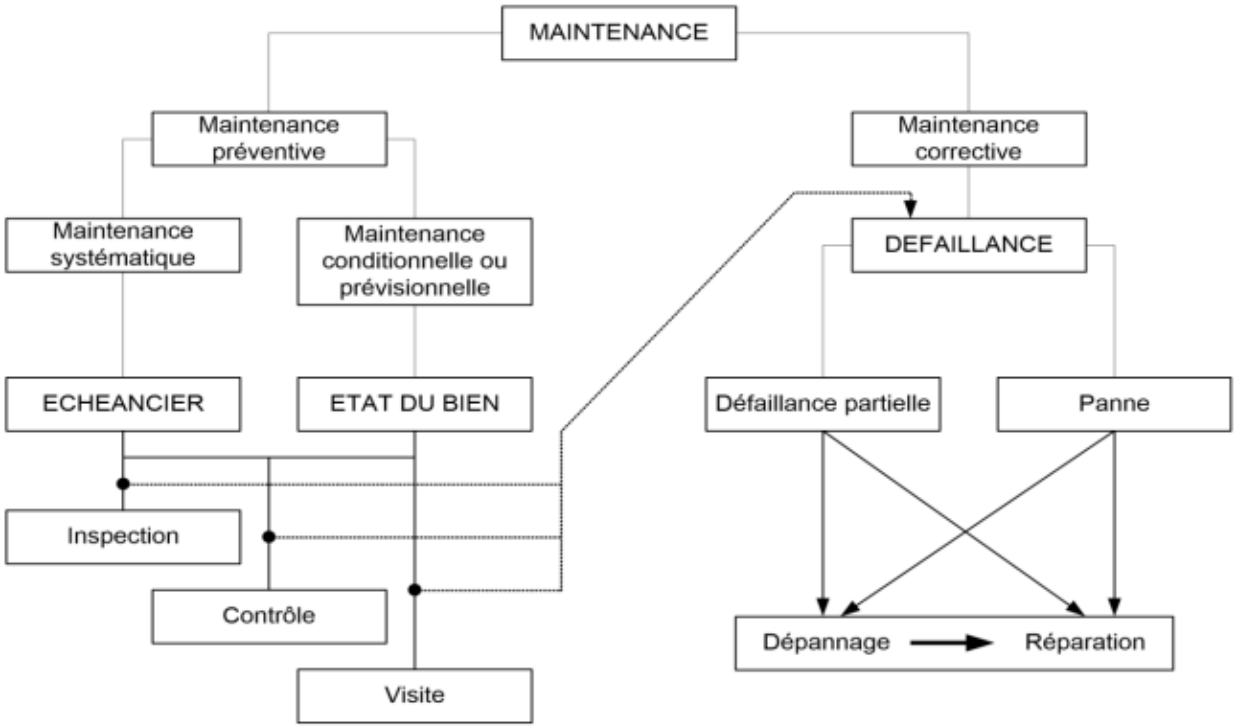
- Minimiser les dépenses de maintenance.
- Assurer la maintenance tout en respectant les limites d'un budget.
- Avoir des dépenses de maintenance liées au service, telles qu'exigées par l'installation en fonction de son âge et de son taux d'utilisation.
- Tolérer, à la discrétion du responsable de la maintenance, une certaine part de dépenses imprévues.

I.6.2 Les objectifs opérationnels :

- Maintenir le bien durable :
  - Dans un état acceptable
  - Dans des meilleures conditions

- Assurer une disponibilité maximale à un coût raisonnable.
- Éliminer les pannes à tout moment et au meilleur coût.
- Maximiser la durée de vie du bien.
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées.
- Garantir au bien des performances de haute qualité.
- Assurer un fonctionnement sûr et efficace du bien.
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum.
- Maintenir une présentation du bien suffisamment satisfaisante.
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue.

I.7. Les Méthodes de maintenance :



Organigramme I.1 : Les types de maintenances.

I.7.1 La maintenance préventive :

La maintenance préventive effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit faire ressortir un gain lié à la prévention de ces défaillances.

I.7.1.1 La maintenance préventive systématique :

C'est une opération de maintenance préventive réalisée conformément à un calendrier prédéfini basé sur le temps écoulé ou le nombre d'unités d'utilisation.

I.7.1.2 Maintenance préventive conditionnelle :

C'est une maintenance préventive déclenchée par un événement prédéfini (auto-diagnostique, signal d'un capteur, mesure d'usure…), visant à surveiller en continu l'état de fonctionnement d'un équipement et son évolution dans le temps. Elle est également désignée sous le nom de maintenance prédictive.

I.7.2 La maintenance corrective :

C'est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. [5] Et selon AFNOR « Opération de maintenance effectué après détection d'une défaillance ».

I.7.2.1 La maintenance palliative :

C'est une maintenance qui effectue une remise en état provisoire du matériel ayant subi un dysfonctionnement : C'est un dépannage. Cette maintenance est le plus souvent associée à des systèmes ne présentant pas d'impératif de sécurité. [6]

I.7.2.2 La maintenance curative :

La maintenance curative correspond à la remise en état de l'équipement et revêt un caractère définitif. L'équipement concerné par cette maintenance, retrouve après intervention les caractéristiques qu'il avait avant l'apparition du problème. [6]

I.8. Les opérations de la maintenance :

- **Les inspections :** Ce sont des activités de surveillance (ronde à fréquence courte) visant à détecter périodiquement des anomalies et à effectuer des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements. Elle permet une surveillance quotidienne de l'ensemble des équipements, prévenant ainsi l'apparition d'un grand nombre de défaillances mineures susceptibles, à long terme, d'engendrer des conséquences majeures. [7]

Les rondes, sur matériel en service, comprennent

- La lubrification (contrôles, pleins, vidanges,)
- Des contrôles de pressions de températures, de vibrations
- Des examens sensoriels : détection visuelle de fuites, détection d'odeur, des bruits anormaux, etc…
- Des travaux mineurs : dépannages simples, réglages
- Ecoute des cognements de pompage ou des chocs hydrauliques à l'aide d'un casque et avec l'ouïe.

• **Les visites :**

Ce sont des opérations de surveillance qui dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité prédéterminée. Ces interventions correspondent à une liste d'opérations définies à l'avance et peuvent nécessiter le démontage de certains organes ainsi que l'immobilisation du matériel. [7]

• **Le dépannage :** Ce sont les actions physiques exécutées pour permettre à un bien en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée. [8]

• **La réparation :** C'est une intervention définitive, limitée à la maintenance corrective, effectuée après une panne ou une défaillance. Elle peut être décidée immédiatement après un incident ou une défaillance, ou bien après un dépannage, voire à la suite d'une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique. [7]

• **Les révisions :** ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un équipement. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau. [9]

• **Le contrôle :** Il consiste en des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'une évaluation ou d'un jugement. Le contrôle peut une activité d'information, inclure une décision, déboucher comme les visites sur des opérations de maintenance corrective.

I.9. Les niveaux de maintenance :

$1^{ér}$ niveau :

Réglages simples prévus par le constructeur, réalisés au moyen d'éléments accessibles sans démontage ni ouverture de l'équipement, ou remplacement d'éléments consommables aisément accessibles en toute sécurité, tels que des voyants ou certains fusibles, etc. Ce type d'intervention peut être effectué sur place par l'exploitant du bien, sans outillage, à l'aide des instructions d'utilisation. Le stock de pièces consommables nécessaires reste très limité.

$2^{éme}$ niveau :

Dépannage par échange standard des éléments prévus à cet effet, accompagné d'opérations mineures de maintenance préventive, telles que le graissage ou le contrôle du bon fonctionnement. Ce type d'intervention peut être réalisé sur place par un technicien habilité de qualification moyenne, à l'aide de l'outillage portable spécifié dans les instructions de maintenance et en suivant ces mêmes instructions. Les pièces de rechange transportables nécessaires sont disponibles sans délai, à proximité immédiate du lieu d'exploitation.

$3^{éme}$ niveau :

Identification et diagnostic des pannes, réparations par échange de composants ou d'éléments fonctionnels, réparations mécaniques mineures, ainsi que toutes les opérations courantes de maintenance préventive telles que le réglage général ou le réalignement des appareils de mesure. Ce type d'intervention peut être réalisé par un technicien spécialisé, sur place ou dans un local de maintenance, à l'aide de l'outillage spécifié dans les instructions de maintenance, ainsi que des appareils de mesure et de réglage, et éventuellement de bancs d'essais et de contrôle des équipements. Il utilise l'ensemble de la documentation nécessaire à la maintenance du bien, ainsi que les pièces fournies par le magasin.

$4^{éme}$ niveau :

Tous les travaux importants de maintenance corrective ou préventive, à l'exception des opérations de rénovation et de reconstruction. Ce niveau inclut également le réglage des appareils de mesure utilisés pour la maintenance, ainsi que, le cas échéant, la vérification des étalons de travail par des organismes spécialisés. Ce type d'intervention est réalisé par une équipe disposant d'un encadrement technique hautement spécialisé, dans un atelier dédié.

$5^{éme}$ niveau :

Rénovation, reconstruction ou réalisation de réparations majeures confiées à un atelier central ou à une unité extérieure. Par définition, ce type de travaux est exécuté par le constructeur ou le reconstructeur, en utilisant des moyens définis par le constructeur, proches de ceux employés lors de la fabrication.

I.10. Le Service de maintenance :

I.10.1 Fonction du service maintenance :

I.10.1.1 Fonction Préparation :

La préparation des interventions de maintenance doit être considérée comme une fonction à part entière du processus de maintenance. Toutes les conditions nécessaires à la bonne exécution d'une intervention doivent ainsi être prévues, définies et caractérisées. Cette préparation doit naturellement s'inscrire dans le respect des objectifs généraux fixés par la politique de maintenance : coût, délai, qualité, sécurité, etc.

Quel que soit le type d'intervention à réaliser, la préparation est toujours présente. Elle peut être :

- Implicite (non formalisée) : dans le cas de tâches simples, l'intervenant assure lui-même, par expérience et souvent de manière automatique, la préparation de ses actions.

-Explicite (formalisée) : effectuée par un préparateur, elle donne lieu à l'élaboration d'un dossier de préparation structuré. Ce dossier, faisant partie intégrante de la documentation technique, est utilisé à chaque réalisation de l'intervention. Il est répertorié et conservé, sous réserve de mises à jour ultérieures. [10]

I.10.1.2 La fonction réalisation :

A. Pilotage :

Le pilotage des actions de maintenance consiste principalement à gérer les moyens nécessaires : personnel, outillage, pièces de rechange, etc.

B. Réalisation :

La réalisation consiste à mettre en œuvre, selon les règles de l'art, les moyens définis dans le dossier de préparation afin d'atteindre les résultats attendus dans les délais fixés par l'ordonnancement. La réussite de cette phase repose souvent sur l'utilisation de moyens de communication adaptés.

La réalisation peut nécessiter un diagnostic (une identification et une caractérisation de la défaillance) impliquant la mise en œuvre d'outils méthodologiques appropriés.

Dans certains cas il peut être nécessaire de chercher l'assistance d'un spécialiste approprié, pour déterminer la véritable cause d'une panne. De la même façon, les techniques de diagnostic des pannes sont de plus en plus utilisées. Ces moyens comprennent par exemple la façon de lire les plans, les techniques de management, l'établissement d'arbres des causes et effets, les courbes de Pareto, et peuvent comprendre également les méthodes conçues spécialement par les fabricants pour des équipements spécifiques.[11]

C. Organisation :

Le directeur du service maintenance assume plusieurs responsabilités essentielles, à savoir :

- Une responsabilité technique du patrimoine qui lui est confié.
- Une connaissance approfondie des équipements et des défaillances, ainsi que de leurs causes potentielles.
- Une connaissance des risques encourus (financiers, techniques, humains) lors d'un arrêt de production, qu'il soit provoqué par une défaillance ou planifié pour une intervention.
- Une responsabilité sociale, car il doit gérer les ressources humaines (disponibilité, constitution des équipes, etc.).
- Une responsabilité économique du matériel confié et du service de maintenance.

À ce titre, il doit :

- Analyser et optimiser les coûts de maintenance.
- Gérer les stocks de pièces de rechange et les outillages.
- Planifier et gérer les interventions sur les équipements afin d'optimiser leur disponibilité.

Il assume également une responsabilité politique, car il doit positionner stratégiquement son service au sein de l'entreprise, ce qui peut s'avérer complexe.

Il est évident que l'ensemble de ces responsabilités ne peut être assumé efficacement qu'en s'entourant de compétences solides, qui doivent se retrouver dans les grandes fonctions du service maintenance.

I.11.Conclusion :

En conclusion, il apparaît clairement que la maintenance industrielle ne se limite pas à réparer les pannes au moment où elles surviennent, mais qu'elle constitue un système global visant à assurer l'efficacité opérationnelle et la durabilité des équipements. Comme le souligne le chapitre 1, « une stratégie de maintenance efficace contribue directement à la réduction des pannes, à l'allongement de la durée de vie des équipements et à l'amélioration de la productivité ».

La réalisation de ces objectifs nécessite la mise en place de programmes de maintenance bien structurés, combinant prévention et surveillance continue, tout en intégrant les technologies modernes de contrôle et d'analyse. Par ailleurs, une bonne organisation et une planification rigoureuse des opérations de maintenance permettent de limiter les coûts imprévus et de garantir la sécurité des travailleurs et des installations.

Ainsi, la maîtrise des principes de la maintenance industrielle constitue un levier fondamental pour bâtir un environnement de production efficace et durable, répondant aux défis croissants de l'industrie contemporaine en matière de fiabilité et de qualité.

CHAPITRE 02 : Généralité sur les machines des forages

II.1 Introduction :

Le forage constitue une étape cruciale dans l'exploration et l'exploitation des ressources souterraines, qu'elles soient pétrolières, gazières ou hydriques. Cette opération, réalisée à l'aide de dispositifs mécaniques sophistiqués, vise à creuser des puits pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres de profondeur. L'appareil de forage, élément central de ce processus, est un ensemble complexe de machines et d'équipements permettant d'assurer les fonctions de rotation, de levage, de pompage et de sécurité. Ce chapitre se propose de détailler les composants de cet appareil, ses différentes fonctions, ainsi que les technologies modernes qui y sont intégrées.

II.2. Définition du forage :

Un appareil de forage est conçu pour creuser un puits reliant un gisement souterrain à la surface, dans des conditions optimales de sécurité et d'efficacité technique. Il comprend un ensemble d'équipements mécaniques, souvent montés sur un camion ou intégrés dans un atelier, permettant de pénétrer les sous-sols à des fins scientifiques ou économiques. Les techniques de forage peuvent être utilisées aussi bien dans des ateliers fixes que sur des dispositifs mobiles.[12]

II.3. Description de l'appareil de forage :

Un appareil de forage doit réaliser, dans les meilleures conditions techniques et de sécurité, un puits reliant le gisement à la surface.

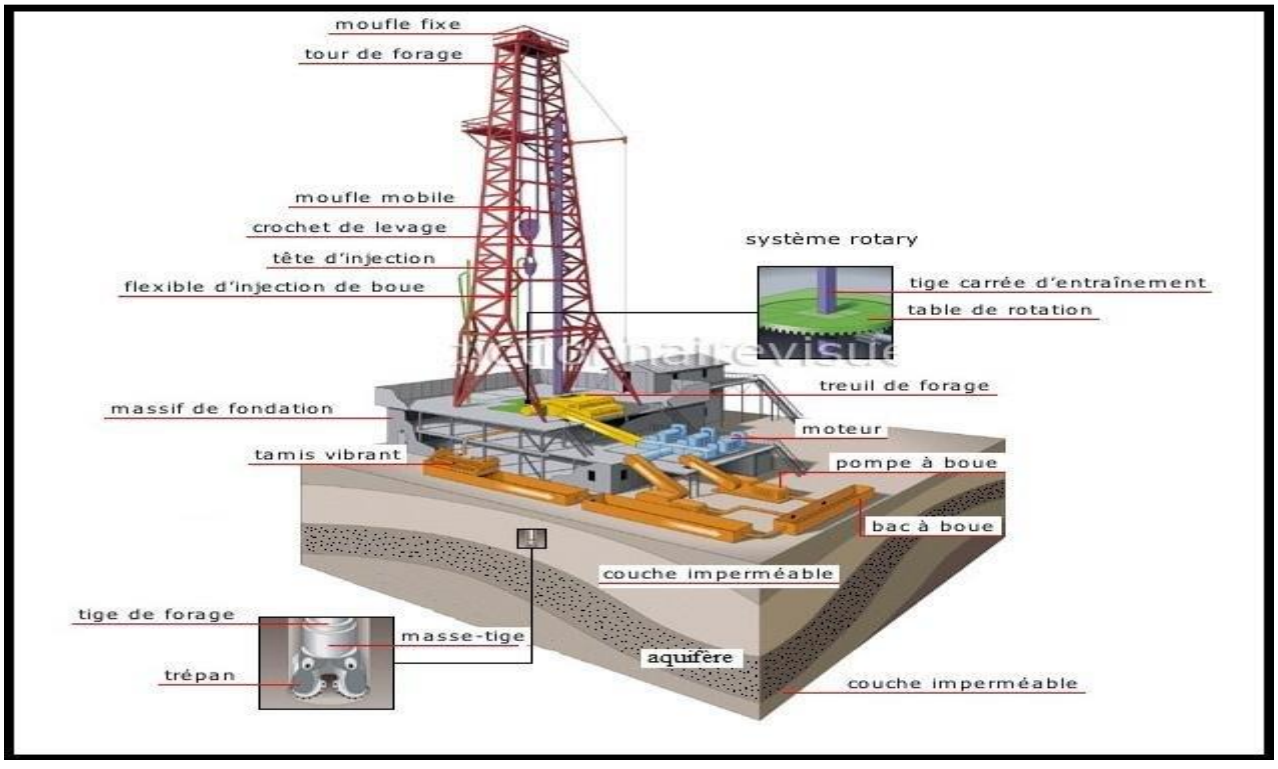


Figure II.1 : Appareil de forage.

II.4. Classification :

Deux caractéristiques étroitement liées interviennent dans la classification d'un appareil de forage :

- La capacité de profondeur de forage maximale
- La puissance au treuil

La règle du pouce donne, de manière pragmatique : « Pour 100 pieds de forage, il faut 10 HP de puissance au treuil ».[13]

D'ou :

Appareil léger	4921 foot- 6561 foot	1500m - 2000m	650 HP
Appareil moyen	11482 foot	3500m	1300 HP
Appareil lourd	19685 foot	6000m	2000 HP
Appareil super lourd	26246 foot- 32805 foot	8000m - 10000m	3000 HP

II.5. Fonction d'un appareil de forage :

Les installations de forage rotatif pour puits profonds regroupent des machines, équipements mécaniques et structures permettant de réaliser les opérations suivantes :

- Abaissement de la colonne de tiges de forage dans le puits.
- Rotation de l'outil de forage (trépan).
- Injection de fluide de forage pour remonter les déblais, refroidir le trépan et stabiliser les parois du puits.
- Allongement progressif de la colonne de tiges avec l'augmentation de la profondeur.
- Remontée de la colonne pour remplacer un outil usé.
- Gestion des déblais via le fluide de forage et préparation d'un nouveau fluide.
- Installation des colonnes de tubage. [14]

Ces opérations sont supportées par deux catégories d'équipements :

- **Équipements de fond** (garniture).
- **Équipements de surface** (installation).

A. Equipements de fond (garniture) :

C'est l'ensemble des outils de forage et garniture qui travaillent au-dessous de la surface et sont en général :

- **Le trépan :** (figure. 2) Outil principal qui, sous l'effet de la compression et de la rotation, fragmente les roches.



Figure II.2 : trépan

- **Les tiges de forage :** (figure. 3) Ce sont des tiges qui descendent le long du puits et qui transmettent le mouvement de rotation de l'outil (Trépan). Celles-ci permettent également le passage de la boue de forage.



Figure II.3 : tige de forage

- **Tiges carrées :** (figure. 4) Élément transmettant la rotation de la table de rotation au train de tiges.[5]



Figure II.4 : tige carrée

B. Equipements de surface (installation) :

C'est l'ensemble des équipements situés au-dessus de la surface, assurant les fonctions principales suivantes :

B.1. Fonction rotation :

Table de rotation :

Les tables de rotation sont conçues pour entraîner une colonne de forage suspendue verticalement ou pour absorber le couple de réaction généré par la colonne, produit par le moteur d'entraînement. Une table de rotation est constituée d'un châssis fixe qui supporte une partie mobile interne, cette dernière reposant sur le châssis via un roulement à billes principal.



Figure II.5 : Table de rotation

Caractéristiques de la table de rotation :

- ✓ Les Tables de Rotation tournent à des vitesses 40 à 500 tr/min.
- ✓ La Table de Rotation ne consomme pas beaucoup de puissance.
- ✓ Elles sont caractérisées par le diamètre de passage : 27"1/2 ; 20"1/2 ; 17"1/2 et 12"1/2.
- ✓ La capacité de la table est définie par la capacité de la butée principale.
- ✓ La puissance de la table sera ; Pu= (L/30 + 10) N/100 $\mathbf{P_d}$/D

– L : Profondeur de puits (m).

- N : Vitesse de rotation (Tr/min).

- Pd : Poids sur l'outil (tonnes).

- D : Diamètre du puits (pouces).

- Pu : Puissance de la table (chevaux).

Un carré d'entraînement, muni de rouleaux conformes à la forme de la tige d'entraînement, est monté sur la table de rotation. Ce carré est actionné par la table via une fourrure d'entraînement, permettant de transmettre à la tige à la fois le mouvement rotatif et la translation, tout en évitant les frottements latéraux et l'usure. De plus, la table de rotation peut soutenir le train de sonde à l'aide de coins de retenue lors de l'ajout d'une tige pendant les opérations.[15]

Top drive :

Le top drive est un dispositif motorisé de tête d'injection qui, outre l'injection de fluide, entraîne la rotation de la garniture de forage (voir du figure 6). [16]

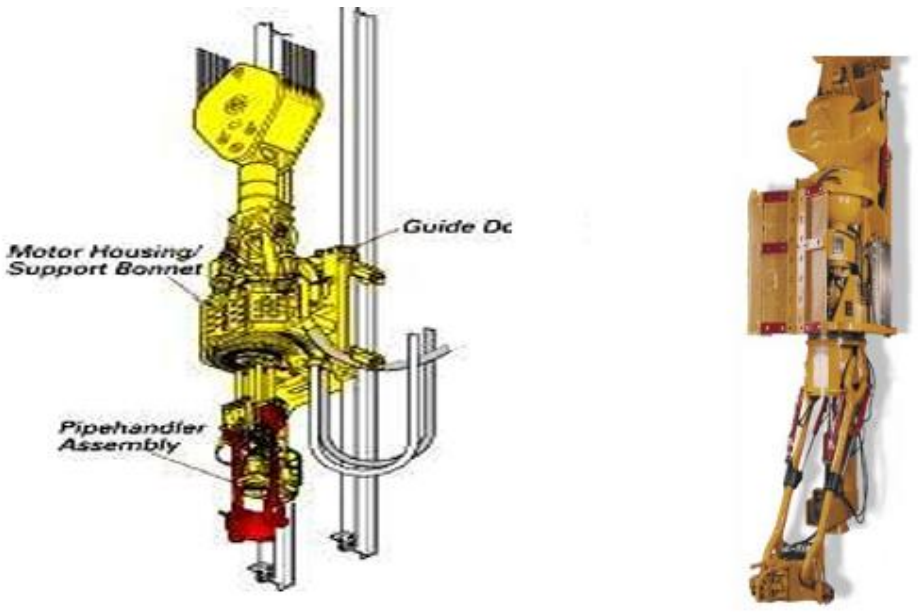


Figure II.6 : Top drive

Ainsi, la rotation de la garniture de forage est assurée par le top drive, remplaçant la tige d'entraînement et la table de rotation. Pendant le forage, ce système permet d'ajouter les tiges par sections entières plutôt qu'une par une. Le top drive offre également plusieurs fonctionnalités avancées : des bras d'élévateur actionnés hydrauliquement simplifient les tâches de l'accrocheur, une clé automatique et une coulisse intégrée sont incluses, et des rails disposés sur toute la hauteur du mât guident ses mouvements.

Tête d'injection :

C'est le composant qui est suspendu par son anse au crochet de levage. Il doit être conçu à la foi pour la charge maximale de garniture et pour la vitesse de rotation maximale.

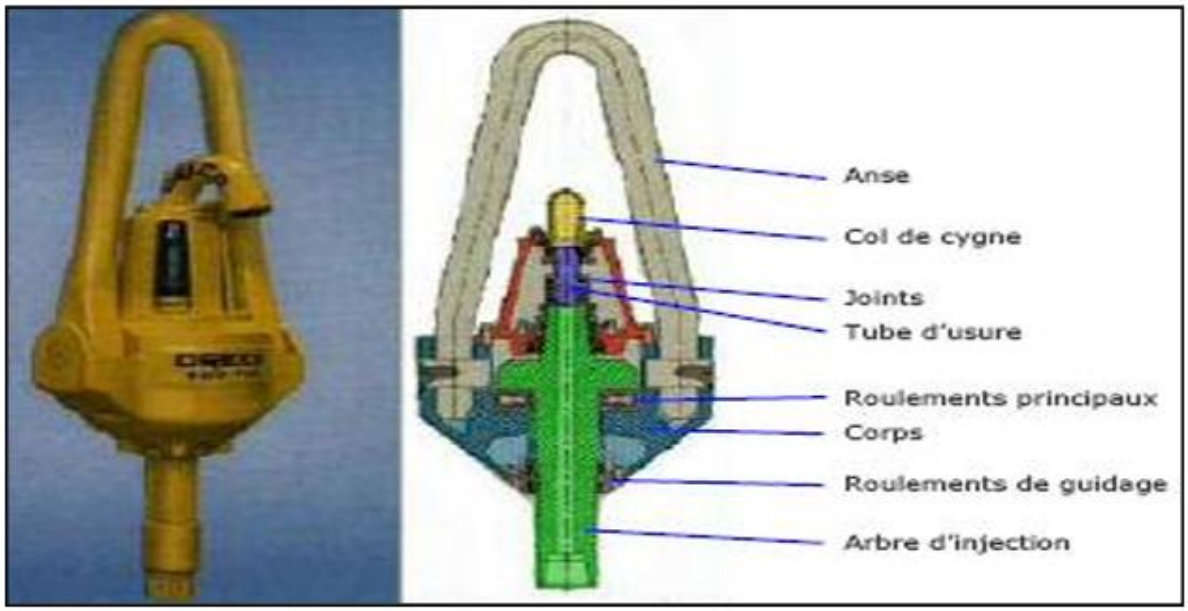
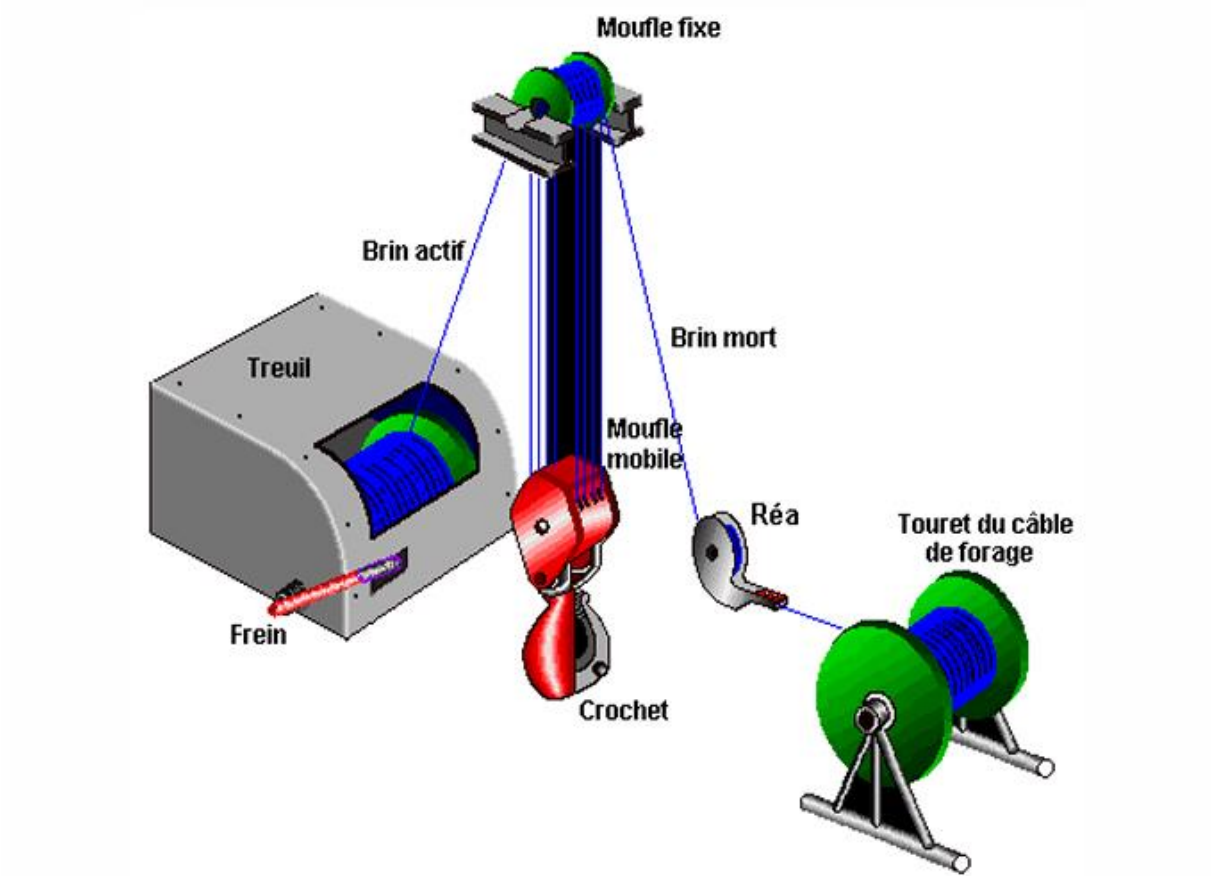


Figure II.7 : Tête d'injection. [14]

B.2. Fonction levage :

Pour soulever la garniture de forage (ensemble tiges - tiges lourdes - masse-tiges), il est nécessaire d'utiliser une grue de grande capacité, car son poids peut dépasser les 150 tonnes. [17] Cette grue se compose :

- d'un mât,
- d'un treuil,
- d'un palan comprenant les moufles fixe et mobile ainsi que le câble.



Figue II.8 : Schéma cinématique d'un mécanisme de levage.

Le mât de forage :

Le mât de forage [mats] est formé de deux montants reliés entre eux par des entretoises et des croisillons, l'ensemble reposant sur une substructure.

- **Les différents types de mât :**

Se Comprend :

- Les mâts libres
- Les mâts haubanés

- **Caractéristiques des mâts :**

a) **Hauteur** : Correspond à la distance mesurée entre le plancher et le bas de la passerelle du moufle fixe.

b) **Capacité API** : Il s'agit de la capacité maximale au crochet pour un mouflage donné, en l'absence de gerbage et de vent.

La relation entre la capacité API et la capacité au crochet est exprimée par la formule suivante:

$$Cc = (CAPI - P) \times N / (N + 3) \qquad (II,1)$$

Avec :

Cc = Capacité au crochet,

C_{API} = Capacité API

P = poids du mât + moufle fixe

N = Nombre de brins

B.3.Le Mouflage :

Le mouflage désigne l'ensemble des différentes boucles du câble de forage disposées entre le treuil et le point fixe, reliant les moufles fixe et mobile.

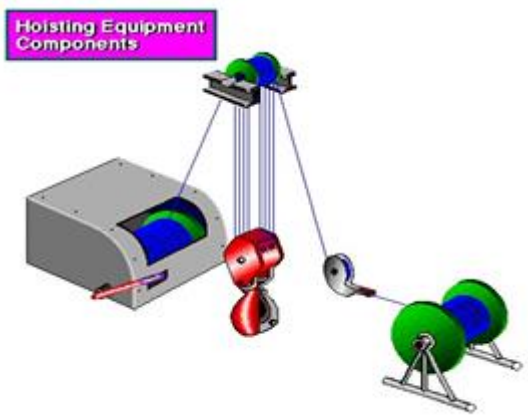


Figure. II.9 : système de mouflage. [14]

Réaliser le mouflage consiste à installer ce câble dans le mât de manière à permettre le déplacement du moufle mobile à l'aide du treuil. Les systèmes de mouflage utilisés dans les installations de forage servent à effectuer les opérations de montée et de descente, ainsi qu'à suspendre, durant le forage, les colonnes de forage et de tubage.

Le but de mouflage est :

- multiplier la charge
- Démultiplier la vitesse.

Il existe deux types de mouflage :

Le moufle fixe :

Le moufle fixe a des poulies alignées sur le même axe. Cet axe est soutenu à son extrémité par deux paliers montés sur des poutrelles fixées au sommet du mât. Il est perforé afin de permettre le graissage des différents roulements des poulies du moufle fixe.



Figure II.10 : moufle fixe.

Le moufle mobile et crochet :

Ils sont en général dits intégrés. L'ensemble des poulies et du crochet est assemblé de manière compacte. Le moufle mobile, quant à lui, comporte une poulie de moins que le moufle fixe correspondant.

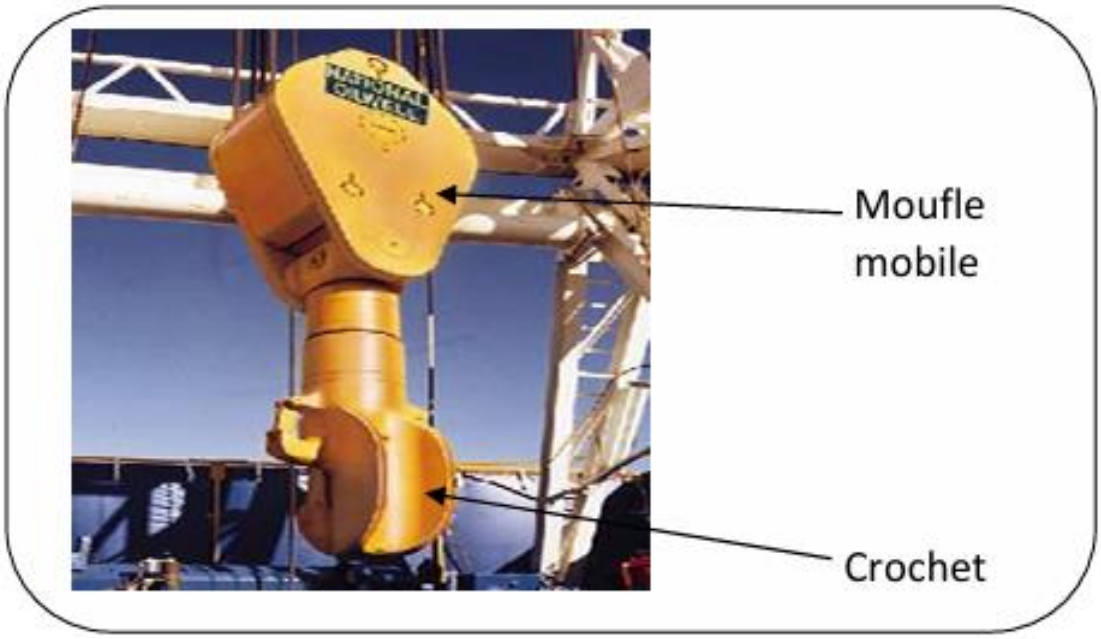


Figure II.11 : Ensemble moufle et crochet. [16]

La charge soulevée au crochet :

- **La charge qui peut être soulevée au crochet peut être calculée :**

En fonction de l'effort de traction exercé sur le brin actif : il s'agit de la force appliquée sur le câble lors des opérations de levage ou de descente, et qui influence directement la répartition des charges dans le système de mouflage.

$$F=ta.N.\eta$$

Avec :

F : Poids total au crochet (en tonnes) ;

ta : Effort de traction sur le brin actif (en tonnes)

N : Nombre de brin de mouflage

η : Rendement du mouflage

• En fonction de la puissance dépensée au moufle mobile et au crochet :

$$\mathbf{F} = \frac{\mathbf{75}.\boldsymbol{P_c}}{\mathbf{1000}.\boldsymbol{V_c}} \qquad \text{(II,2)}$$

Avec :

F : Poids total au crochet (en tonnes)

Pc : Puissance au crochet (en chevaux)

Vc : Vitesse de remontée au crochet (en m/s)

- **Rendement d'un mouflage :**

C'est le rapport entre la puissance transmise au moufle mobile (Pc) et celle fournie par le treuil.
Le rendement d'un mouflage dépend du facteur de friction K des poulies (qu'elles soient à paliers lisses ou à roulements) et du nombre de brins N. Il est exprimé par la formule suivante :

$$\boldsymbol{\eta_m} = \frac{\boldsymbol{K^N - 1}}{\boldsymbol{N(K-1).K^N}} \qquad \text{(II,3)}$$

LE TREUIL DE FORAGE :

Le treuil constitue le cœur de l'appareil de forage. Sa capacité détermine la classe des profondeurs de forage réalisables et caractérise ainsi l'appareil de forage.

Le treuil de forage (Figure I.6) regroupe un ensemble d'éléments mécaniques et assure plusieurs fonctions essentielles :

- Les manœuvres de levage, c'est-à-dire la remontée et la descente du train de sonde à des vitesses élevées et en toute sécurité — c'est sa fonction principale.
- L'entraînement de la table de rotation, lorsque celle-ci ne dispose pas de son propre moteur indépendant.
- Le vissage et le dévissage du train de sonde, ainsi que les opérations de curage.



Figure II.12 : Le Treuil De Forage. [16]

❖ Différentes parties mécaniques de treuil :

- Le tambour de manœuvre
- Boîte de vitesse
- Le frein principal
- Le frein auxiliaire
- Le frein électromagnétique

C. Fonction Pompage :

C.1. Pompe de forage :

Ce sont des pompes alternatives à pistons, le mouvement alternatif des pistons étant produit par le système classique de la bielle et d'un vilebrequin. Ces pompes, de principe volumétrique, doivent fournir un débit adapté au rendement optimal du trépan utilisé.



Figure II.13 : Les pompes de forage. [17]

D. Fonction de sécurité :

Lors du forage des puits dans des gisements où l'on suppose une pression élevée des couches, la tête de puits est équipée de dispositifs d'étanchéité de sécurité, appelés obturateurs de sécurité (B.O.P), afin de prévenir toute éruption de gaz ou de pétrole.

D.1. L'installation de l'obturateur de sécurité :

D.1.1. L'obturateur de sécurité :

Il est monté sur la bride d'une colonne intermédiaire, descendue avant le début des opérations de forage. L'éruption de gaz et d'huile peut commencer très vite et se dérouler d'une manière bien intense, ce qui peut finir par la perte du puits et de l'équipement Grâce aux obturateurs de sécurité, il est possible de prévenir rapidement le début d'une éruption et de réaliser les opérations nécessaires dans le puits.

D.2.1 Le système de commande :

L'ensemble de commande des obturateurs est équipé d'une pompe, d'un dispositif hydraulique d'entrainement qui maintient une pression constante, et d'un groupe hydraulique d'accumulation à diaphragme de haute pression. Pour la réalisation de ces opérations, les équipements utilisés se répartissent en deux parties essentielles :

- Equipements de fond.
- Equipements de surface

Les équipements de sécurité :

Les équipements de sécurité :

Ils assurent la sécurité du puits en cas de venue et sont constitués de :

- La tête de puits
- L'accumulateur de pression (komey)
- Le manifold de duses
- Les vannes de sécurité (Gray valve, kelly valve lower et upper, drop in checvalve,

II.6. Conclusion :

L'étude approfondie de l'appareil de forage met en lumière la complexité et la technicité de cette installation indispensable aux opérations de sondage en profondeur. Chaque composant, qu'il soit en surface ou en fond de puits, joue un rôle essentiel dans le bon déroulement des travaux, tant sur le plan technique que sécuritaire. La maîtrise de ces systèmes permet non seulement d'améliorer les performances des opérations de forage, mais aussi de garantir un haut niveau de sécurité face aux risques inhérents à ce type d'activités industrielles.

CHAPITRE 03 : Généralités sur les méthodes AMDEC et MCDM

III.1 Introduction :

L'analyse des risques et la gestion de la maintenance constituent des piliers fondamentaux pour garantir l'efficacité et la pérennité des systèmes industriels, particulièrement dans le domaine du forage où des équipements complexes et précis, tels que la machine BBURG 1500 HD, sont utilisés. Ce chapitre vise à explorer une méthodologie intégrée combinant l'AMDEC et les méthodes de prise de décision multicritères (MCDM) pour identifier, classer les modes de défaillance potentiels et optimiser les stratégies de maintenance. Il aborde la définition, l'historique et les avantages de l'AMDEC, ainsi que les étapes de son application, en mettant l'accent sur son intégration avec des méthodes MCDM comme TOPSIS, VIKOR et CRITIC pour une évaluation objective et précise des risques. Le chapitre examine également l'application de cette approche hybride à la machine de forage mentionnée, dans le but d'améliorer sa fiabilité et de réduire les arrêts non planifiés. À travers cette analyse, nous cherchons à proposer un cadre pratique qui soutient une prise de décision efficace en matière de maintenance, contribuant ainsi à l'amélioration des performances opérationnelles et à la réduction des coûts.

III.2. AMDEC :

III.2.1. Définition de l'AMDEC :

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) est une technique d'analyse prévisionnelle de déterminer l'emplacement de la défaillance et la fiabilité, de la maintenabilité et de la sécurité des produits et des équipements.

D'après (AFNOR) L'analyse des modes de défaillance de leurs effets et de leur criticités (AMDEC) est une méthode inductive permettant pour chaque composant d'un système, de recenser son mode de défaillance et son effet sur le fonctionnement ou sur la sécurité du système.[19]

III.2.2. Historique de l'AMDEC :

Années 1950 :	La méthode FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) est introduite aux États-Unis dans le domaine des armes nucléaires.
Années 1960 :	Cette méthode est mise en application en France sous le nom d'AMDEC pour les programmes spatiaux et aéronautiques.
Années 1970 :	Son application est étendue aux domaines du nucléaire civil, des transports terrestres et des grands travaux.
Années 1980 :	L'AMDEC est appliquée aux industries de produits et de biens d'équipement de production.

Tableau. III.1: Historique de l'AMDEC. [1]

III.2.3. Les avantages de l'AMDEC :

• Identification des risques

• Amélioration de la qualité des produits ou processus.

• Réduction des coûts

• Amélioration de la sécurité

• Communication efficace

III.2.4. Le principe d'AMDEC :

L'AMDEC consiste à recenser et structurer les défaillances potentielles ainsi que leurs impacts lors de la conception d'un produit ou de la mise en place d'un processus. Elle ne se limite pas à une approche préventive, mais complète l'AMDE en intégrant la notion de criticité. Cette dernière est un facteur clé pour enrichir l'analyse des risques, servant d'outil d'aide à la prise de décision.[20]

III.2.5. Types d'AMDEC :

- L'AMDEC-organisation :

Cette méthode s'applique à divers niveaux des processus d'entreprise, du système global de gestion (incluant les systèmes d'information, de production, de ressources humaines, de marketing et financier) jusqu'aux tâches spécifiques d'organisation du travail.

- AMDEC produit :

Utilisée pour valider la conception d'un nouveau produit, elle permet d'identifier les défauts potentiels et leurs causes. Cette analyse facilite la mise en place d'actions correctives sur la conception et préventives pour l'industrialisation, après une priorisation des défauts.[21]

- AMDEC-process :

Elle concerne les processus de fabrication, en évaluant la criticité des défaillances potentielles d'un produit dues à son processus de production. Elle peut également s'appliquer à l'analyse des postes de travail.[22]

- L'AMDEC Moyen ou Machine :

Est Cette approche cible les équipements ou machines de production, en étudiant les modes de défaillance possibles, leurs impacts sur la qualité, la productivité et les coûts de maintenance, et en proposant des mesures préventives pour optimiser les performances.

- L'AMDEC-service :

Elle vise à garantir que la valeur ajoutée d'un service répond aux attentes des clients tout en évitant les défaillances dans le processus de prestation.[23]

- AMDEC sécurité :

Cette méthode analyse les risques liés à l'équipement pour améliorer la fiabilité et la sécurité des installations.[24]

III.2.6. Terminologie :

Il est important de les connaître parfaitement afin de comprendre précisément le fonctionnement de LAMDEC et d'en assurer la meilleure application possible.

- **Mode de défaillance :**

Manière dont un dispositif peut cesser de remplir sa fonction (ex. : blocage, rupture, fuite). Ce mode est toujours lié à la fonction du dispositif et exprimé en termes physiques.

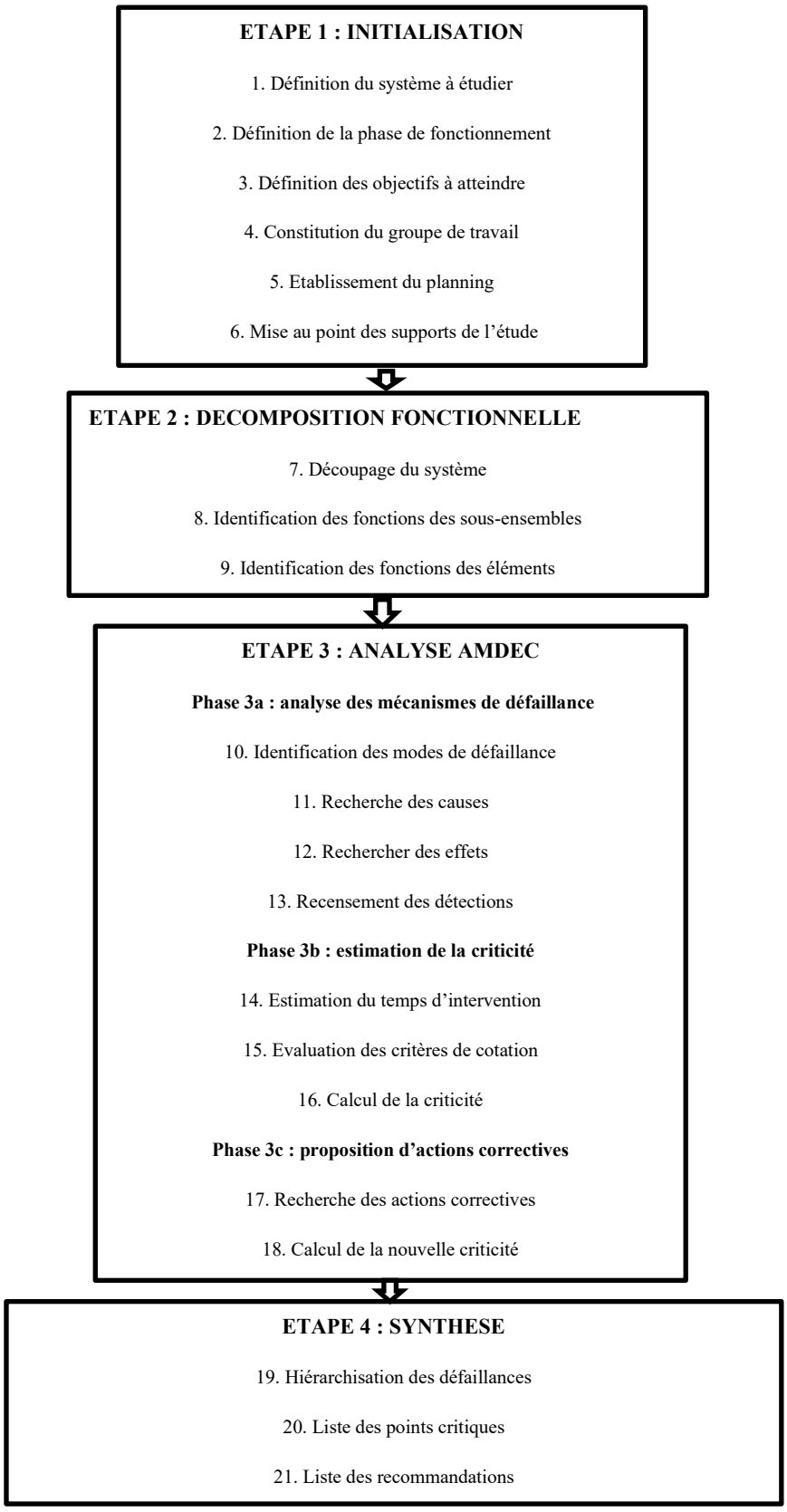
- **Défaillance** :

Arrêt total ou partiel de la capacité d'un élément à accomplir sa fonction attendue.

- **Effet de la défaillance** : Conséquence perçue par l'utilisateur, liée à la combinaison du mode et de la cause de la défaillance (ex. : arrêt de production, dégradation d'équipement, pollution).
- **Criticité** : Évaluation quantitative du risque d'un scénario de défaillance, basée sur trois critères :
    - La fréquence d'apparition du mode de défaillance.
    - La gravité des conséquences.
    - La probabilité de détection du problème avant qu'il ne survienne.

III.2.7. Les étapes de AMDEC :

L'AMDEC se déroule en quatre phases principales : l'initialisation, la décomposition fonctionnelle, l'analyse proprement dite et la synthèse (voir figure 01).



Organigramme III.1: Démarche pratique de l'AMDEC machine.[1]

III.2.8. Caractéristiques essentielles de l'AMDEC :

L'AMDEC est une méthode inverse de celle mise en œuvre pour la conception, puisqu'elle est réalisée pour analyser comment un dispositif conçu peut être amené à ne pas fonctionner et quelles seront les conséquences de ses dysfonctionnements sur le dispositif de production, le produit fabriqué et la sécurité des personnes et des biens.

L'AMDEC est une méthode d'analyse inductive rigoureuse qui permet une recherche systématique :

Les modes de défaillance d'un moyen de production.

- des causes de défaillance générant les modes de défaillance.
- des conséquences des défaillances sur le moyen de production.
-des moyens de détection pour la prévention et / ou la correction des défaillances.[25]

III.2.9. But d'AMDEC :

L'AMDEC est une technique qui conduit à l'examen critique de la conception dans un but d'évaluer et de garantir la sûreté de fonctionnement (sécurité, fiabilité, maintenabilité et disponibilité) d'un moyen de production.

L'AMDEC va permettre d'atteindre ces objectifs en traitant systématiquement les paramètres suivants.

- Recensement et définition des fonctions :

- du moyen de production.
- des sous-systèmes.
- des composants.

- Analyse des défaillances par :

- le recensement des modes de défaillance.
- l'identification des causes de défaillance.
- l'évaluation des risques.
- la recherche des modes de détection.

- Hiérarchisation des défaillances avec la cotation de la criticité :

Elle permet d'estimer, pour chaque défaillance, trois critères de définition :

- La fréquence d'apparition de la défaillance (indice F).
- La gravité des conséquences que la défaillance génère (indice G).
- La non détection de l'apparition de la défaillance, avant que cette dernière ne produise les conséquences non désirées (indice D).

-L'indice de criticité :

Priorisant les défaillances grâce à l'indice de criticité, calculé par la formule :

$$C = F \times G \times D \qquad \text{(III,1)}$$

C : criticité

F : indice de fréquence

G : indice de gravite

D : indice de non détection

• La fréquence :

La fréquence et la probabilité de la défaillance doit être estimer soit à l'aide du retour d'espérance prévenant d'industries similaire ou par jugement d'expert, suivant les secteurs industriels des échelles de fréquence comportant de 5 a plus de 10 niveaux à valeur numériques ou symboliques ont été établis, en générale pour un indice numérique, on le note F.

le note F.

Indice de fréquence F	
Valeur de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance pratiquement inexistante sur des installations similaires en exploitation, au plus un défaut sur la durée de vie de l'installation.
2	Défaillance rarement apparue sur de la matérielle similaire existante en exploitation (défaut par an).
3	Défaillance occasionnellement apparue sur du matériel similaire existante en exploitation (un défaut par trimestre).
4	Défaillance fréquemment apparue sur un composant connu ou sur du matériel similaire existant en exploitation (un défaut par mois)

Tableau III.2 : L'indice de fréquence F.

• La gravité :

La gravité des conséquences de la défaillance est souvent évaluée à l'aide d'un indice de gravité également spécifique à chaque secteur industriel pour la maintenance basée sur la fiabilité, il sert

Indice de gravité G	
Valeurs de G	Gravité de la défaillance
1	Défaillance mineure : aucune dégradation notable du matériel (TI < 10min).
2	Défaillance moyenne nécessitant une remise en état de courte durée (10 min < TI < 30 min).
3	Défaillance majeure nécessitant une intervention de longue durée (30min<TI < 90 min).
4	Défaillance catastrophique très critique nécessitant une grande intervention (TI > 90 min).
5	Sécurité/Qualité : accident pouvant provoquer des problèmes de sécurité des personnes, lors du dysfonctionnement ou lors de l'intervention.

Tableau III.3 : Indice de gravité G.

• Indice de détection :

L'indice de détection D est un jugement qualitatif destine à quantifier la probabilité que la défaillance soit détectée par l'utilisateur final.

Indice de non détection D	
Valeurs de D	Non détection de la défaillance
1	Les dispositions prises assurent une détection totale de la cause initiale ou du mode de défaillance, permettant ainsi d'éviter l'effet le plus grave provoqué par la défaillance pendant la production.
2	Il existe un signe avant-coureur de la défaillance mais il y a risque que ce signe ne soit pas perçu par l'opérateur. La détection est exploitable.
3	La cause et/ou le mode de défaillance sont difficilement décelables ou les éléments de détection sont peu exploitables. La détection est faible.
4	Rien ne permet de détecter la défaillance avant que l'effet ne se produise : il s'agit du cas sans détection.

Tableau III.4 : Indice de non détection D.

III.2.10. Mise en place des plans d'actions :

L'objectif principal de l'analyse AMDEC, après avoir identifié et priorisé les défaillances critiques, est de concevoir un plan pour résoudre les problèmes détectés. Les mesures mises en œuvre se divisent en trois catégories :

¬ **Actions préventives :** Ces actions visent à anticiper les défaillances pour les empêcher de se produire. Elles nécessitent une planification rigoureuse,[26] déterminée en fonction de la fréquence estimée des défaillances.

¬ **Actions correctives :** Lorsqu'une défaillance est jugée non critique, une intervention rapide est effectuée au moment de son apparition, afin de rétablir la conformité dans les plus brefs délais.

¬ **Actions amélioratrices :** Ces actions impliquent des modifications des processus ou des technologies utilisées dans le moyen de production, dans le but d'éliminer définitivement la défaillance. Leur coût élevé en fait un investissement stratégique.

Pour garantir leur efficacité, ces actions doivent être suivies de près à travers un plan structuré, incluant : la désignation d'un responsable, la fixation d'un délai, l'estimation d'un budget, ainsi qu'une réévaluation après la mise en œuvre pour analyser les résultats. Cette réévaluation repose sur le calcul d'un nouvel indice de criticité, en tenant compte des mesures préventives, correctives ou d'amélioration appliquées. Ce nouvel indice, souvent appelé « risque résiduel », doit être inférieur à l'indice initial, ce qui permet de mesurer l'efficacité des actions entreprises.

III.2.11. Présentation des résultats :

Après avoir effectué la dernière évaluation, un rapport est établi sous la forme d'un tableau AMDEC, regroupant l'ensemble des données précédemment collectées. Ce tableau de synthèse doit inclure diverses informations, telles que les mesures correctives et préventives associées à chaque mode de défaillance identifié, ainsi que les responsables désignés pour chaque action à entreprendre.

<table>
<tr><td rowspan="2">AMDEC</td><td colspan="6">ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE</td><td rowspan="2">AMDEC MACHIN E</td></tr>
<tr><td colspan="2">SYSTEME.....
SOUS-SYSTEME.....</td><td colspan="2">PHASE DE FONCTIONNEMENT :
……</td><td colspan="2">DATE DE L'ANALYSE :
……</td></tr>
<tr><td rowspan="2">ELEMENT</td><td rowspan="2">Fonction</td><td rowspan="2">Mode de défaillance</td><td rowspan="2">Cause</td><td rowspan="2">Effet</td><td rowspan="2">Détection</td><td colspan="4">Criticité</td><td rowspan="2">Action corrective</td></tr>
<tr><td>F</td><td>G</td><td>N</td><td>C</td></tr>
</table>

Tableau III.5 : Contenu d'un tableau d'AMDEC. [27]

III.3. Méthode MCDM :

III.3.1. Définition MCDM :

La prise de décision multicritères (MCDM) est une approche qui soutient les décideurs dans la sélection de la meilleure option parmi plusieurs alternatives, en s'appuyant sur diverses méthodes pour résoudre des processus décisionnels complexes. Elle intègre des techniques telles que FUZZY AHP, BWM, DEMATEL, TOPSIS et SAW pour analyser et évaluer les choix possibles. [28]

III.3.2. Historique de l'aide à la décision :

L'origine de l'aide à la décision comme détaillée par Alexis Tsoukiàs dans [29] peut être située dans la période d'avant deuxième guerre mondiale ; elle se trouve dans les études menées par l'armée britannique dans le cadre de l'installation des systèmes radar et les efforts de décodage du code secret des communications allemandes (1936-37). En 1951, Arrow [30] publie son célèbre théorème d'impossibilité montrant que l'agrégation des préférences d'individus rationnels, sous des conditions

réputées naturelles (universalité, indépendance, respect de l'unanimité, non existence de dictateur), est impossible (si le résultat doit être un ordre complet). Ce théorème, qui, d'une part, va conclure la discussion ouverte avec les contributions de Borda et Condorcet au XVIIIème siècle Au début des années 60 paraît le célèbre papier de Zadeh [31] sur les ensembles flous ; celui-ci va introduire une nouvelle perspective dans le traitement de l'incertitude, de l'ambiguïté et des variables linguistiques.

Nous pouvons conclure l'histoire en remarquant qu'à la fin des années 60, début des années 70 ; la recherche opérationnelle et la théorie de la décision se trouvent à un point de fort développement tant du point de vue scientifique que professionnel.

III.3.3. Objectif de l'aide à la décision :

L'aide à la décision ne vise pas à remplacer le décideur, mais à lui fournir des informations claires et pertinentes pour comprendre les enjeux, explorer les solutions possibles et évaluer les conséquences de chaque alternative. L'objectif n'est pas d'atteindre une décision optimale, mais de parvenir à une décision satisfaisante, adaptée aux besoins du contexte.[32]

III.3.4. Classification des méthodes :

Les méthodes multicritères peuvent être classées en fonction des informations qu'elles permettent d'extraire. Le choix de la méthode appropriée est crucial pour traiter efficacement le problème décisionnel. On distingue trois grandes catégories :

✓ Les méthodes d'agrégations.

✓ La méthode interactive.

✓ Les méthodes de sur classement.

III.3.4.1 Méthodes d'agrégation :

Une fois les actions potentielles et les critères d'évaluation définis, chaque action est évaluée par rapport à chaque critère. Ces évaluations sont ensuite combinées pour identifier l'option la plus avantageuse globalement, en tenant compte de l'ensemble des critères.[33]

Définition :

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

$$\mathbf{Max}\ \{g_1(x), g_2(x), \ldots. g_j(x), \ldots, g_k(x)/x \in A\} \qquad \text{(III,2)}$$

Le problème uni critère suivant :

$$\mathbf{Max}\{\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x})/\boldsymbol{x} \in \boldsymbol{A}\} \qquad \text{(III,3)}$$

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

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{U}\ [\ \boldsymbol{g_1}(\boldsymbol{x}), \boldsymbol{g_2}\ (\boldsymbol{x})\ldots\ldots, \boldsymbol{g_j}(\boldsymbol{x}), \ldots.., \boldsymbol{g_k}(\boldsymbol{x})\ ] \qquad \text{(III,4)}$$

Et agrège les k critères en un critère unique de synthèse [33].

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

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) = \sum_{j=1}^{k} \boldsymbol{\lambda j}\ \boldsymbol{gj}(\boldsymbol{x}) \qquad \text{(III,5)}$$

Où les coefficients λ représentent les pondérations.

III.3.4.2 Méthodes interactives :

Définition :

Une méthode interactive est un processus itératif comprenant plusieurs cycles. Chaque cycle inclut une phase de calcul où une solution de compromis est élaborée, et une phase de décision où le décideur affine progressivement ses préférences.[33]

Première itération : phase de calcul :

Une solution de compromis est identifiée, généralement efficace, c'est-à-dire qu'aucun critère ne peut être amélioré sans dégrader un autre.

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

La solution est présentée au décideur, qui évalue ses performances sur tous les critères. Trois scénarios sont possibles :

1. Le décideur est satisfait, et le processus s'arrête.
2. Le décideur souhaite améliorer tous les critères, mais si la solution est efficace, le processus s'arrête, car la méthode ne peut plus aider.
3. Le décideur accepte une concession sur un critère spécifique pour améliorer les autres, fournissant ainsi une nouvelle information.[33]

• Deuxième itération : phase de calcul :

Une nouvelle solution est calculée en intégrant les contraintes supplémentaires.

• Deuxième itération : phase de décision :

La nouvelle solution est soumise au décideur, qui peut réagir de la même manière. Si une nouvelle concession est proposée, une troisième itération est lancée, et ainsi de suite.[33]

III.3.4.3 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 [33].

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 Schärlig Alain (1985), les méthodes de sur-classement se caractérisent par une attitude d'agrégation partielle. Nous rappelons la notion d'une relation de sur-classement [33].

III.3.5. Les méthodes d'aide à la décision multicritères MCDM :

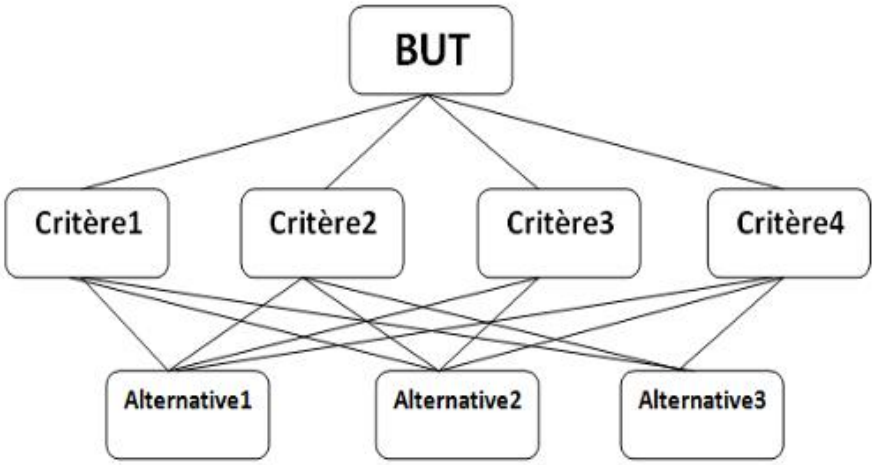
III.3.5.1 Méthode AHP :

Le processus analytique hiérarchique (AHP) est une méthode MCDM populaire, reconnue pour sa simplicité et son efficacité à structurer et résoudre des problèmes complexes. Elle décompose le problème en une hiérarchie et permet d'établir des priorités pour les critères et les alternatives. Le processus AHP comprend quatre étapes :[28]

Etape 1 : Structurer le problème dans une hiérarchie

Le problème est organisé en une hiérarchie avec l'objectif décisionnel au sommet, les critères au niveau intermédiaire, et les alternatives à la base. Des sous-critères peuvent être ajoutés pour des hiérarchies plus complexes, avec un minimum de trois niveaux.[34]

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 [34].



Organigramme III.2 : 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 par rapport 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 [34].

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**	

Tableau III.6 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans l'AHP.

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

La cohérence des matrices de comparaison est vérifiée en calculant l'indice de cohérence (CI) à l'aide de la formule :[34]

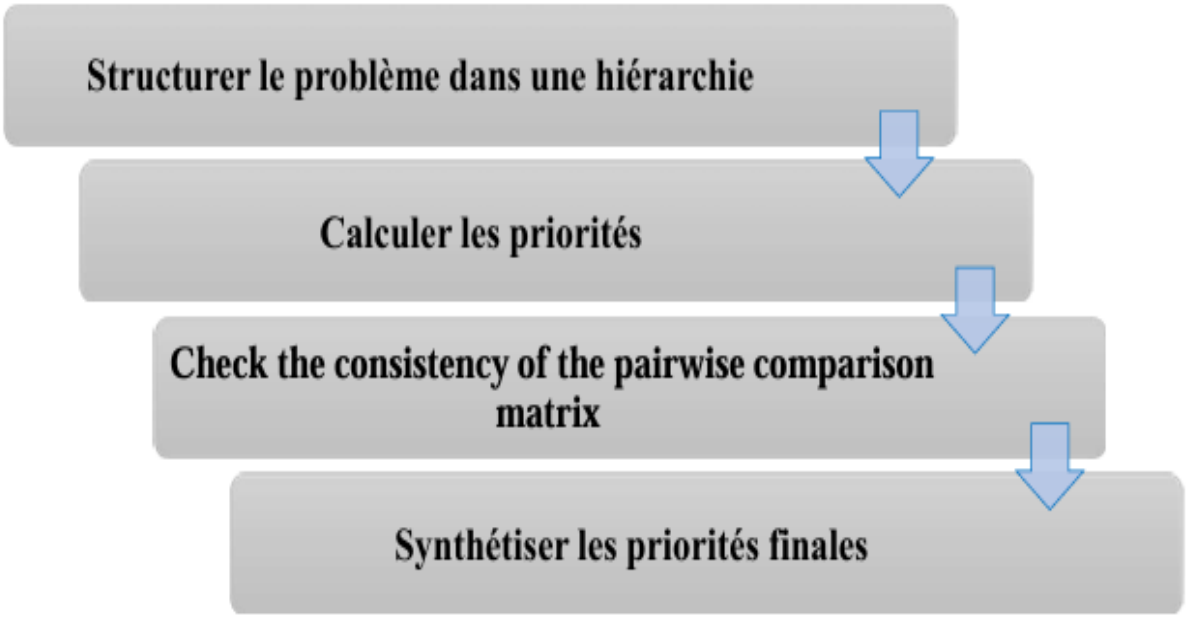
$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N_1} \qquad \text{(III,6)}$$

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^{n} \frac{(s.A)_j}{(n.A)_j} \qquad \text{(III,7)}$$

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.



Organigramme III.3 : 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[34].

III.3.5.2. La méthode FUZZY-AHP :

FUZZY-AHP intègre la logique floue pour gérer l'incertitude et les données ambiguës, particulièrement lorsque les jugements humains sont incertains. Les ensembles flous de type 2, plus complexes, permettent de modéliser cette incertitude. Les étapes sont :[35].

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 1 [35].

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)**

Tableau III.7 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP.

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

$$\boldsymbol{r_i} = (a_{il} \otimes \dots\dots \otimes\ a_{im})^{\frac{1}{n}} \forall \boldsymbol{i} \quad ,$$

$$\boldsymbol{W_i} = \boldsymbol{r_i} \otimes (\boldsymbol{r_1} \oplus \dots\dots \oplus \boldsymbol{r_n})^{-1}$$

$$\boldsymbol{U_i} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{W_i}\,, \boldsymbol{r_{ij}} \qquad \text{(III,8)}$$

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

Etape 3 : Obtention de super matrices :

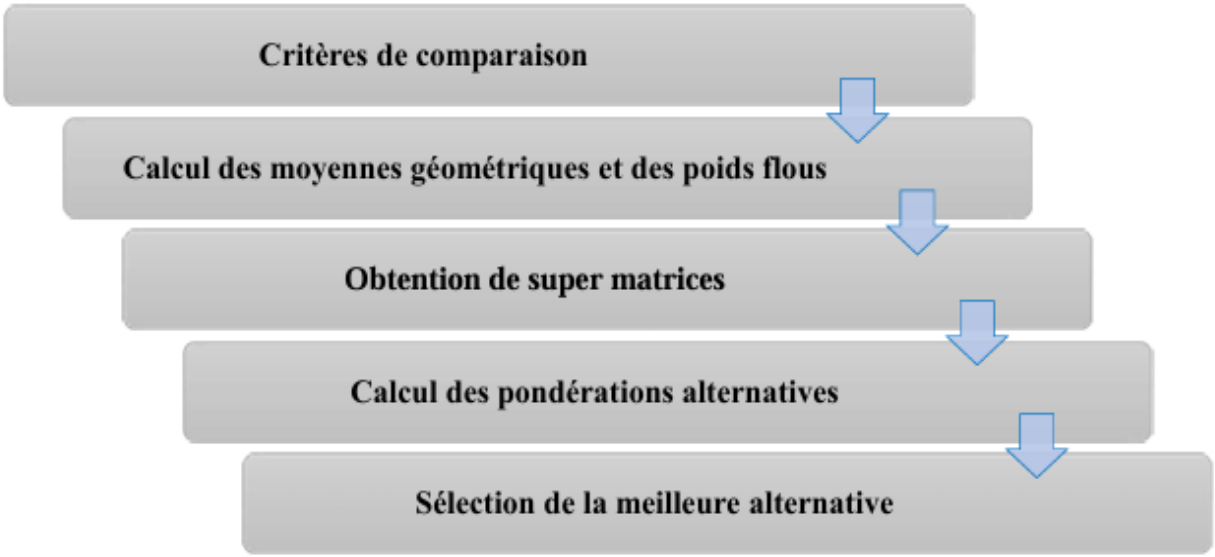
Pour obtenir des matrices non granulaires, une super-matrice non pondérée, intégrant les dépendances internes et externes ainsi que les rétroactions, est traitée à l'aide des poids calculés. Une normalisation est appliquée pour obtenir la super-matrice pondérée. L'hyper-matrice est ensuite calculée en élevant la super-matrice pondérée à la puissance 2^{k+1} où k est le très grand nombre. [35]

Etape 4 : Calcul des pondérations alternatives :

Les poids des alternatives sont déterminés en multipliant les poids des critères principaux, des sous-critères, des limites et des alternatives, établis par un expert. Une normalisation est également effectuée pour tous les critères.[35]

Etape 5 : Sélection de la meilleure alternative :

L'alternative ayant le poids le plus élevé est sélectionnée comme étant la meilleure parmi toutes les options envisagées.[35]



Organigramme III.4 : les étapes de la méthode FUZZY-AHP.

III.3.5.3. Best and Worst Methode (BWM) (méthode de meilleure et pire) :

La méthode BWM (Meilleure et Pire Méthode) est conçue pour répondre aux besoins du développement durable en tenant compte des dimensions naturelle, économique et sociale, tout en résolvant les contradictions. Cette méthode est particulièrement adaptée pour aider les décideurs et ingénieurs à définir leurs objectifs et environnements de travail. Elle évalue plusieurs alternatives par rapport à divers critères pour identifier la meilleure option dans un cadre MCDM. Les critères les plus et les moins importants (meilleur et pire) sont comparés aux autres critères pour déterminer leurs poids respectifs, selon les étapes suivantes :[37]

Etape 1 : les critères d'évaluation sont identifiés :

Un ensemble de $\boldsymbol{n}$ critères d'évaluation est défini avec la contribution d'un groupe de décideurs, qui sélectionnent ensuite le meilleur et le pire critère.

Etape 2 : le meilleur critère et le pire critère :

Le meilleur critère et le pire critère sont évalués pour d'autres critères, e degré d'importance est donné par un nombre entre 1 et 9. La matrice résultant est présentée dans l'Eq. (1.8) et éq. (I.9) respectivement :

$$\boldsymbol{AB} = (\boldsymbol{AB_1}, \boldsymbol{AB_2}, \ldots., \boldsymbol{AB_n}) \qquad \text{(III,9)}$$

$$\boldsymbol{AW} = (\boldsymbol{AB_W}, \boldsymbol{AB_W}, \ldots., \boldsymbol{An_W})^T \qquad \text{(III,10)}$$

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

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

Tableau III.8 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans BWM.

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

Cette étape consiste à calculer les poids optimaux des critères. La méthode propose deux approches : un modèle non linéaire, où les poids sont exprimés sous forme d'intervalles et le poids optimal correspond au centre de cet intervalle, et un modèle linéaire, utilisé dans cette étude, qui fournit une solution unique sans nécessiter de calcul de rapport de cohérence, contrairement au modèle non linéaire.

Le modèle linéaire génère une solution unique pour les poids optimaux (w*1, w*2, ..., w*n), Un indice de cohérence, noté ξ* est calculé, une valeur proche de zéro indiquant une forte cohérence du modèle. Les contraintes du modèle linéaire sont définies comme suit :

$$(\boldsymbol{W_B - ab_j W_j}) \leq \boldsymbol{\xi *} \ \boldsymbol{pour\ tous j}$$

$$(\boldsymbol{W_B - ab_j W_j}) \leq \xi * \ \boldsymbol{pour\ tous j}$$

$$\boldsymbol{\sum_j W_j = 1}$$

$$\boldsymbol{W_j \geq 0\ pour\ tous j} \qquad \text{(III,11)}$$

Pour appliquer la méthode BWM à l'évaluation de sites, comme pour l'implantation de centrales solaires (CSP), un calcul raster est effectué dans ArcGIS. L'indice de priorité global (OPI) est calculé pour chaque cellule de la zone étudiée à l'aide de l'équation :

$$\boldsymbol{OPL_i = \sum_{i=1}^{N} S_{ij} * W_i} \qquad \textbf{(III,12)}$$

Où

$\boldsymbol{OPIi}$ représente l'indice de priorité global pour la cellule $\boldsymbol{i}$,

$\boldsymbol{W_j}$ est le poids attribué au critère j obtenu via AHP ou BWM,

Sij est la note de la cellule i pour le critère j,

n est le nombre total de critères.

Les résultats sont représentés sous forme de carte raster, facilitant l'analyse spatiale. [36]



Organigramme III.5: les étapes de la méthode BWM.

III.3.5.4 Méthode DEMATAL :

La méthode DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) repose sur la théorie des graphes. Son principe fondamental est d'identifier la meilleure alternative en fonction de sa proximité à la solution idéale et de son éloignement de la solution anti-idéale. Très efficace pour analyser et structurer les relations de cause à effet au sein de modèles complexes, cette méthode est particulièrement répandue au Japon.

Pour appliquer la méthode DEMATEL dans un processus décisionnel, les étapes suivantes sont suivies :[37]

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) [37].

Définition	Valeur numérique
Aucun effet	**0**
Effet faible	**1**
Effet moyen	**2**
Effet élevé	**3**
Effet très élevé	**4**

Tableau III.9 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans DEMATAL.

Etape 2 : Créer une matrice :

Chaque expert élabore une matrice n x n. représentant les interactions entre les facteurs. Les valeurs de cette matrice reflètent l'intensité des relations, avec des éléments diagonaux i = j, fixés à 0.

Si (m) experts participent, une matrice moyenne $\boldsymbol{Z} = [\boldsymbol{Z_{ij}}]\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{n}$ (1) est calculée en prenant la moyenne des matrices directes des experts :[37]

$$\boldsymbol{Z_{ij}} = (\boldsymbol{a_{ij}}(\mathbf{1}) + \boldsymbol{a_{ij}}(\mathbf{2}) + \cdots + \boldsymbol{a_{ij}}\ (\boldsymbol{k}) + \cdots + \boldsymbol{a_{ij}}\ (\boldsymbol{m})) \qquad \text{(III,13)}$$

Etape 3 : Calculer la matrice de relation directe normalisée :

Une matrice normalisée $\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{X_{ij}}]\ \boldsymbol{n}\times\boldsymbol{n}$ avec $\mathbf{0} \leq \boldsymbol{X_{ij}} \leq \mathbf{1}$. est obtenue en divisant la matrice (Z) par la somme maximale des lignes :[37]

$$\mathbf{S}=\frac{\boldsymbol{Z}}{\boldsymbol{max}_{\mathbf{1}\leq \boldsymbol{i}\leq \boldsymbol{n}} \sum_{\boldsymbol{j}=\mathbf{1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{Z_{ij}}} \qquad \text{(III,14)}$$

$$\mathbf{1} \leq \boldsymbol{i} \leq \boldsymbol{n} \text{ Et } \mathbf{1} \leq \boldsymbol{j} \leq \boldsymbol{n} \qquad \text{(III,15)}$$

Les éléments diagonaux restent égaux à 0.

Etape 4 : Dérivez la matrice

Dérivez la matrice de relation totale T. La relation totale matrice T peut être obtenue en utilisant l'équation (4), où I est noté comme l'identité matrice :

$$T = (t_{ij})_{n\times n} = X(1-X)^{-1} \qquad \text{(III,16)}$$

La somme des lignes et la somme des colonnes sont notées séparément R et C dans la relation totale matrice $\boldsymbol{T}$ [37].

Etape 5 :

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

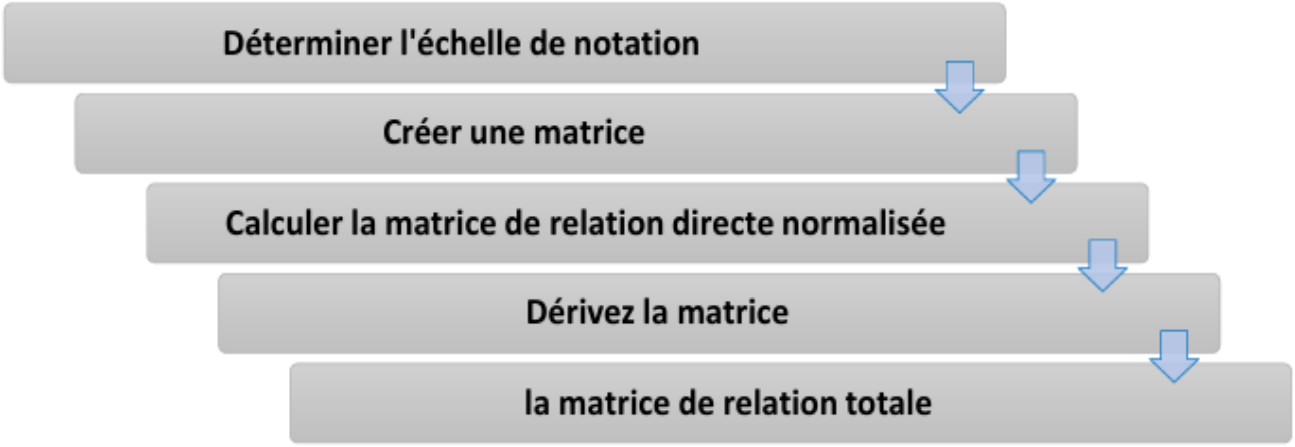
$$\mathrm{D}=\sum_{j=1}^{n} t_{ij} \qquad \text{(III,17)}$$

$$\mathrm{R}=\sum_{i=1}^{n} t_{ij} \qquad \text{(III,18)}$$

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 [37].

Etape 6 :

Les valeurs R+***D*** Et ***R*−*D*** sont calculées à partir de ***R*** et***D***. Si ***R*−*D*** > 0, le facteur est considéré comme une cause ; si ***R*** − ***D*** < 0, il est considéré comme un effet. Les facteurs avec des valeurs élevées de ***R*** − ***D*** exercent une plus grande influence et sont prioritaires, tandis que ceux avec des valeurs faibles de **(R - D)** sont moins prioritaires. De plus, une valeur élevée de **(R + D)** indique une importance globale élevée du facteur dans le système, tandis qu'une valeur faible indique une importance moindre.[37]



Organigramme III.6 : les étapes de la méthode Dematal.

III.3.5.5 Méthode TOPSIS :

Hwange et Yoon ont développé une technique pour résoudre le MCDM connue sous le nom de méthode TOPSIS. Pour prendre en charge la distance euclidienne la plus courte, ils ont proposé le PIS et le NIS et chaque critère doit être maximisé ou minimisé. Ils ont affirmé que la méthode TOPSIS aide à classer les alternatives de proximité basées sur la solution idéale optimale et a obtenu le niveau maximum à partir des alternatives disponibles. La meilleure alternative a le rang un et les pires approches alternatives le rang zéro. Pour chaque alternative, il existe un classement intermédiaire entre les meilleurs extrêmes de réponse. Un ensemble identique de critères de choix permet une pondération correcte de la maladie relative et, par conséquent, la maladie optimale est alarmante et nécessite une attention particulière. Voici les étapes de la technique TOPSIS. TOPSIS considère un problème MCDM avec m-alternatives comme un système géométrique avec m points dans l'espace à n dimensions Le concept de base de cette technique est que l'alternative choisie doit avoir la plus petite

distance géométrique du PIS et la plus grande distance géométrique du NIS Pour appliquer TOPSIS, une hypothèse courante est que les critères doivent être soit croissants soit décroissants de manière monotone afin que PIS et NIS puissent être facilement identifiés [38].

Le processus TOPSIS génère d'abord la matrice de décision $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{a_{ij}})\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ calcule ensuite la matrice mise à l'échelle $\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{r_{ij}})\ \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ et la matrice pondérée La matrice normalisée $\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{t_{ij}})\ \boldsymbol{m}\times\boldsymbol{n}$ 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 [39].

Etape 1 : La matrice de décision est générée :

La matrice de décision est générée sous la forme $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{X_{ij}})\ \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ qui contient m alternatives, notés $\boldsymbol{d_1}$, $\boldsymbol{d_2}$,… $\boldsymbol{d_m}$ et n critères, notés $\boldsymbol{C_1}$, $\boldsymbol{C_2}$, ...,$\boldsymbol{C_n}$, avec la performance de chaque alternative sur un critère donné comme $\boldsymbol{X_{ij}}$.

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 :

$$\boldsymbol{X'}=\boldsymbol{L_{ij}}=\frac{\boldsymbol{X_{ij}}}{\sqrt{\sum \mathbf{X^2}}}\ \mathbf{i= 1,2}\ldots.,\mathbf{m},\ \mathbf{j = 1,2},\ldots.,\mathbf{n} \qquad \text{(III,19)}$$

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.

$$\boldsymbol{V = V_{ij} = W_i * L_{ij}} \qquad \text{(III,20)}$$

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 :

$$\boldsymbol{NIS} = I^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots \dots V_m^-\} \quad ; \quad \text{ou} \qquad \text{(III,21)}$$

$$V_i^- = \{(\mathbf{min}\left(\boldsymbol{V_{ij}^-}\right) \boldsymbol{if}\ \boldsymbol{m} \in \boldsymbol{J}); (\boldsymbol{maxi}\left(\boldsymbol{V_{ij}^-}\right) \boldsymbol{if}\ \boldsymbol{m} \in \mathbf{J'})\} \qquad \textbf{(III,22)}$$

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.

$$\mathbf{S}\boldsymbol{i}^+ = [\sum_{i=1}^{m}(V_i^+ - V_{ij})^2]^{0.5} \qquad \textbf{, } \boldsymbol{i}\textbf{=1,2,....,m} \qquad \textbf{(III,23)}$$

$$\mathbf{S}\boldsymbol{i}^- = [\sum_{i=1}^{m}(V_i^- - V_{ij})^2]^{0.5} \qquad \textbf{, } \boldsymbol{i}\textbf{=1,2,....,m} \qquad \textbf{(III,24)}$$

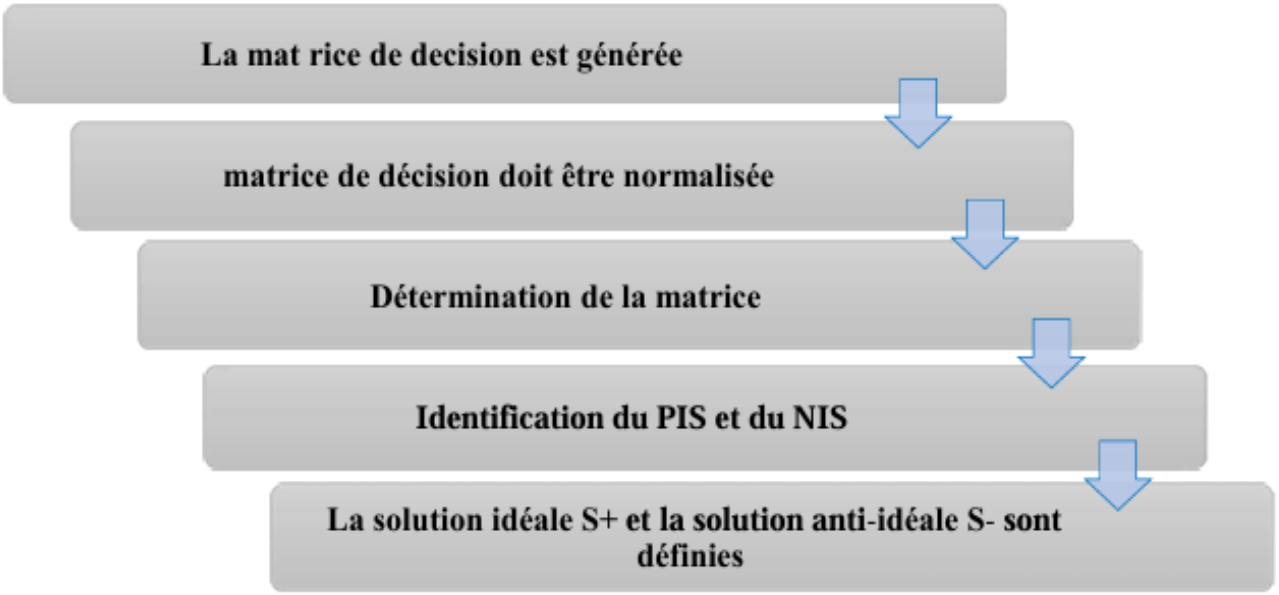
Etape 6 : La proximité relative de chaque alternative avec la solution idéale:

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

$$P_i = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad , 0 \le P_i \le 1 \qquad \text{(III,25)}$$

Etape 7 : Classement de l'ordre de préférence :

Le classement est fait sur la base des valeurs de Pi la valeur la plus élevée de la proximité relative à un rang élevé et donc la meilleure performance de l'alternative. Classer la préférence par ordre décroissant pour comparer les meilleures performances de l'alternative [38].



Organigramme III.7: Processus de la méthode TOPSIS.

III.3.5.6 SAW: Simple additive weighting Method:

La méthode SAW, l'une des approches les plus anciennes et les plus répandues, se distingue par sa simplicité et son utilisation fréquente dans la pratique. Elle repose sur le calcul de scores globaux pour chaque alternative, suivis d'un classement. Dans ce processus, les valeurs des critères et leurs poids respectifs sont combinés en une seule mesure. Les alternatives sont ensuite classées par ordre décroissant selon leurs scores. La méthode SAW constitue la base de nombreuses méthodes MADM, telles que AHP et PROMETHEE, grâce à sa propriété additive pour l'évaluation des scores finaux.[33]

Également appelée méthode de pondération additive simple ou méthode de notation linéaire pondérée, SAW est une technique de décision multi-attributs largement adoptée pour sa facilité d'application. Elle utilise une moyenne pondérée : le score de chaque alternative est obtenu en multipliant la valeur normalisée de l'alternative pour chaque critère par le poids correspondant, puis en sommant ces produits pour tous les critères. Cette transformation linéaire des données brutes garantit que l'ordre relatif des scores normalisés reste constant, ce qui représente un atout majeur de la méthode.[33]

Étape 1 :

une matrice ($\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{n}$) Une matrice (n \times n) est créée pour comparer les critères deux à deux par rapport à l'objectif, en utilisant l'échelle de Saaty pour les comparaisons par paires. Chaque critère est ainsi évalué individuellement face à chaque autre critère.[33]

Étape 2 :

Une matrice de décision ($\boldsymbol{m\ x\ n}$) est établie, représentant $\boldsymbol{m}$ alternatives évaluées selon $\boldsymbol{n}$ critères. La matrice est ensuite normalisée comme suit : [33]

Pour les critères maximisés $$\boldsymbol{X_{ij} = \frac{aij - aijmin}{ajmax - ajmin}}$$ (III,26)

Pour les critères minimisés $$\boldsymbol{X_{ij} = \frac{ajmax - aj}{= ajmax - ajmin}}$$ (III,27)

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

$\boldsymbol{aij\ min}$: la valeur minimale du critère.

$\boldsymbol{X_{ij}}$: la valeur normale.

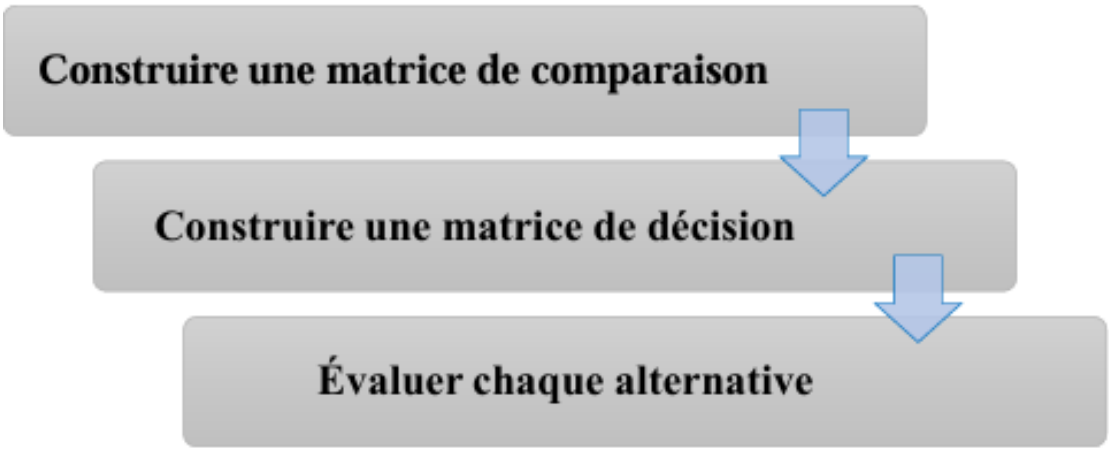
$\boldsymbol{a_{ij}}$: la valeur de la simulation

Étape 3 :

Chaque alternative, Ai est évaluée en calculant son score global à l'aide de la formule :

$$\boldsymbol{A_i = \sum wj * xij} \quad \text{(III,28)}$$

Où $\boldsymbol{xij}$ représente le score normalisé de l'alternative $\boldsymbol{i}$ pour le critère j critères, et wj correspond au poids attribué au critère (j). [33].



Organigramme III.8: les étapes de la méthode SAW.

• **Remarque :** Bien que la méthode DEMATEL soit un outil puissant pour les décideurs, elle ne convient pas pour identifier le meilleur emplacement pour une centrale solaire. Elle est principalement utilisée dans le domaine informatique, où elle excelle dans l'analyse des relations complexes.

III.3.6. Matrices multicritères :

Les matrices multicritères constituent un outil de décision collective permettant de concilier des perspectives divergentes grâce à une évaluation objective des options. Contrairement aux approches traditionnelles qui reposent sur une fonction unique, cette méthode favorise une comparaison rationnelle entre les alternatives et les critères. Les négociations se concentrent sur l'attribution des poids aux critères, évitant ainsi les interprétations subjectives des solutions.[40]

III.3.7. Étapes générales du MCDM :

Les matrices multicritères peuvent être adaptées sous forme de matrices de compatibilité, destinées à évaluer la correspondance entre options et critères. Lorsqu'un problème multicritère est posé, un processus décisionnel structuré est enclenché, comprenant trois étapes principales :

III.3.7.1. Structuration d'un problème de décision :

Cette étape consiste à organiser les actions nécessaires pour :

- Identifier les décideurs impliqués.
- Clarifier les objectifs à atteindre.
- Examiner les alternatives réalisables à évaluer.
- Définir les critères pour mesurer les conséquences de chaque alternative.

III.3.7.2. Détermination et application de la méthode :

La Le choix de la méthode MCDM doit intervenir après la structuration du problème et la vérification de son applicabilité. Cette étape inclut :

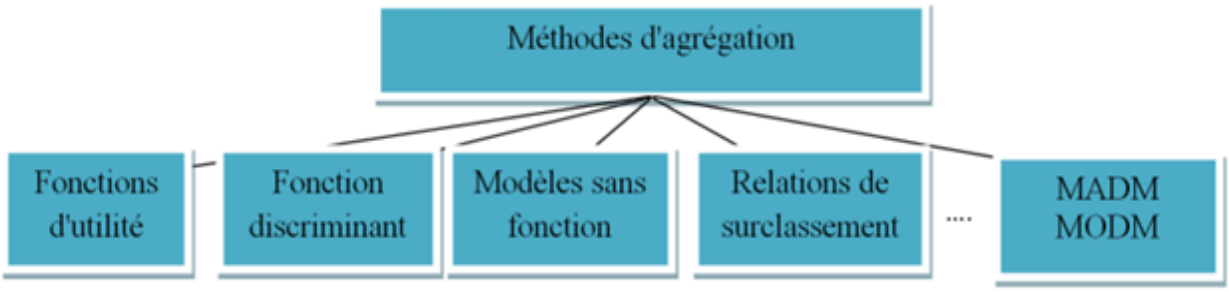
- L'attribution de poids aux critères en fonction de leur importance par rapport à l'objectif.
- L'évaluation des performances des alternatives pour chaque critère (établissement d'un tableau des performances).
- Le calcul des scores globaux pondérés pour chaque alternative.
- Le classement des alternatives en fonction de ces scores agrégés.

III.3.7.3. Détermination de la recommandation finale MCDM :

Les résultats obtenus doivent être analysés minutieusement, souvent à l'aide d'une analyse de sensibilité, pour répondre aux exigences spécifiques du choix visé.[41]

III.3.8. Catégories décisionnelles multicritères :

Le choix de l'opérateur d'agrégation est déterminant dans le processus MCDM, car chaque opérateur possède des caractéristiques propres, adaptées à différents types de problèmes et à la qualité des solutions recherchées. La sélection de l'opérateur influence directement l'efficacité de la prise de décision.[42]



Organigramme III.9 : Opérateurs d'agrégation.

III.3.8.1. Fonctions d'utilité :

La performance globale d'une alternative, évaluée à travers l'ensemble des critères, définit son utilité. Cette approche sert d'indicateur pour faciliter le classement ou le tri des alternatives dans des catégories prédéfinies, aidant ainsi à orienter la prise de décision.

III.3.8.2. Fonction discriminante :

Bien que proches des fonctions d'utilité, ces modèles ne s'appuient pas sur un système de préférences ordonnées entre les critères ou les classes décisionnelles. Ils adoptent une approche linéaire et se basent sur des critères quantitatifs, qu'ils soient intrinsèquement quantitatifs ou obtenus par la quantification de données qualitatives.

III.3.8.3. Relations de sur classement :

Lorsqu'il existe suffisamment d'arguments pour établir qu'une alternative est au moins aussi performante qu'une autre, cette méthode utilise des relations binaires pour évaluer les alternatives en fonction de leur degré de sur classement.

III.3.8.4. Approches compensatoires, non compensatoires et compensatoires partielles :

En plus du type de catégorie ci-dessus, la MCDM peut être classée en approches compensatoires, approches non compensatoires et approches compensatoires partielles. Cette approche est basée sur la faisabilité des critères négatifs sur les attributs lorsqu'ils sont compensés par des critères positifs.

III.3.8.5. Prise de décision individuelle ou en groupe :

Les méthodes MCDM peuvent être distinguées selon qu'elles impliquent un seul décideur (décision individuelle) ou plusieurs (décision collective), en fonction du nombre de parties prenantes.

III.3.8.6. Informations qualitatives/quantitatives ou certaines/incertaines :

Les méthodes MCDM peuvent également être classées selon le type d'informations utilisées :

- Qualitatives ou quantitatives.
- Certaines ou incertaines.

III.3.8.7. Méthodes basées sur des compromis et non basées sur des compromis :

De plus, les types de méthodes de pondération qui sont généralement deux types de méthodes basées sur des compromis et non basées sur des compromis sont une autre façon de distinguer les types de problèmes MCDM.

III.3.8.8. MODM ou MADM :

Selon Hwang et Yoon, les problèmes MCDM se divisent en deux grandes catégories basées sur le nombre d'alternatives :[43]

- **MODM (Multi-Objective Decision Making)** : Cette catégorie concerne les problèmes continus avec un nombre infini d'alternatives, où la solution réside dans une région réalisable définie par des contraintes.
- **MADM (Multi-Attribute Decision Making)** : Cette catégorie traite des problèmes discrets avec un nombre fini d'alternatives explicites, où la solution consiste à sélectionner une alternative parmi un ensemble prédéfini.[43]

III.3.9. Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, il apparaît clairement que l'intégration de la méthode AMDEC avec les approches MCDM représente une démarche avancée et efficace pour l'analyse des risques et l'optimisation de la gestion de la maintenance dans des systèmes industriels complexes, tels que la machine de forage BBURG 1500 HD. Grâce à l'application de méthodes comme TOPSIS, VIKOR et CRITIC, il a été possible de classer les modes de défaillance avec une grande précision, en ciblant les composants critiques tels que le système de filtration et les éléments électriques. Les résultats ont démontré que l'approche hybride proposée surpasse la méthode AMDEC conventionnelle en termes d'objectivité et de réduction des biais, permettant une priorisation plus précise des interventions de maintenance. Cette méthodologie a également conduit à des solutions pratiques, telles que le renforcement de la maintenance préventive, l'amélioration de la gestion des pièces de rechange et l'adoption de systèmes de surveillance conditionnelle. Ainsi, cette approche constitue un outil puissant pour accroître la fiabilité opérationnelle et réduire les coûts, tout en soutenant la durabilité des opérations industrielles dans un environnement compétitif. Il est recommandé d'étendre l'application de cette méthodologie à d'autres équipements à l'avenir afin de généraliser ses bénéfices et d'atteindre une efficacité accrue dans la gestion de la maintenance.

CHAPITRE 04 :

Optimisation de la maintenance du sondeuse B-BURG HD 1500D

IV.1. Introduction :

Dans un contexte industriel où la fiabilité des équipements joue un rôle crucial dans la performance globale des systèmes, il devient nécessaire d'adopter des méthodes d'analyse systématique des risques et des pannes.
Parmi les outils les plus utilisés à cet effet, figure l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité), qui permet d'identifier les défaillances potentielles d'un système, d'en analyser les effets et d'évaluer leur criticité selon trois critères fondamentaux : la fréquence d'apparition (F), la gravité des conséquences (G), et la détectabilité (D).

Cependant, l'AMDEC classique présente certaines limites, notamment dans l'appréciation subjective des critères, le manque de pondération fine entre eux, ainsi que la difficulté à prioriser les défaillances lorsqu'elles sont nombreuses et proches en termes de criticité.

Pour améliorer la qualité de l'évaluation et renforcer la prise de décision, il est judicieux d'introduire une approche multicritère structurée telle que la MCDM (Multi-Criteria Decision Making). Cette méthode permet de hiérarchiser les choix en tenant compte simultanément de plusieurs paramètres pondérés selon leur importance relative.

Ainsi, nous appliquons dans le présent chapitre une approche hybride combinant la méthode AMDEC avec la méthode MCDM, dans le but de résoudre les insuffisances rencontrées lors de l'application classique de l'AMDEC, et d'obtenir une analyse plus rigoureuse et plus objective des défaillances observées sur la foreuse BBURG 1500 HD.

IV.2Présentation générale sur la mine de Boukhadra :

IV.2.1Situation géographique :

Située dans l'Atlas saharien, à l'est de l'Algérie, la mine de Boukhadra se trouve à une altitude moyenne de 850 mètres, avec un point culminant atteignant 1463 mètres. Intégrée à la wilaya de Tébessa, elle est localisée à environ 45 km au nord-est de la ville de Tébessa, à 200 km au sud de la ville portuaire d'Annaba, et à seulement 18 km de la frontière avec la Tunisie. Une liaison ferroviaire relie Boukhadra à Annaba, facilitant le transport du minerai de fer vers le complexe sidérurgique d'El Hadjar. Le climat de la région est de type continental aride, caractérisé par des étés chauds atteignant 40 °C et des hivers froids pouvant descendre à 0 °C, avec une pluviométrie faible et de rares épisodes neigeux.

IV.2.2 Historique de la mine :

L'exploitation de la mine de boukhadra fut entamée durant l'époque romaine pour l'extraction du cuivre dans la zone **DU PIC** ; par la suite l'exploitation a porté sur le zinc et autres poly-métaux par la concession de boukhadra (mr tadro).

de 1903 à 1926, la concession de **mokta el hadid** avait entrepris des travaux de recherches systématiques par des galeries entre les niveaux 845-1225.de 1926 à 1966, date de nationalisation des mines, c'était la société de ouenza qui exploitait le gîte de boukhadra, cette dernière avait effectuée de la recherche systématique par des travaux miniers et par des sondages sur le gisement de boukhadra, durant la période de 1967 à 1984, la **sonarem** était chargée de l'exploitation et des recherches sur les gîtes ferrifères de ouenza et boukhadra.après la restructuration des entreprises (1983 - 1984), c'était **ferphos** qui gérait, exploitait et développait ces recherches sur l'ensemble des gîtes ferrifères existants sur le territoire national.depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding l.n.m.n.v. a signé l'accord de partenariat avec hadid ouenza - boukhadra filiale ferphos **avec 70%** pour la première.

IV.2.3. LES DATES IMPORTANTES :

1896: le premier permis de faire des recherches (Mont Alonzh).

1901: Mont Alonzh subvention pour Pascal, la préparation de la façon d'accorder l'exploitation minière Boukhadra.

1903: décerné à un fer à repasser organisation Boukhadra.

1923: - mettre en place un Alonzh entreprise.

1925: Société a acquis la propriété de Alonzh Boukhadra.

1930: - l'exploitation de la mine Boukhadra.

1939: L'électrification des lignes ferroviaires.

1940: l'exploitation du chemin de fer par la Société algérienne des chemins de fer.

1945: Almkcunninh intensifier le processus.

06/05/1966: la nationalisation des mines.

07/06/1983: Restructuration de la compagnie minière.

- Création de la Fondation nationale pour le fer et le phosphate de Tébessa.

1990: l'application de l'autonomie institutionnelle, qui comprenait Verwos en vertu du présent décret.

2001: privatisation et les astrologues Alonzh Boukhadra de 70% en faveur du partenaire étranger (LNM Ispat), maintenant (Métal) et 30% en faveur de Verwos.

IV.3. Gisement primaire :

Deux modes d'exploitations sont utilisés :

La terre est bleue dans des cônes volcaniques. Deux modes d'exploitation existent, la mine à ciel ouvert et la mine souterraine.

IV.3.1. La mine à ciel ouvert :

Ce type d'exploitation reste le plus répandu, surtout en Afrique, On utilise de gros engins de terrassement afin d'extraire le minerai de la pipe. Des explosifs sont utilisés lorsque la roche est trop dure. On creuse ainsi la pipe laissant apparaître des gradins par lesquels sont remontés par camions les matériaux à traiter et les stériles.

Quelques chiffres

IV.3.1.1. Ciel ouvert :

Organisations du travail du souterrain :

Nombre de jours ouvrables par an : …… 255 j/an

Nombre de jours ouvrables par semaine : ……. 5 j/s

Nombre de postes par jour : ……. 3 p

Durée d'un poste : ……. 7heures

Le chargement dans la carrière s'effectue par des chargeuses sur pneus, et de pelle sur chenille.



Figure IV.1 : Travail en ciel ouvert.

IV.3.2. La mine souterraine :

L'extraction souterraine peut aujourd'hui atteindre des profondeurs de plus de 1 000 mètres au-dessous de la surface du sol. La teneur des diamants s'appauvrit avec la profondeur. Deux techniques d'extraction sont utilisées :

IV.3.2.1. Souterrain :

Organisations du travail du souterrain :

Nombre de jours ouvrables par an : …… 220 j/an

Nombre de jours ouvrables par semaine : …… 5 j/s

Nombre de postes par jour : ……..... 2p

Durée d'un poste : ……..... 7.5 h de travail



Figure IV.2 : L'entrée principale du souterrain.

IV.4. Rôle stratégique du forage dans l'activité minière :

Après tout, le domaine de forage, réalisé dès l'étape de préparation opérationnelle, a pour objectif la constitution des trous de mine où sont injectés les explosifs nécessaires au dynamitage du matériel. Ainsi, à travers la fragmentation des roches, transport, broyage et traitement du minerai, tout dysfonctionnement ou arrêt au niveau de forage alourdirait les cadences de production, la logistique interne quant à elle, impactant de plein fouet la rentabilité du site.

- **Inventaire des équipements miniers :**

Pour assurer l'exécution des différentes opérations, la mine de Boukhadra dispose d'un parc varié d'engins et de matériels spécialisés, répartis comme suit :

⎫ Parc des engins de terrassement : Nivellement des fronts de taille, décapage de surface

⎫ Parc des engins déchargements : Évacuation des stériles et résidus

⎫ Parc des engins de transport : Transfert du minerai vers les stations de concassage

⎪ Parc des véhicules lourds : Support logistique et transport interne

⎪ Parc des engins de chargement, transport et fond : Chargement des bennes et mise en tas

⎪ Parc des engins de forassions : Réalisation des trous de mine pour le dynamitage

IV.5. Présentation technique et justification du choix de la foreuse B BURG HD 1500 D :

La machine B BURG HD 1500 D est une foreuse hydraulique montée sur chenilles, conçue pour les travaux de forage à ciel ouvert dans des environnements difficiles comme les carrières et les mines. Elle est fabriquée par BBURG International GmbH & Co. KG, en Allemagne, et est reconnue pour sa robustesse, sa précision et sa performance dans les forages de grande profondeur.



Figure IV.3: la foreuse B-BURG HD 1500 D. [44]

IV.5.1. Caractéristiques techniques principales :

Caractéristique	Valeur / Description
Modèle	B BURG HD 1500 D
Diamètre de forage	92 mm – 172 mm (3 ½″ – 6 ¾″)
Tubes de forage compatibles	76, 89, 100, 114 mm
Profondeur de sondage	Jusqu'à 40 mètres
Compresseur	Débit d'air : 28,3 m³/min – Pression : 24 bar (350 psi)
Volume du réservoir hydraulique	300 litres
Réservoir à gazole	900 litres
Moteur	DEUTZ TCD 2015 – 360 à 390 kW – 1900 tr/min
Couple de rotation maximal	5000 Nm
Poids total	Environ 23 500 kg
Dimensions (L × l × h)	50 mm × 2 495 mm × 3 400 mm

Tableau IV.1 : Caractéristiques techniques de la foreuse B-BURG HD 1500D. [44]

IV.5.2. Sous-systèmes techniques de la machine :

La B BURG HD 1500 D intègre plusieurs systèmes technologiques complexes :

- Système hydraulique : alimente les vérins, la rotation de la tête, les mouvements du mât.
- Système de graissage automatique : lubrification des tiges et composants critiques.
- Système de forage : tête de rotation, taillant, tiges et pinces de serrage.
- Système de filtration : air, carburant et huile (pré-séparateur haute performance).
- Système de commande : manettes ergonomiques + indicateur de profondeur numérique 3D.
- Système d'air comprimé : assure le soufflage et le refroidissement du trou.
- Cabine opérateur : protégée (FOPS/ROPS), équipée pour le confort et la sécurité.

- Fiabilité et accès à la maintenance

La foreuse a été conçue pour faciliter la maintenance grâce à :

- Un accès direct à toutes les composantes hydrauliques.
- Un espace technique bien agencé.
- La transmission des données de forage en temps réel via GSM.[44]

IV.5.3. Justification du choix pour l'étude :

Le choix de cette foreuse comme objet d'analyse ne relève pas du hasard. Il repose sur plusieurs constats observés au sein de l'unité de maintenance du site :

- Taux de défaillance élevé sur plusieurs sous-systèmes (hydraulique, graissage, démarrage).
- Impact direct sur la productivité : chaque arrêt retarde le calendrier d'extraction.
- Complexité technique de la machine qui nécessite une approche méthodique pour optimiser la maintenance.

- Disponibilité des données fiables sur 3 années, issues du bureau de méthode.
- Importance stratégique dans le cycle de production du site (plusieurs cycles de dynamitage par jour dépendent d'elle).

IV.6. L'application Pratique des méthodes d'analyse :

IV.6.1. Méthode d'analyse prévisionnelle « ABC (Pareto) » :

Pour appliquer la méthode ABC, il convient tout d'abord de classer les défauts par ordre décroissant en fonction du nombre d'heures de panne, comme le montre le tableau ci-dessous :

Composant	TTR (H)	Cumul TTR	Cumul TTR total (H)	% TTR	Nombre de panne	Cumul des pannes	% individuel	% de pannes cumulées	Classe
Filtre gasoil	1.5	15	15	11.49 4258 736	10	10	12.19	12,195122	A
Cosse batterie	2.5	15	30	22.98 8505 7471	6	16	7.32	19,5121951	A
Filtre séparateur	1.5	7.5	37.5	28.73 5632 1839	5	21	6.10	25,6097561	A
Joint torique	1.2	6	43.5	33.33	5	26	6.10	31,7073171	A
Démarreur	4.5	18	61.5	47.12 6436 7816	4	30	4.88	36,5853659	A
Filtre à huile moteur	1.8	5.4	66.9	51.26 4367 8161	3	33	3.66	40,2439024	A
Taillant	3.0	9	75.9	58.16 0919 5402	3	36	3.66	43,902439	A
Baguette de soudage	1.2	3.6	79.5	60.91 9540 2299	3	39	3.66	47,5609756	A
Flexible	3.5	7	86.5	66.28 3524 9042	2	41	2.44	50	A

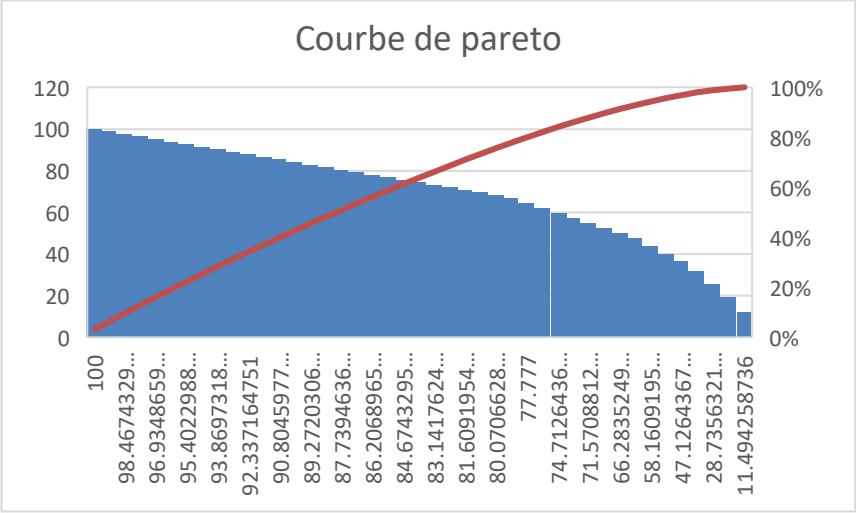
Adapteur	1.0	2	88.5	67.81 6091 954	2	43	2.44	52,4390244	A
Filtre à air	3.5	7	93.5	71.57 0881 2261	2	45	2.44	54,8780488	A
Morteau fond du trou	1.0	2	95.5	73.18 0076 6284	2	47	2.44	57,3170732	A
Relais démarreur	1.0	2	97.5	74.71 2643 6782	2	49	2.44	59,7560976	A
Boulon	1.0	2	99.5	76.24 5210 728	2	51	2.44	62,195122	A
Graissage	1.0	2	101.5	77.77 7	2	53	2.44	64,6341463	A
Filtre compresseur	1.0	2	103.5	79.31 0344 8276	2	55	2.44	67,0731707	A
Tige du forage	1.0	1	104.5	80.07 0662 8352 5	1	56	1.22	68,2926829	A
Filtre hydraulique	1.0	1	105.5	80.84 2911 8774	1	57	1.22	69,5121951	A
Batteries 225 AMP 12V	1.0	1	106.5	81.60 9195 4023	1	58	1.22	70,7317073	A
Joint spi	1.0	1	107.5	82.37 5478 9272	1	59	1.22	71,9512195	A
SAIC	1.0	1	108.5	83.14 1762 4521	1	60	1.22	73,1707317	A

Pompe électrique gasoil	1.0	1	109.5	83.908045977	1	61	1.22	74,3902439	A
Flexible gasoil	1.0	1	110.5	84.674329 5019	1	62	1.22	75,6097561	A
Flexible clé 24 2000 bar	1.0	1	111.5	85.440613 0268	1	63	1.22	76,8292683	A
Capteur température	1.0	1	112.5	86.206896 5517	1	64	1.22	78,0487805	A
Séparateur d'eau	1.0	1	113.5	86.973180 0766	1	65	1.22	79,2682927	A
Kit réparation	1.0	1	114.5	87.739463 6015	1	66	1.22	80,4878049	B
Kit joint	1.0	1	115.5	88.505747 1264	1	67	1.22	81,7073171	B
Switch 'service électrique'	1.0	1	116.5	89.272030 6513	1	68	1.22	82,9268293	B
Flexible d'air	1.0	1	117.5	90.038314 1762	1	69	1.22	84,1463415	B
Valve	1.0	1	118.5	90.804597 7011	1	70	1.22	85,3658537	B
Glacial	1.0	1	119.5	91.570881 2261	1	71	1.22	86,5853659	B
Soupape de recharge	1.0	1	120.5	92.337164 751	1	72	1.22	87,804878	B

Courroie	1.0	1	121.5	93.10 3448 2759	1	73	1.22	89,0243902	B
Charbons	1.0	1	122.5	93.86 9731 8008	1	74	1.22	90,2439024	B
Joint paquetlit	1.0	1	123.5	94.63 6015 3257	1	75	1.22	91,4634146	B
Roulement 65x100	1.0	1	124.5	95.40 2298 8506	1	76	1.22	92,6829268	B
Alternateur 24V	1.0	1	125.5	96.16 8582 3755	1	77	1.22	93,902439	B
Ampoule H4 24V	1.0	1	126.5	96.93 4865 9004	1	78	1.22	95,1219512	C
Lampe 1 PLO	1.0	1	127.5	97.70 1149 4253	1	79	1.22	96,3414634	C
Écrou	1.0	1	128.5	98.46 7432 9502	1	80	1.22	97,5609756	C
Rondelle	1.0	1	129.5	99.23 3716 4751	1	81	1.22	98,7804878	C
Collier de serrage	1.0	1	130.5	100	1	82	1.22	100	C

Tableau IV.2 : l'analyse ABC.

IV.6.2 La courbe de Pareto :



Organigramme IV.1 : La courbe d'ABC.

Interprétation du diagramme de Pareto :

Le diagramme de Pareto met en évidence la répartition inégale des pannes parmi les composants de la foreuse BBURG HD 1500 D. Il révèle qu'une minorité de composants concentre la majorité des défaillances, ce qui justifie une stratégie de maintenance différenciée selon trois zones de criticité.

ZONE A : Composants hautement critiques

Dans cette zone, environ 25 % des composants regroupent près de 70 % du total des pannes recensées. Il s'agit notamment de :

- Filtre gasoil
- Cosse batterie
- Filtre séparateur
- Joint torique
- Démarreur
- Filtre à huile moteur

Ces composants sont à l'origine de la majorité des arrêts machine. Leur rôle dans le système est central (filtration, alimentation électrique, démarrage).

Action recommandée :

Mettre en place une maintenance préventive systématique hebdomadaire, incluant :

- Le remplacement périodique des filtres
- Le test des connexions de batteries
- Le nettoyage des composants sensibles
- La constitution d'un stock de sécurité permanent pour ces pièces

ZONE B : Composants moyennement critiques

Regroupe environ 30 à 35 % des composants, totalisant 20 à 25 % supplémentaires des pannes. On y trouve :

- Taillant
- Flexible
- Filtre à air
- Adapteur
- Relais démarreur

Ces composants subissent des défaillances modérées mais régulières, souvent liées à l'usure ou à l'environnement de travail (abrasion, vibrations, poussière).

Action recommandée :

- Mise en place d'une maintenance palliative (réparations ciblées en cas de panne)
- Inspection visuelle fréquente pendant les arrêts
- Constitution d'un stock tampon pour ces éléments

ZONE C : Composants faiblement critiques

Plus de 40 % des composants n'engendrent qu'environ 10 % des pannes cumulées. Cela inclut :

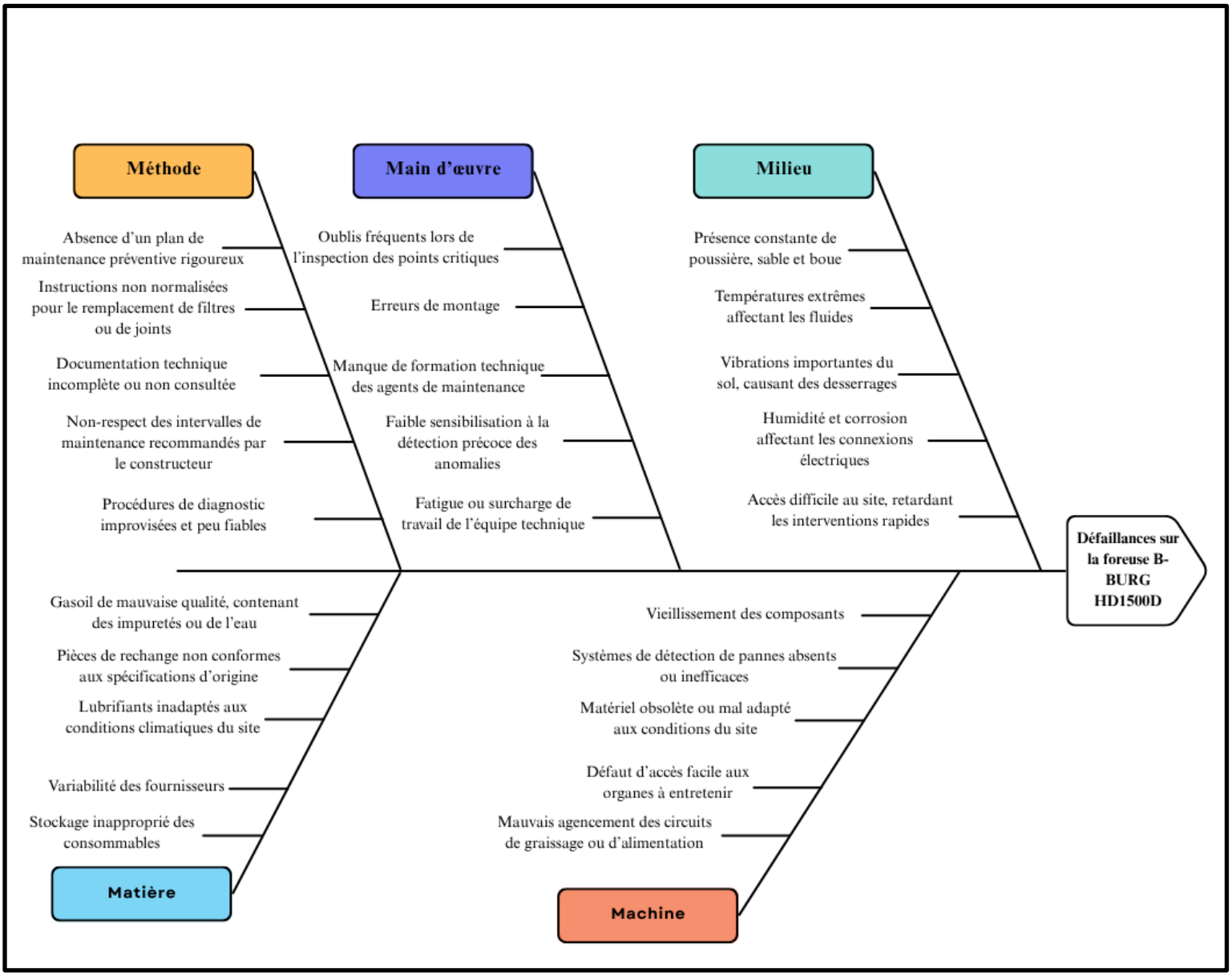
- Colliers de serrage
- Rondelles, écrous, ampoules, capteurs secondaires, alternateurs, etc.

Ces éléments ont un impact mineur sur la continuité du service, mais peuvent néanmoins détériorer la performance s'ils sont négligés.

Action recommandée :

- Adopter une maintenance conditionnelle, consistant à :
    - Vérifier leur état lors des arrêts planifiés
    - Réagir uniquement en cas d'usure visible ou panne signalée

IV.7. Méthode Cause-Effets (ISHIKAWA) :



Organigramme IV.2 : diagramme cause-effet.

Interprétation du diagramme ISHIKAWA :

L'analyse des causes de défaillances effectuée à l'aide du diagramme d'Ishikawa a permis de mettre en évidence plusieurs facteurs influents sur la disponibilité et la fiabilité de la foreuse BBURG HD 1500 D. Ces causes sont regroupées selon les 5M :

Matière :
La qualité des consommables utilisés (gasoil, lubrifiant, huile moteur) est souvent à l'origine de plusieurs défaillances critiques, notamment les colmatages des filtres gasoil et séparateurs. L'utilisation de pièces de rechange non conformes ou reconditionnées accentue également l'usure prématurée des composants, en particulier les joints et les démarreurs.

Milieu (environnement)
La machine évolue dans un environnement sévèrement poussiéreux, avec des températures élevées et des variations climatiques notables. Ces conditions accélèrent la saturation des filtres, l'oxydation des connexions électriques (ex : cosse batterie) et l'encrassement général des systèmes. L'absence d'abris de protection ou de zones d'ombre augmente l'exposition des organes sensibles.

Main d'œuvre :
Le manque de formation technique spécifique sur la foreuse, ainsi qu'une faible expérience dans la détection précoce des défaillances, contribuent à la récurrence des pannes. De plus, l'absence de procédures normalisées ou de check-lists lors des maintenances rend les interventions peu efficaces. Une meilleure sensibilisation à l'état de fonctionnement réel des systèmes est indispensable.

Matériel :
Certains composants, comme le démarreur ou les taillants, sont exposés à des efforts répétés et mal maîtrisés. L'absence de capteurs de suivi (pression, température, vibration) rend difficile l'anticipation des pannes. Le vieillissement de certains circuits (hydraulique ou électrique) et le stockage inadéquat des pièces de rechange contribuent également à la dégradation du système.

Méthode :
Le plan de maintenance actuellement utilisé repose majoritairement sur des interventions correctives après défaillance. L'absence d'un historique centralisé des pannes et d'un suivi analytique limite l'apprentissage organisationnel. La coordination entre les équipes d'exploitation et de maintenance reste insuffisante, et la communication des signaux faibles est négligée.

IV.8. Méthodologie :

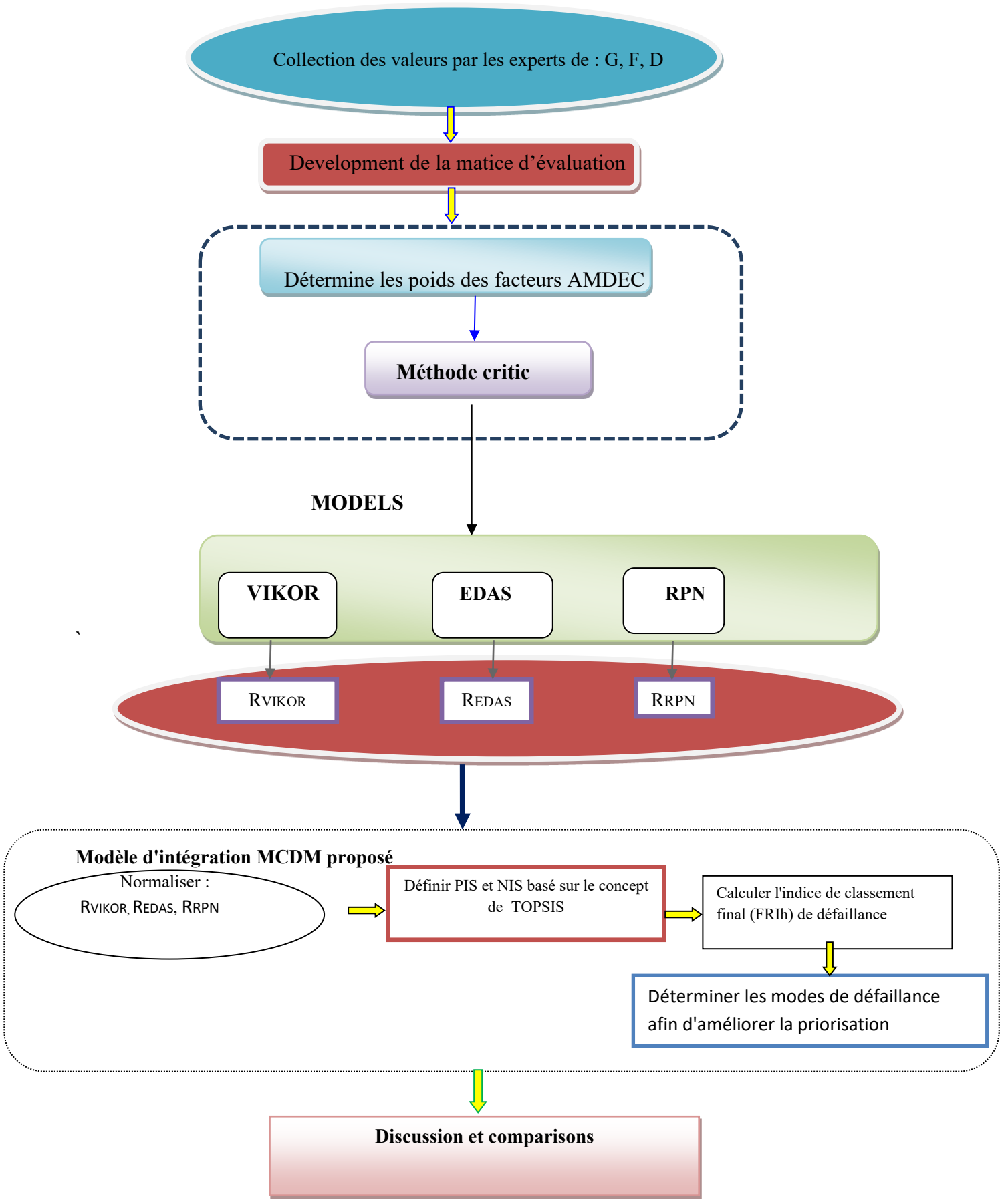
La Figure IV.6 illustre l'architecture du modèle proposé pour l'évaluation du risque de défaillance d'une machine de forage. La mise en œuvre de ce modèle s'articule autour de quatre étapes principales :

a) Évaluation des variables associées aux modes de défaillance.

b) Détermination des poids des facteurs de risque à l'aide de la méthode CRITIC.

c) Application de la méthode AMDEC.

d) Intégration proposée des méthodes MCDM : VIKOR, EDAS et TOPSIS.



Organigramme IV.3 : Modèle AMDEC basé sur l'intégration CRITIC–MCDM proposé.

IV.8.1. Évaluation des indices de l'AMDEC :

Dans la phase initiale de l'analyse, la première étape consiste à identifier les variables de risque ainsi que les modes de défaillance potentiels. Ces variables sont ensuite intégrées comme critères d'évaluation dans le cadre de l'AMDEC, représentés par les indices S (Gravité), O (Occurrence) et D (Détectabilité). Il est courant que les ingénieurs prennent en considération des risques encore non survenus, c'est-à-dire des défaillances potentielles, lors de l'évaluation. L'intervention d'experts s'avère essentielle dans ce processus, grâce à leur expérience de terrain et à leur formation, permettant une estimation précise et anticipée des risques.

Termes linguistiques			
Gravité (G)	**Frequence (F)**	**Détectabilité (D)**	**Note**
Très dangereux (TD)	Défaillance pratiquement inévitable (DPI)	Incertitude absolue (IA)	10
Dangereux (D)	Très élevé (TE)	Très éloignée (TÉ)	9
Extrême (E)	Défaillances répétées	Éloignée (É)	8
Majeur (MA)	Élevée (É)	Très faible (TF)	7
Significatif (S)	Moyennement élevée (ME)	Faible (F)	6
Modéré (MO)	Modérée (M)	Modérée (M)	5
Faible (F)	Relativement Faible (RF)	Moyennement élevée (ME)	4
Mineur (MI)	Faible (F)	Élevée (É)	3
Très mineur (TM)	Éloignée (É)	Très élevée (TE)	2
Nulle (N) ou presque	Presque impossible (PI)	Quasi certaine (QC)	1

Tableau IV.3: Termes linguistiques et valeurs pour G, F, D.

IV.8.2. Détermination des poids des facteurs de risque à l'aide de la méthode CRITIC :

Diakoulaki et al. Ont proposé la méthode CRITIC, qui repose sur une analyse des corrélations pour identifier les différences entre les critères. Cette méthode établit les poids en se basant sur l'intensité du contraste et le degré de conflit entre les critères, sans intervention subjective de la part des décideurs (Diakoulaki et al., 1995 ; Şahin, 2021).

Les étapes de la méthode CRITIC peuvent être résumées comme suit :

1. Normalisation de la matrice de décision selon l'équation suivante :

$$a_{ij}^{+} = \frac{a_{ij} - a_j^{worst}}{a_j^{best} - a_j^{worst}} \qquad \text{(IV,1)}$$

où a_{ij} représente la valeur normalisée de la ith alternative pour le jth critère.

2.Calcul de la quantité d'information Cj contenue dans le jth critère :

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^{n}(1 - r_{jk}) \qquad \text{(IV,2)}$$

où r_{jk} est le coefficient de corrélation entre deux critères distincts et σ_j représente l'écart-type du critère jth

3. Détermination des poids objectifs (wj) :

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^{m} C_k} \qquad \text{(IV,3)}$$

Ainsi, la méthode attribue des poids plus élevés aux critères qui présentent une forte variabilité et une faible corrélation avec les autres, traduisant ainsi leur importance informationnelle dans la prise de décision.

IV.8.3. Approche d'intégration MCDM proposée : VIKOR et TOPSIS :

IV.8.3.1. Méthode TOPSIS : Les étapes complètes des méthodes basées sur le principe de TOPSIS, utilisées pour agréger les scores d'évaluation, sont les suivantes :

Etape 01 Les scores des modes de défaillance sont convertis en indices normalisés compris entre 0 et 1. Les indices des paramètres S (Gravité), O (Occurrence) et D (Détectabilité) sont transformés à l'aide de la formule suivante :

a) Création de la matrice normalisée.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad \text{(IV,4)}$$

b) Détermination de la matrice normalisée pondérée.

$$V_{ij} = r_{ij} \times W_j \qquad \text{(IV,5)}$$

où

Wj : représente les poids des critères, déterminés à l'aide de la méthode critique.

Etape 02 Déterminer z^+ et z^-(les scores maximum et minimum pour chaque colonne)

Identifier les valeurs les plus élevées et les plus faibles (z+ and z-) pour chaque critère et chaque mode de défaillance.

$$Z^+ = \max_n \left\{V_{ij}\right\} = \left\{Z_1^+, Z_2^+, Z_3^+\right\} \qquad \text{(IV,6)}$$

$$Z^- = \max_n \left\{V_{ij}\right\} = \left\{Z_1^-, Z_2^-, Z_3^-\right\} \qquad \text{(IV,7)}$$

$$a_n^+ = \sqrt{(V_{i1} - Z_1^+)^2 + (V_{i2} - Z_2^+)^2 + (V_{i3} - Z_3^+)^2} \qquad \text{(IV,8)}$$

$$a_n^- = \sqrt{(V_{i1} - Z_1^-)^2 + (V_{i2} - Z_2^-)^2 + (V_{i3} - Z_3^-)^2} \qquad \text{(IV,9)}$$

i=1,2,…,n

Etape 4 : Élaboration de l'indice final de classement

La définition d'un indice de classement fiable, tel que le FRIn, permet d'établir l'ordre final des alternatives. Cet indice repose sur la distance de séparation entre la solution idéale positive et la solution idéale négative, comme le proposent les approches MCDM.

.

$$FRI_n = \left(\frac{a_n^-}{\sum_{n=1}^{m} a_n^-}\right) - \left(\frac{a_n^+}{\sum_{n=1}^{m} a_n^+}\right) \qquad \text{(IV,10)}$$

$-1 \le FRI_n \le 1$

IV.8.3.2 Méthode VIKOR :

Cette approche vise à classer et à sélectionner des alternatives parmi un ensemble de choix en présence de critères divergents. L'objectif principal de la méthode VIKOR est d'identifier une solution qui se rapproche le plus possible de la solution idéale.

Les étapes de la méthode VIKOR sont les suivantes :

Étape 1 : Normalisation de la matrice de decision

La normalisation peut être effectuée à l'aide de la formule suivante :

$$f_{ij}(x) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad \text{(IV,11)}$$

$$i = 1, \dots, m \;\; ; j = 1, \dots \;\; , n$$

Étape 2 : Déterminer les meilleures et les pires valeurs pour chaque critère

Les meilleures (idéales) et les pires (anti-idéales) valeurs des bénéfices pour chaque critère peuvent être déterminées à l'aide des formules suivantes :
Si le critère est à maximiser (critère bénéfique), alors :

$$f_j^* = Max_i f_{ij}, f_j^- = Min_i f_{ij} \qquad \text{(IV,12)}$$

$j = 1,2, \dots, n$

Si le critère est à minimiser (critère négatif), alors :

$$f_j^* = Min_i f_{ij}, f_j^- = Max_i f_{ij} \qquad \text{(IV,13)}$$

$$j = 1,2, \dots, n$$

La solution idéale positive f^* et f^- la solution idéale négative peuvent être exprimées comme suit :

$$f^* = \left\{ f_1^*, f_2^*, f_3^*, ..., f_n^* \right\} \qquad \text{(IV,14)}$$

$$f^- = \left\{ f_1^-, f_2^-, f_3^-, ..., f_n^- \right\} \qquad \text{(IV,15)}$$

Étape 3 : Calcul des valeurs S_i et R_i .

Les valeurs S_i et R_i peuvent être calculées à l'aide des formules suivantes :

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \frac{\left(f_j^* - f_{ij}\right)}{\left(f_j^* - f_j^-\right)} \qquad \text{(IV,16)}$$

$$R_i = Max_j \left[w_j \frac{\left(f_j^* - f_{ij}\right)}{\left(f_j^* - f_j^-\right)} \right] \qquad \text{(IV,17)}$$

où w_j représente le poids du critère.

STEP4 : Calculate the value Q_i

La valeur Q_i, représentant l'indice VIKOR pour chaque alternative, peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$Q_i = \gamma \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1-\gamma)\frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \qquad \text{(IV,18)}$$

où :

$$S^* = Min_i \{S_i\}; S^- = Max_i \{S_i\}; R^* = Min_i \{R_i\}; R^- = Max_i \{R_i\} \qquad \text{(IV,19)}$$

et γ représente l'utilité maximale du groupe, indiquée par la valeur 0,5. Dans le présent travail, nous utilisons γ allant de 0 à 1.

Étape 5 : Classer les alternatives en triant selon les valeurs S, R et Q :

Les alternatives sont classées en triant les valeurs de *S, R* et *Q* par ordre décroissant, de manière à ce que la meilleure position soit attribuée à l'alternative ayant la plus petite valeur VIKOR. Les résultats donnent lieu à trois listes de classement.

Étape 6 : Proposer une solution de compromise :

L'alternative C, qui est la mieux classée selon la mesure *Q* (minimum), est proposée comme solution de compromis si les deux conditions suivantes sont remplies :

Condition 1. Avantage acceptable : $Q(\text{first position}) - Q(\text{second position}) \geq \frac{1}{m}$ où *m* est l'alternative occupant la première position, et γ est l'alternative occupant la deuxième position dans le classement selon *Q*. *m* représente le nombre total d'alternatives (modes de défaillance).

Condition 2 Stabilité acceptable dans la prise de décision : l'alternative doit également être la mieux classée selon S ou/et R.

If one of the conditions is not satisfied, then a set of compromise solutions is proposed, which consists of:

Solution 1. Les alternatives $A^{(1)}, A^{(2)}, ..., A^{(m)}$ sont proposées si la Condition 1 n'est pas satisfaite ; l'alternative A est déterminée par $A^{(M)} - Q\left(A^{(1)}\right) < \frac{1}{(m-1)}$ pour un M maximal (les positions de ces alternatives sont dites « proches les unes des autres »).

Solution 2. Les alternatives *B* et *C* sont proposées si seule la Condition 2 n'est pas satisfaite.

Solution 3. L'alternative ayant la valeur Q minimale est sélectionnée comme meilleure alternative si les deux conditions sont satisfaites.

IV.8.4. Utilisation la méthode de l'AMDEC :

La présente étude a été réalisée sur la machine de forage BBURG 1500 HD (Figure 2). Les données statistiques collectées sur les pannes de cette machine ont permis de démontrer l'efficacité du modèle hybride MCDM-AMDEC développé.
Chaque défaillance fonctionnelle identifiée sur la BBURG 1500 HD est répertoriée dans le Tableau 1, accompagnée des différents mécanismes de défaillance "Pa".

Nº	Élément	Fonction	Mode de défaillance	Cause de la défaillance	Effets de la défaillance	Detection	Fréquence	Gravité	Frequency	C	Action Corrective
1	Filtre gasoil	Transmit courant	_Obturation _blocage	_Présence d'impureté diverses	Pompe colmatée Mauvais filtrage	Visuelle	9	8	6	432	changement
2	Cosse batterie	Transmit courant to the traction moteur	_Mauvais contact _Oxydation	_Oxydation _usure ou mauvais serrage	_Démarrage difficile _chute de tension	Visuelle	7	9	5	315	changement
3	Filtre séparateur	Séparer l'eau du carburant	_Colmatage _saturation	_Durée de service dépassée _mauvaise qualité du carburant	_Altération de la combustion _endommagement du système d'injection	Indicateur	6	7	6	252	changement
4	Joint Torique	Assure étanchéité	_déchirait _perdait de l'élasticité	_Vibration _Depasse la validité	_Perte de l'huile	Visuelle	6	6	5	180	changement
5	Démarreur	Démarrer le moteur thermique de la foreuse	_Blocage _panne électrique	_Enroulement grille _relais défectueux	_Impossibilité de démarrer la machine	Visuelle	5	8	5	200	changement
6	Filtre à huile moteur	Filtrer les impuretés de l'huile moteur	_Colmatage _fuite interne	_Saturation du filtre _mauvaise qualité de l'huile	_Usure accélérée du moteur _montée en température _panne moteur	Indicateur	4	7	4	112	changement

7	Taillant	Percer le sol ou la roche	_Usure excessive _casse	_Utilisation prolongée _sol abrasive _mauvais alignement	_Réduction du rendement de forage _vibrations _arrêt de la progression	Visuelle	4	8	3	96	changement
8	Baguette de soudage	Réaliser des soudures solides et durables	_Mauvaise fusion _porosité	_Humidité _mauvais réglage	_Soudures fragiles _rupture des assemblages	Visuelle	4	8	3	45	changement
9	Flexible	Transmission de l'huile	_éclatement _fissuration	_Pression _agressions extérieures	_système hydraulique Débranché _fuite	Visuelle	3	3	4	36	changement
10	Adapteur	Assurer la liaison entre éléments de tailles ou types différents	_Fuite _rupture	_Surcharge mécanique _montage incorrect _corrosion	_Perte de fluide _panne du circuit connecté	Visuelle	3	4	3	36	changement
11	Filtre à air	Filtrer l'air moteur	_Obstruction _encrassement	_Poussières _entretien insuffisant	_Perte de puissance _surconsommation de carburant	Visuelle	4	5	3	60	changement
12	Morteau fond du trou	Briser la roche lors du forage	_ usure _casse	_ Choc excessif _ mauvaise lubrification	_ Perte d'efficacité de forage _ arrêt total	_Visuelle _ bruit anormal	2	6	4	48	changement
13	Relais démarreur	Commander le passage du courant vers le démarreur	_ Défaut de contact	_ Usure électrique _ échauffement	_ Impossibilité de démarrer	_ Test électrique	3	6	5	90	Changement

			_panne	_ court-circuit	_ panne intermittente	_ absence de clic de démarrage					
14	Boulon	Assembler solidement deux pièces mécaniques	_ Desserrement _ rupture	_ Surcharge _ vibration _ couple de serrage insuffisant	_ Désassemblage _fuite _ vibration accrue	Visuelle	3	3	2	18	Changement
15	Manque de Graissage	Réduire les frottements entre pièces mécaniques en mouvement	Manque de lubrification	_Oubli d'entretien _fuite _ choix d'huile inadéquat	_ Usure accélérée _ échauffement _ grippage	Visuelle	3	6	4	72	Changement
16	Filtre compresseur	Filtrer l'air aspiré	_ Obstruction _ colmatage	_ Environnement poussiéreux _ entretien insuffisant	_ Perte de performance _ surchauffe du compresseur	Indicateur	3	5	4	60	Changement

Tableau IV.4 :la méthode AMDEC pour la machine de forage B-BURG.

IV.8.4.1. Synthèse (évaluation de la criticité) :

Éléments	Criticité	Causes de défaillance
Filtre gasoil	432	Présence d'impureté diverses
Cosse batterie	315	_Oxydation _usure ou mauvais serrage _ desserrage
Filtre séparateur	252	_ Durée de service dépassée _ mauvaise qualité du carburant
Démarreur	200	_ Enroulement grillé _ relais défectueux
Joint torique	180	_ Vibration _ Depasse la validité
Filtre à huile moteur	112	_ Saturation du filtre _ mauvaise qualité de l'huile
Taillant	96	_ Utilisation prolongée _ sol abrasif _ mauvais alignement

Tableau IV.5 : Classement décroissant des causses de défaillance par criticité.

IV.8.4.2. Classification des éléments suivant leur indice de criticité :

Niveau de criticité	Eléments	Criticité	Action corrective
$1 \leq C < 120$	Taillant	96	Maintenance préventive systématique
	Filtre à huile moteur	112	
$120 \leq C < 200$	Joint torique	180	Maintenance préventive renforcée
$200 \leq C < 300$	Démarreur	200	Maintenance conditionnelle et surveillance accrue
	Filtre séparateur	252	
$300 \leq C$	Cosse batterie	315	Remise en cause du système ou composant critique
	Filtre gasoil	432	

Tableau IV.6: Evaluation de la criticité.

IV.8.4.3. Solution et recommandation :

À l'issue de l'analyse approfondie menée sur la foreuse BBURG HD 1500 D, plusieurs dysfonctionnements critiques ont été identifiés, notamment au niveau du système de filtration, du système électrique de démarrage et des éléments d'usure directe comme le taillant. Les solutions proposées visent à réduire le taux de pannes, à améliorer la disponibilité de l'équipement et à optimiser les ressources de maintenance.

Solutions proposées :

- Mise en œuvre d'un programme de maintenance préventive ciblée, ajusté en fonction des historiques de pannes et de la criticité des composants. Cela permettra d'intervenir avant la survenue des défaillances et de sécuriser les opérations de forage.
- Réorganisation stratégique du magasin de pièces de rechange, notamment pour les composants critiques. Leur disponibilité permanente réduira les délais d'immobilisation de la machine.
- Surveillance conditionnelle des systèmes sensibles par l'utilisation de capteurs (pression, température, vibration) afin de détecter les signes de fatigue ou de dysfonctionnement invisibles à l'œil nu.
- Élaboration de check-lists de diagnostic spécifiques aux composants les plus exposés, afin d'uniformiser les procédures de contrôle et de réduire les oublis ou erreurs humaines lors des interventions.
- Renforcement de la formation technique des opérateurs de maintenance, axée sur le repérage précoce des symptômes de défaillance, le remplacement correct des éléments, et l'analyse des retours d'expérience.
- Standardisation des consommables (filtres, huiles, pièces électriques) avec un contrôle qualité renforcé à la réception, pour éviter les problèmes liés aux pièces non conformes ou incompatibles.

Recommandations complémentaires :

- Mettre en place une digitalisation complète des fiches d'intervention pour assurer une traçabilité précise des pannes, faciliter l'analyse des données et améliorer la réactivité.
- Effectuer des audits périodiques de performance de la foreuse pour ajuster les cycles de maintenance en fonction de l'évolution de son comportement en exploitation.
- Étendre ces bonnes pratiques et stratégies de gestion à l'ensemble des foreuses du parc afin de standardiser les méthodes de suivi et de fiabilisation.

IV.8.5. Utilisation de la méthode CRITIC :

Pour déterminer les poids de chaque paramètres le tableau expose les poids :

failures	F	G	N	C
Pa8	3	6	5	90
Pa2	7	9	5	315
Pa14	3	4	3	36
Pa5	6	6	5	180
Pa3	6	7	6	252
Pa16	3	3	2	18
Pa1	9	8	6	432
Pa13	3	5	3	45
Pa11	4	5	3	60
Pa15	3	3	4	36
Pa7	4	8	3	96
Pa10	3	5	4	60
Pa6	4	7	4	112
Pa12	2	6	4	48
Pa9	3	6	4	72
Pa4	5	8	5	200

Tableau IV.7: Le classement conventionnel de l'AMDEC.

Dans cette étude, nous proposons une approche plus fiable en intégrant plusieurs méthodes MCDM afin d'obtenir un classement final des modes de défaillance. La première méthode utilisée est TOPSIS, en s'appuyant sur les équations (4) à (10), dont les résultats sont présentés dans le Tableau 5. On observe que le mode de défaillance Pa1 (filtre gasoil) est le plus critique, suivi de Pa2 (casse batterie) et Pa3(filtre séparateur).

La deuxième méthode est VIKOR, appliquée selon les équations (11) à (18), et dont les résultats figurent dans le Tableau 6. Là encore, Pa1 (filtre gasoil) apparaît comme le mode de défaillance le plus critique, suivi de Pa2 (casse batterie) et Pa3 (filtre séparateur).

Les poids (Tableau 4) ont été estimés en utilisant la méthode CRITIC.

W_j	0,55281276	0,19309511	0,25409213

Tableau IV.8 : Poids estimés selon différentes méthodes (Par la méthode CRITIC).

IV.8.6. Utilisation des méthodes EDAS, VIKOR et criticité :

Dans le tableau suivant, nous exposants les différents classements :

	RVikor	EDAS	RPN
Pa1	7	9	9
Pa2	2	2	2
Pa3	14	15	15
Pa4	5	5	5
Pa5	3	3	3
Pa6	16	16	16
Pa7	1	1	1
Pa8	13	13	13
Pa9	12	12	12
Pa10	15	14	14
Pa11	9	7	7
Pa12	10	10	10
Pa13	6	6	6
Pa14	11	7	7
Pa15	8	10	10
Pa16	4	4	4

Tableau IV.9: Tableau de comparaison des classements des modes de défaillance selon RVikor, EDAS et RPN.

Nous remarquons que chaque méthode donne un classement diffèrent surtout a partir de la positon 7, cette situation ouvre la possibilité d'utiliser une méthode hybride basée sur la méthode TOPSIS, En effet, les premières positions (Pa7, Pa2, Pa5) restent cohérentes entre les méthodes VIKOR, EDAS et RPN, ce qui confirme leur criticité élevée. Cependant, à partir du rang 7, des divergences apparaissent, notamment pour Pa11, Pa14, Pa15, qui changent de position selon l'approche.

Cela montre que chaque méthode MCDM met en valeur un aspect particulier de la décision (distance, écart, stabilité...), et que la combinaison des classements permettrait de réduire les biais liés à l'utilisation d'un seul modèle.

_le tableau suivant exposé les méthodes VIKOR, EDAS, TOPSIS, Hybride :

	RVikor	EDAS	RPN	Hybride
Pa1	7	**9**	**9**	7
Pa2	2	**2**	**2**	2
Pa3	14	**15**	**15**	14
Pa4	5	**5**	**5**	5
Pa5	3	**3**	**3**	3
Pa6	16	**16**	**16**	16
Pa7	1	**1**	**1**	1
Pa8	13	**13**	**13**	13
Pa9	12	**12**	**12**	12
Pa10	15	**14**	**14**	15
Pa11	9	**7**	**7**	8
Pa12	10	**10**	**10**	11
Pa13	6	**6**	**6**	6
Pa14	11	**7**	**7**	10
Pa15	8	**10**	**10**	9
Pa16	4	**4**	**4**	4

Tableau IV.10: Tableau de comparaison des classements des modes de défaillance selon RVikor, EDAS, RPN et l'approche hybride.

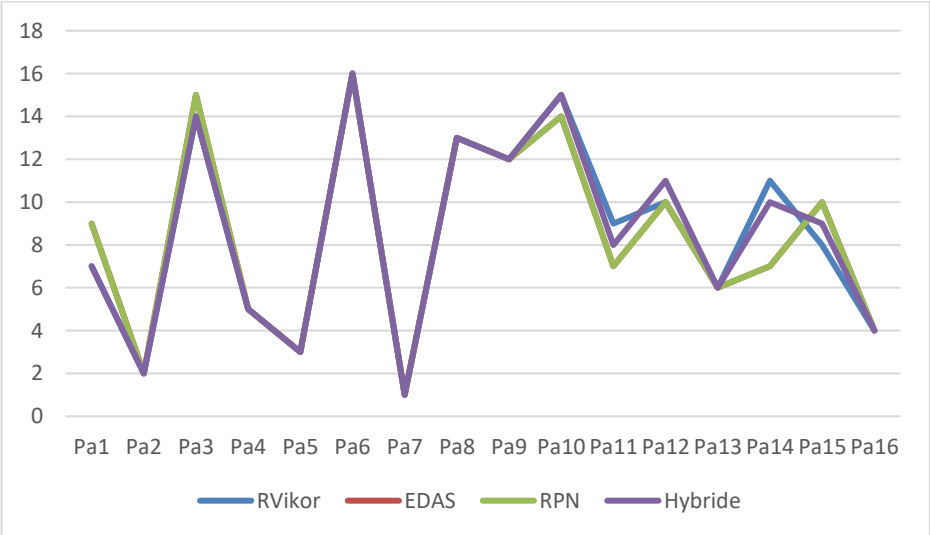


Figure IV.4 : Comparaison des rangs des défaillances selon les méthodes MCDM (VIKOR, EDAS, RPN, Hybride).

Wj
0,50082995
0,24958502
0,24958502

Tableau IV.11 : Tableau des poids des critères (Wj) pour l'évaluation des modes de défaillance.

Finalement, nous avons obtenu un classement final, qui a permis d'identifier les six pannes principales : Pa7, Pa2, Pa5, Pa16, Pa4 et Pa13.

Ce classement est issu de la combinaison des méthodes RPN, VIKOR et EDAS, dans le but d'atténuer les biais spécifiques à chaque approche individuelle.
Il reflète une vue plus équilibrée et rationnelle de la criticité réelle des modes de défaillance.

Cette méthode de hiérarchisation multiple permet :

- de renforcer la fiabilité du classement,
- d'éviter les ex-æquo injustifiés observés dans la méthode RPN,
- et de mieux pondérer les critères de décision selon leur importance relative.

Ainsi, la méthode hybride proposée offre une meilleure capacité de décision, en fournissant une vision plus cohérente des priorités d'intervention, et représente une avancée significative par rapport à l'approche AMDEC conventionnelle.

IV.9. Conclusion :

L'analyse détaillée effectuée dans ce chapitre a permis d'identifier les défaillances les plus critiques rencontrées sur la foreuse BBURG 1500 HD. À travers l'application de la méthode AMDEC, puis son renforcement par l'approche MCDM, les composants les plus affectés ont pu être hiérarchisés selon leur criticité réelle.

Parmi les pannes les plus significatives relevées, on peut citer :

- L'obturation du filtre à gasoil
- L'oxydation de la casse batterie
- Le colmatage du filtre séparateur
- Le blocage du démarreur
- La défaillance du joint torique
- L'usure du taillant

Grâce à l'intégration de la méthode MCDM, ces défaillances ont été évaluées de manière plus objective à travers une pondération cohérente des critères (Fréquence, Gravité, détectabilité), permettant ainsi de prioriser efficacement les actions de maintenance.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a permis de démontrer la pertinence d'une approche hybride combinant l'AMDEC et des méthodes d'aide à la décision MCDM pour la gestion de la maintenance d'un équipement industriel complexe tel que la machine de forage BBURG 1500 HD.

L'étude a débuté par une présentation des principes fondamentaux de la maintenance, suivie d'un aperçu technique des équipements de forage. L'analyse AMDEC appliquée à la machine a permis d'identifier les composants les plus sujets aux pannes, tels que :

- Le filtre à gasoil (obstruction),
- La casse batterie (oxydation),
- Le filtre séparateur (colmatage),
- Le démarreur (blocage),
- Le joint torique (fuite),
- Le taillant (usure),
- Le filtre à air,
- Le relais démarreur, etc.

Ces éléments ont ensuite été évalués à l'aide des méthodes MCDM, notamment TOPSIS et VIKOR, afin de hiérarchiser les priorités d'intervention de manière rationnelle et fondée. Ce croisement méthodologique a permis d'obtenir un classement plus objectif des défaillances en fonction de la fréquence, de la gravité et de la difficulté de détection, pondérés avec précision.

En conclusion, l'intégration de l'analyse AMDEC avec les outils MCDM a apporté une plus-value significative dans le processus de décision lié à la maintenance. Cette approche a permis :

- Une meilleure anticipation des pannes,
- Une réduction potentielle des coûts de maintenance,
- Et une amélioration de la fiabilité globale de la machine.

Elle constitue ainsi une solution méthodologique pertinente pour d'autres applications industrielles où la gestion des risques techniques est cruciale.

BIBLIOGARAPHIE

[1] Larousse, *Définition de la maintenance*, Dictionnaire en ligne Larousse. [En ligne] : https://www.larousse.fr

[2] AFNOR, NF X 60-010, *Terminologie de la maintenance*, Association Française de Normalisation, France, 1980.

[3] //https://www.beaucemedia.ca/2020/10/29/levolution-de-la-maintenance-industrielle/

[4] Rezgi Imane « Cour Maintenance Industriel Univ-Ouargla 2017 ».

[5] J. Boulet, *Maintenance industrielle : organisation et méthodes*, Éditions Dunod, 2006.

[6] P. Morel, *Gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO)*, Techniques de l'ingénieur, 2012.

[7] B.DANIEL, C. HAZARD. Guide de maintenance. ISBN (2-09-181580-2). Paris. Nathan.1987.

[8] A. Belhomme « Cours de STRATEGIE DE MAINTENANCE Forges les Eaux année 2010/2011 ».

[9] BELLAOUAR Ahmed et BELEULMI Salima, Fiabilité Maintenabilité Disponibilité, Univ de Constantine, 2014.

[10] P. Morel, *op. cit.*, chapitre sur la préparation des interventions de maintenance.

[11] M. Pérès, *Management de la maintenance*, Ellipses Éditions, 2004.

[12] MOUNIR AMAR. « Technique de forage principe et matériels ». Rapport bibliographique. Université Chouaib Doukkali 13/07/2007 page 8.

[13] Mémoire : appareil de forage, étude et dimensionnement, cas : champs Hassi Messaoud. Université Kasdi Merbah –Ouargla – Année 2012/2013.

[14] "Le forage ". - J.P. NGUYEN -Institut Français de Pétrole (1993).

[15] " Forage rotary: Le treuil ". - American Association of Oil well Drilling Contractors -(1971).

[16] LES MODULES DU FORAGE (M0, M1 ET M2) DOCUMENTS DE SONATRACH. (MARS 2004).MR : DADOU ET SLIMANI.

[17] TOM 1,2,3,4 division forage SONATRACH.

[18] FMEA, Chrysler Corporation, 1986

[19] Textes des conférences, Institut de sûreté de fonctionnement, 18 juin 1991.
[20] Documente de LA METHODOLOGIE AMDEC CRTA novembre 2004.

[21] Dossier technique du CRTA méthodologie AMDEC 2004.

[22] FMEA, Chrysler Corporation, 1986.

[23] Textes des conférences, Institut de sûreté de fonctionnement, 18 juin 1991.

BIBLIOGARAPHIE

[24] BENNECIB SOFIANE, étude analytique FMD d'un banc d'épreuve 500, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar –Annaba,2017.

[25] (OPTIMISATION DE LA FONCTION MAINTENANCE PAR LA METHODE AMDEC par ABDI, Adil en 2013).

[26] HERGON. E, CRESPEAU. H, ROUGER. Ph, Modes de défaillance du processus transfusionnel. Intérêt de l'analyse prévisionnelle de sureté de fonctionnement, Paris: Institut National de la Transfusion Sanguine,.

[27] (Analyse des risques liés à l'opération de forage par la méthode AMDEC par Hamouda Mounir / Benha nia Fatah en 2007/2008)

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

[29] A. Tsoukiàs, "De la théorie de la décision à l"aide à la décision," pp. 1–54.

[30] "ARROW, Kenneth J. Social choice and individual values. Yale university press, 2012.".

[31] "L. A. ZADEH, „Fuzzy sets.," Information Control, vol. 8, p. 338–353, 1965.".

[32] S. Fomba, "Décision multicritère : un système de recommandation pour le choix de l " opérateur d " agrégation Soumana Fomba To cite this version : HAL Id : tel-03726764," UNIVERSITE DE TOULOUS, 2022.

[33] 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.

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

[35] 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.

[36] 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.

BIBLIOGARAPHIE

[37] 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.

[38] S. Abdal, “‘Application of TOPSIS Method in Decision Making Via Soft Set,’” Biomed. J. Sci. Tech. Res., vol. 24, no. 3, 2020, doi: 10.26717/bjstr.2020.24.004045.

[39] G. Rediske, J. C. M. Siluk, L. Michels, P. D. Rigo, C. B. Rosa, and G. Cugler, “Multi criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil,” Energy, vol. 197, pp. 1–16, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117167.

[40] F. Aissanou, “Décisions multicritères dans les réseaux de télécommunications autonomes Farouk Aissanou To cite this version : HAL Id : tel-00997687,” 2014.

[41] F. Sitorus, J. J. Cilliers, and P. R. Brito-Parada, “Multi-criteria decision making for the choice problem in mining and mineral processing: Applications and trends,” Expert Syst. Appl., vol. 121, pp. 393–417, 2019, doi: 10.1016/j.eswa.2018.12.001.

[42] L. Xu and J. Yang, “Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach,” no. 0106, pp. 1–21, 2001.

[43] Y. Qin, Q. Qi, P. Shi, S. Lou, P. J. Scott, and X. Jiang, “Multi-Attribute Decision-Making Methods in Additive Manufacturing: The State of the Art,” Processes, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.3390/pr11020497.

[44] BBURG International GmbH & Co. KG. (s.d.). *Fiche technique – BBURG HD 1500 D*. Mittenwalde, Allemagne. Consulté à partir de : www.bburg.eu

ANNEXE

1-PARC DES ENGINS DE TERRASSEMENT

GENRE	N° ANA	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
BULL/CHEN	713	CATERPILLAR	D9 T	RJS00217	410	2005	MAUVAIS
BULL/CHEN	714	CATERPILLAR	D10T-2	RAB321	722	2017	BON
BULL/CHEN	715	CATERPILLAR	D10T-2	RAB322	722	2017	BON
NIVELEUSE	863	JOHN DEERE	770 G	C678216	320	2017	BON
BULL/PNEUS	826	CATERPILLAR	824 C	85X1404	360	1990	MAUVAIS
BULL/PNEUS	828	CATERPILLAR	834K	00269VL4Y	426 KW	2024	NEUF
Compacteur	866	ENMTP	R7116RL	A157160024	173	2023	NEUF

2-PARC DES ENGINS DE FORATION

GENRE	N°	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
SONDEUSE	610	B BURG	HD1500D	232782		2017	MAUVAIS
MINI SONDEUSE	608	TAMROC	DINO 500	102TS3281	172	2003	MAUVAIS
COMPRESSEUR MOBILE	859	INGERSOLL RAND	XP900 S4	821913		OP/OZ/2011	decortiqué
COMPRESSEUR MOBILE	865	ENMTP	D103	2177		2023	MOYEN
COMPRESSEUR MOBILE	868	ENMTP	D103	2183		2023	MOYEN
SONDEUSE	611	INGER, RAND	T4BH	3703			MOYEN

ANNEXE

3-PARC DES ENGINS DE CHARGEMENT

GENRE	N°	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
CHAGEUSES	841	CATERPILLAR	988F	8YG00505	400	1994	MAUVAIS
CHAGEUSES	862	CATERPILLAR	990K	JDJK00258		2017	MOYEN
CHAGEUSES	867	CATERPILLAR	986	AW7500606		2024	NEUF
PELLE HYD	413	KOMATSU	PC1250-07	20295	485	2005	MAUVAIS
PELLE HYD	414	LIEBHERR	R9100	JZE036066	565	2017	MAUVAIS
PELLE HYD	415	CATERPILLAR	350GC	PWDP-10252	309 KW	2024	NEUF
PELLE HYD	416	HITACHI	ZAXIS870LCR-5G	HCMJBE94J00051229		2024	NEUF

4-PARC DES ENGINS DE TRANSPORT

GENRE	N°	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
CAMION	536	CATERPILLAR	775 F C	DLS00720	552 KW	21/07/2008	MAUVAIS
CAMION	537	CATERPILLAR	775 F C	DLS00719	552 KW	21/07/2008	MOYEN
CAMION	538	CATERPILLAR	775 G	TRFM00917	780	2017	MOYEN
CAMION	539	CATERPILLAR	775 G	PRFM00918	780	2017	MOYEN
CAMION	540	CATERPILLAR	775 G	JRFM00923	780	2017	MOYEN
CAMION	541	CATERPILLAR	775 G	CRFM00924	780	2017	MAUVAIS
CAMION	542	CATERPILLAR	775 G	CRFM01175	780	2021	MOYEN

5-PARC DES ENGINS DE FORATION FOND

GENRE	N°	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
CHARIOT	930	ATLAS COPCO	BUT 201	SIM86166X899		1987	DECORTIQUE
CHARIOT	931	SECOMA	1FPD6	2911		1996	MAUVAIS
CHARIOT	934	SANDVICK/MERC	LC22	3952	60 KW	2006	MOYEN

6-PARC DES ENGINS DE CHARG,&TRANSP, FOND

GENRE	N°	MARQUE	TYPE	SERIE	PCE	ANNEE	ETAT
CHARGEUSE	921	A.COPCO	ST1020	AVOO5X154/8997043200	250 CV	2006	DECORTIQUE
CHARGEUSE	922	A.COPCO	ST1030	AV008X193/8997167900	250 CV	30/07/2008	MAUVAIS
CAMION	933	A.COPCO	MT 2000	DB20P0258	300 CV	2003	MOYEN
CAMION	935	A.COPCO	MT 2000	AV005/206	250 CV	2006	PANNE

Résume :

Dans un contexte industriel de plus en plus concurrentiel, la maintenance industrielle devient un levier stratégique pour réduire les pannes et optimiser la disponibilité des équipements. Ce mémoire vise à améliorer la stratégie de maintenance de la foreuse BBURG 1500 HD utilisée dans la mine de Boukhadra, à travers une approche hybride combinant l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) et les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM), notamment TOPSIS et VIKOR. Cette démarche permet d'identifier les composants les plus critiques, d'analyser les modes de défaillance, puis de proposer des actions correctives hiérarchisées selon une évaluation multicritère rigoureuse.

الملخص:

في سياق صناعي يتسم بالتنافسية الشديدة، تلعب الصيانة الصناعية دورًا استراتيجيًا في تقليل الأعطال وتحسين الأداء التشغيلي للمعدات. تهدف هذه المذكرة إلى تحسين استراتيجية الصيانة لآلة الحفر BBURG 1500 HD المستعملة في منجم بوخضرة، من خلال استخدام طريقة هجينة تجمع بين تحليل أنماط وأسباب الإخفاقات وتأثيراتها (AMDEC) وتقنيات اتخاذ القرار متعددة المعايير (MCDM) مثل VIKOR و TOPSIS. تسمح هذه المنهجية بتحديد أهم الأعطال وترتيبها حسب خطورتها، مما يساعد في اقتراح حلول تصحيحية ذات أولوية وتحسين توافر المعدات وكفاءتها.

Abstract :

In a highly competitive industrial environment, industrial maintenance plays a strategic role in reducing failures and improving equipment performance. This thesis aims to enhance the maintenance strategy of the BBURG 1500 HD drilling machine used in the Boukhadra mine by adopting a hybrid approach that combines Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis (FMECA/AMDEC) with Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) techniques such as TOPSIS and VIKOR. This methodology enables the identification and prioritization of critical failures and the development of corrective actions based on a structured multi-criteria evaluation.