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 الإلكتروميكانيك
Département d'électromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electro Mécanique

Option : Control Technique Et Maintenance Des Véhicules

Contribution A L'amélioration De Fiabilité Du Moteur Diesel Par La Méthode Hybride FMAE / MCDM

Présenté par :

- Houam Badis
- Hamdi Pacha Amer

Devant le jury :

MOUSSA ATTIA	**Président**	MCA	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
AOULMI ZOUBIR	**Encadreur**	MCA	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
ABDERRAZAK AMARA	**Examinateur**	MCB	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025

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 الإلكتروميكانيك
Département d'électromécanique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electro Mécanique

Option : Control Technique Et Maintenance Des Véhicules

Contribution A L'amélioration De Fiabilité Du Moteur Diesel Par La Méthode Hybride FMAE / MCDM

Présenté par :

- Houam Badis
- Hamdi Pacha Amer

Devant le jury :

MOUSSA ATTIA	**Président**	MCA	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
AOULMI ZOUBIR	**Encadreur**	MCA	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**
ABDERRAZAK AMARA	**Examinateur**	MCB	**Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa**

Année universitaire 2024/2025



Remercîment

J'offre ma grande gratitude à Dieu qui m'a aidé à faire ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à mes parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

***Je remercie mon encadrant Mr. ZOUBIR AOULMI pour** les efforts qu'il a déployé, pour m'aider, conseiller et corriger.*

*Je voudrais remercier les membres de jury d'avoir accepté d'examiner mon **travail.***

Je remercie aussi tout le corps enseignant dans l'institut des mines qui a contribué à ma formation universitaire.

Je remercie toute l'équipe de la mine de BOUKHADRA pour leur aide, sympathie et assistance durant mon stage.

En fin, Je remercie tous ceux de près ou de loin qu'ont contribué à la réalisation de ce travail. Trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi

«Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts.

Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».

A mes frères .

A toute ma famille et mes amis ainsi qu'à mes camarades

À ma chère épouse, la prunelle de mes yeux et l'âme de mon cœur.

Hamdi Pacha Amer

Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU

De m'avoir donné la force et le courage de mener
à bien ce modeste travail.
Je tiens à dédier cet humble travail à :
A ma tendre mère et mon très cher père
A ma précieuse sœur . ; A mes chères tantes.

A mes frère
A mes meilleurs amis

A Tous mes amis d'enfance et du long parcours scolaire et universitaire.

A Toute ma famille

Tout ceux qui m'aiment et que j'aime

Houam Badis

Table De Matière

Remercîment…… I
Dédicace…… II
Table des matières…… III
Liste Des Tableaux…… VIII
Table des Figures …… X
Liste Des Abréviations …… XI
Présentation générale du mémoire…… 1

CHAPITRE I : les Moteurs Thermiques Résume Théorique

I.1 : Introduction …… 2
I.2 : Fonctionnement Des Moteurs A Essence Et Diesel A Quatre Temps …… ……. 3
I.2.1 Moteurs A Piston Alternatif …… 3
I.2.1.1 Principe de fonctionnement …… 3
I.2.1.2 Éléments principaux …… 3
I.2.1.3 Cycle à quatre temps du moteur à piston alternatif…… 4
- Les quatre temps …… 4
I.2.1.4 Caractéristiques du moteur …… 4
I.2.1.5 Fonctionnement Du Moteur A Essence A Quatre Temps …… 5
- Les quatre temps …… 5
I.2.1.6 Fonctionnement Du Moteur Diesel A Quatre Temps …… 6
- Les quatre temps …… 6
I.2.1.7 Diagramme Du Cycle A Quatre Temps …… 7
1.3. MOTEUR MULTICYLINDRIQUE …… 9
I.4. Distinction Entre Les Moteurs A Essence Et Diesel …… 9
I.4.1. Comparaison Entre Les Moteurs A Essence Et Diesel …… 9
I.4.2 AVANTAGES DU MOTEUR DIESEL…… 11
I.4.3. INCONVENIENTS DU MOTEUR DIESEL…… 11
I.5 Fonctionnement De La Distribution…… 11
I.5.1. Nécessite Et Structure De La Distribution…… 11
I.5.2. Diagramme De Distribution…… 12
I.5.3. Architecture de la distribution…… 12
✓ Commande de l'arbre à cames …… 12

A. Commande par pignons..... 13

B. Commande par chaîne..... 13

C. Commande par courroie crantée..... 13

✓ Commande des soupapes..... 14

A. Moteurs à arbre à cames latéral et soupapes latérales.....14

B. Moteurs à arbre à cames latéral et soupapes en tête... 14

C. Moteurs à arbre à cames en tête 14

D. Double arbre à cames en tête (DOHC)..... 14

I.6. Fonctionnement des systèmes de graissage et de refroidissement..... 15

I.6.1 Système de refroidissement..... 15

✓ Fonction principale 15

I.6.2 Système de graissage..... 16

✓ Principe de fonctionnement 16

I.7 : conclusion..... 18

CHAPITRE II: maintenance et Optimisation des performances globales DE moteur diesel.

II.1 : Introduction..... 19

II.2 : La maintenance..... 19

II.2.1. : Définition de la maintenance..... 19

II.2.2. : Importance et rôle de la maintenance..... 19

II.2.3. : Les objectifs de la maintenance..... 19

- Objectifs techniques (opérationnels)
- Objectifs économiques
- Objectifs humains et écologiques

II.3 : Les types des maintenances..... 20

II.3.1. : Maintenance Corrective 20

- Maintenance palliative (Dépannage)
- Maintenance curative

II.3.2. : La maintenance Préventive..... 21

- Maintenance systématique:
- Maintenance conditionnelle:
- Maintenance prévisionnelle

II.4 : maintenance d'un moteur diesel..... 21

II.4.1. : LA MAINTENANCE CORRECTIVE..... 21

II.4.2. : MAINTENANCE PREVENTIVE..... 23

- Révision General
- Maintenance préventive (systématique)

II.5 : Optimisation des moteurs diesel : De la fiabilité à la durabilité via la maintenabilité… 25

II.5.1. : La Maintenabilité…… 25

- Définition
- Types de Maintenabilité
  - La maintenabilité intrinsèque
  - La maintenabilité prévisionnelle
  - La maintenabilité opérationnelle
- Calcul de la maintenabilité

II.5.2. : La disponibilité…… 26

- Définition
- Types de disponibilité
  - Disponibilité intrinsèque
  - Disponibilité instantanée

II.5.3. : La fiabilité…… 27

- Définition
- Objectifs de la fiabilité
- Fonction de fiabilité R(t) – Fonction de défaillance F(t)
- Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF)

II.6 : Conclusion…… 30

CHAPITRE III : Améliorer la fiabilité des moteurs diesel par la méthode hybride

III.1 : Introduction…… 31

III.2 : les méthodes d'analyse des risques…… 31

III.2.1. : Méthode FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) ou AMDE…… 31

- Définition
- Principe
- Types d'AMDE
- Caractéristiques essentielles de l'AMDE
- Présentation des résultats d'AMDE

III.2.2. : les Autres types de méthodes…… 35

III.3 : Techniques de Prise de Décision…… 36

III.3.1 : La prise de décision multicritères (MCDM)…… 36

- Définition:
- Classification des méthodes:
  - ✓ Méthode AHP :
  - ✓ La méthode FUZZY-AHP

III.4 : l'hybridation entre FMEA-MCDM…… 43

III.4.1 : Introduction…… 43

III.4.2 : Objectifs de l'hybridation FMEA-MCDM……. 43

III.4.3 : Les étapes de la méthode hybride FMEA-MCDM (AHP)..... 44

III.5 : Conclusion..... 45

Chapitre IV: Étude de cas moteur Caterpillar 3512

IV.1 : Description du moteur Caterpillar 3512..... 46

IV.1.1.: Caractéristiques techniques principales……. 46

IV.1.2.: Applications courantes..... 46

IV.1.3.: Avantages du moteur Caterpillar 3512..... 47

IV.1.4.: Défaillances du moteur diesel Caterpillar 3512..... 47

IV.2 : Application de la méthode FMEC au moteur Caterpillar..... 50

IV.3 : Application de la méthode AHP..... 51

IV.3.1. : Structurer le problème dans une hiérarchie..... 51

IV.3.2. : Construction de la matrice de comparaisons par paires..... 51

IV.3.3. : Calcul des Poids Relatifs..... 52

IV.3.4. : Calcul de l'Indice de Cohérence CI et Ratio de Cohérence CR..... 52

IV.3.5 .: Calcul du score pondéré pour chaque élément……..…. 54

IV.3.6. : Analyse et Recommandations..... 54

IV.4 : Application de la méthode topsis..... 55

IV.4.1 : Créer une matrice de décision..... 55

IV.4.2 : Normaliser la matrice de décision……. 55

IV.4.3 : Calcul des poids à l'aide de la méthode d'entropie et application sur la matrice Normalisée..... 56

IV.4.1.1: Calcul des poids des critères en utilisant la méthode d'entropie... 56

IV.4.4 : Détermination de la solution idéale (PIS) et de la solution anti-idéale (NIS).... 58

IV.4.5 : Calcul des distances euclidiennes aux solutions idéales..... 59

IV.4.6 :Calcul de la valeur de proximité Ci..... 60

IV.4.7 : Diagramme De Classement Des Pannes 61

IV.4.8 : Analyse et Recommandations..... 61

Conclusion générale *63*

Liste Des Tableaux

Tableau I.01 : relatives à la rotation d'un moteur 9

Tableau I-02: comparatif cycle a 4 temps essence et diesel 10

Tableau I.03.: comparativement les valeurs moyennes des moteurs..... 10

Tableau II-01: Maintenance Corrective.....22

Tableau II.02.: Révision General..... 23

Tableau II.03: Suivi Des Entretiens Systématique 25

Tableau III.01: Indice de Fréquence F 34

Tableau III. 02: Indices de Gravité 34

Tableau III. 03: Indice de Non-détection de la défaillance 34

Tableau III. 04: Contenu d'un tableau d'AMDE.....35

Tableau III. 05 : Présentation Déférents Méthodes 35

Tableau III. 06 : L'échelle Fondamentale Pour La Comparaison Par Paires Dans l'AHP 38

Tableau III. 07 : L'échelle fondamentale pour la comparaison par paires dans FUZZY-AHP 40

Tableau IV.01 : Application de la méthode FMEC au moteur Caterpillar..... 50

Tableau IV.02 : R.P.N de moteur 50

Tableau IV.03: La Matrice De Comparaisons Par Paires..... 51

Liste Des Figures

Figure I.1. Schéma Dun Moteurs Diesel à injection directe 2
Figure I.2 : Schéma Dun Moteurs moteur à piston alternatif 3
Figure I.3 : Schéma du moteur à piston alternatif monocylindrique 4
Figure I.4: Rapport volumétrique ou taux de compression 5
Figure I.5 : Les quatre temps du cycle moteur 5
Figure I.6 : Les quatre temps du cycle moteur 6
Figure I.7 : Pression dans la chambre de combustion 7
Figure I.8 : Rendement des moteurs à piston alternatif 11
Figure I.9: Diagramme de distribution 12
Figure I.10 : Transmission par pignons entre le vilebrequin et l'arbre à cames latéral 13
Figure I.11 : Transmission par pignons entre le vilebrequin et l'arbre à cames en tête 13
Figure I.12 : Transmission par chaîne entre le vilebrequin et l'arbre à cames latéral 13
Figure I.13: Transmission par chaîne entre le vilebrequin et l'arbre à cames en tête ..... …13
Figure I.14 : Transmission par courroie crantée le vilebrequin et l'arbre à came en tête 14
Figure I.15: Tendeur auto réglable 14
Figure I.16 : Composants du système de refroidissement 15
Figure I.17: Composants du système de graissage 17
Figure II.1 : Les Types Des Maintenances 20
Figure II.2 : Schématise Les Etats Successifs 26
Figure II.3 : Fonction De Défaillance … 27
Figure II.4 : Fonction Associée 28
Figure II-5 : Courbes Caractéristiques Du Taux De Défaillance 29
Figure III-1: La Démarche De l'AMDE…. 32
Figure III.2 : Classification Des Méthodes MCDM 37
Figure III.3 : Structure De La Hiérarchie AHP 38
Figure III. 4 : Les Etapes De La Méthode AHP. 39
Figure III. 5 : Les Etapes De La Méthode FUZZY-AHP 41
Figure III. 6 : Processus De La Méthode TOPSIS 43
Figure IV. 1 : Moteur CATERPILLAR 3512 46
Figure IV. 2 : Le piston de Caterpillar 47
Figure IV. 3 : Chemise de cylindre 47
Figure IV. 4 : Les soupapes et ses accessoires 48
Figure IV. 5 : Les Bougies de préchauffage 48
Figure IV. 6 : Les Couronne 48
Figure IV. 7 : Vilebrequin De Moteur Caterpillar 49
Figure IV. 8 : Les courroies 49
Figure IV. 9 : Structurer Le Problème Dans Une Hiérarchie 51

Liste Des Abréviations

MCDA : Analyse décisionnelle multicritère (Multi-criteriad ecision-analysis).
MCDM : Prise de décision multi critère (Multi-criteria decision-making).
MODM : Prise de décision objective multiple (Multiple objective decision making).
MADM : Prise de décision à attributs multiples (Multiple attribute decision making).
AHP : le processus de hiérarchie analytique.
TOPSIS : la préférence de commande par similarité à la solution parfaite.
W : le poids de critères.
λ : La racine propre maximale de la matrice de comparaison par paires.
MCDM : Multi-Criteria Decision Making
FUZZY : Logique Floue (en anglais, Fuzzy Logic)
CR : Consistency Ratio (Ratio de Consistance)
RI : Random Index (Indice Aléatoire)
CI : Consistance Index (Indice de Consistance)
D(t) : Disponibilité instantanée
Di : Disponibilité intrinsèque
F(t) : Fonction de défaillance ou de répartition
f (t) : Densité de probabilité de défaillance
M (t) : Fonction de maintenabilité
MINITAB : Logiciel de statistiques et d'analyse de données
MTTR : Moyenne des temps de réparation
MTBF : Moyenne de temps entre pannes
MUT : Moyenne des temps de bon fonctionnement
R(t) : Fonction de fiabilité
TTR : Temps de réparation
TBF : Temps entre défaillances
UT : Temps de bon fonctionnement
λ(t) : Taux de défaillance
β : Paramètre de forme de la loi de Weibull
η : Paramètre d'échelle de la loi de Weibull
μ : Taux de réparation

Présentation générale du mémoire

Le problème de la recherche réside dans les défis liés à la fiabilité des moteurs diesel, qui sont des éléments essentiels dans le fonctionnement des équipements lourds dans le secteur minier. Les moteurs diesel, dans des environnements de travail difficiles, rencontrent de nombreux problèmes tels que des pannes répétées, une usure rapide des composants mécaniques et une difficulté à diagnostiquer les pannes de manière précoce. Ces problèmes entraînent des arrêts prolongés, ce qui a un impact négatif sur la productivité et l'efficacité des opérations minières. De plus, l'augmentation des pannes augmente les coûts de maintenance et de réparation, ce qui contribue à l'augmentation des dépenses d'exploitation et exerce une pression sur les budgets alloués à la maintenance. Ces défis nécessitent donc des solutions efficaces visant à améliorer la fiabilité des moteurs diesel et à renforcer les performances des équipements utilisés dans les mines.

L'objectif de la recherche est d'améliorer la fiabilité des moteurs diesel en utilisant une méthode de hybride combinant l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA) et la prise de décision multicritères (MCDM) . **[1]**
L'application de la méthode FMEA permet d'identifier les défaillances potentielles des moteurs diesel et d'évaluer leurs impacts sur la performance. En identifiant les risques et en les classant selon leur gravité, des solutions appropriées sont choisies à l'aide de la méthode MCDM, qui aide à prendre des décisions éclairées en fonction de plusieurs critères, tels que le coût, l'efficacité et la performance. En combinant ces deux méthodes, la recherche vise à réduire les pannes et à améliorer la performance globale des moteurs, ce qui conduit à une amélioration de la productivité dans les mines et à une réduction des coûts. **[2]**

L'importance de cette recherche réside dans la proposition de solutions innovantes pour améliorer la fiabilité des moteurs diesel dans des environnements de travail difficiles. L'amélioration de la fiabilité des moteurs peut réduire les arrêts imprévus, ce qui améliore l'efficacité opérationnelle et réduit les coûts de maintenance. En outre, cette recherche contribue au développement d'un modèle intégré d'analyse des risques et de sélection des solutions optimales, ce qui peut avoir un impact positif sur la viabilité économique du secteur minier. Grâce à l'application de cette méthode hybride, le secteur minier pourra réaliser des bénéfices concrets en améliorant la durabilité des équipements et en augmentant la productivité.

En ce qui concerne la méthodologie de la recherche, elle repose sur une approche expérimentale pour analyser les données de défaillance et de performance des moteurs diesel dans le secteur minier. Les données relatives aux problèmes et aux pannes des moteurs diesel seront collectées, puis la méthode FMEA sera utilisée pour analyser ces données et identifier les principaux modes de défaillance. Ensuite, la méthode MCDM sera appliquée pour sélectionner les meilleures solutions en fonction de plusieurs critères, notamment le coût, l'impact environnemental et l'efficacité. L'objectif de cette méthodologie est de fournir un cadre pratique permettant d'améliorer la fiabilité des moteurs diesel dans des environnements miniers difficiles et de développer une stratégie globale pour améliorer les performances tout en réduisant les coûts.

Chapitre 1

Les Moteurs Thermiques
Résume Théorique

I.1 Introduction :

Un moteur Diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont semblables et s'ils respectent le même cycle à quatre temps, un moteur Diesel et un moteur à explosion présentent des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange carburé y est enflammé et dans la manière dont la puissance délivrée y est régulée. Dans un moteur à essence, le mélange carburé est en flammé par une étincelle électrique. Dans un moteur Diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant à la suite de l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression. Un moteur à combustion interne fut conçu dès 1678 par le scientifique hollandais Christiaan Huygens. Cependant, il ne fut effectivement construit que beaucoup plus tard. Depuis la carriole motorisée du Suisse Isaac de Rivaz en 1805, en passant par la voiture construite par Etienne Lenoir à Paris en 1863 et fonctionnant au gaz d'éclairage, il a fallut attendre le milieu des années 1880 pour que le moteur à combustion interne puisse être utilisable dans un véhicule destiné au transport des personnes. En 1862, le Français Beau de Rochas inventa le premier cycle à quatre temps. En 1866, les deux ingénieurs allemands Eugen Lang en et August Otto, mirent au point un moteur à gaz et, en 1876, Otto construisit un moteur à quatre temps, à l'origine de la plupart des moteurs à combustion interne ultérieurs pour plus d'information voir

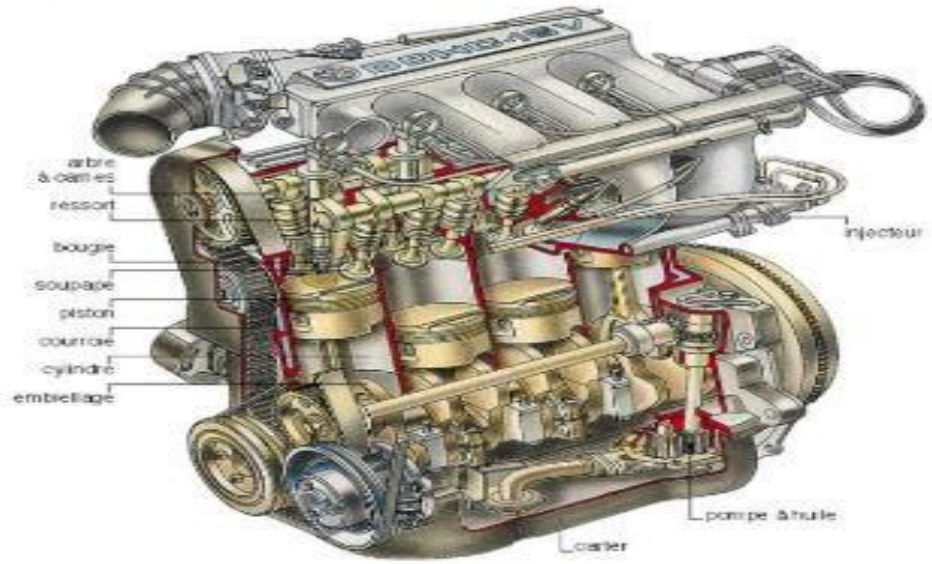


Figure 1-1 : Schéma d'un moteur Diesel à injection direct

I.2 : FONCTIONNEMENT DES MOTEURS A ESSENCE ET DIESEL A QUATRE TEMPS :

I.2.1 Moteurs A Piston Alternatif :

Les moteurs à combustion interne transforment l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. Ils peuvent être à piston alternatif, rotatif, ou à turbine, mais le plus courant est le moteur à piston alternatif.

I.2.1.1 Principe de fonctionnement :

- Le mélange air/carburant est comprimé et enflammé dans une chambre de combustion.
- La combustion crée une pression élevée qui pousse le piston.
- Le mouvement alternatif du piston est transformé en mouvement rotatif par le vilebrequin via la bielle.

I.2.1.2 Éléments principaux :

- Piston coulissant dans le cylindre.
- Culasse avec les soupapes (admission/échappement), contrôlées par l'arbre à cames.
- Le vilebrequin entraîne l'arbre à cames à un rapport de 2:1.
- Deux types : moteur à essence et moteur diesel.

Les moteurs à piston alternatif se divisent essentiellement en moteurs à essence et moteurs diesel **[3]**

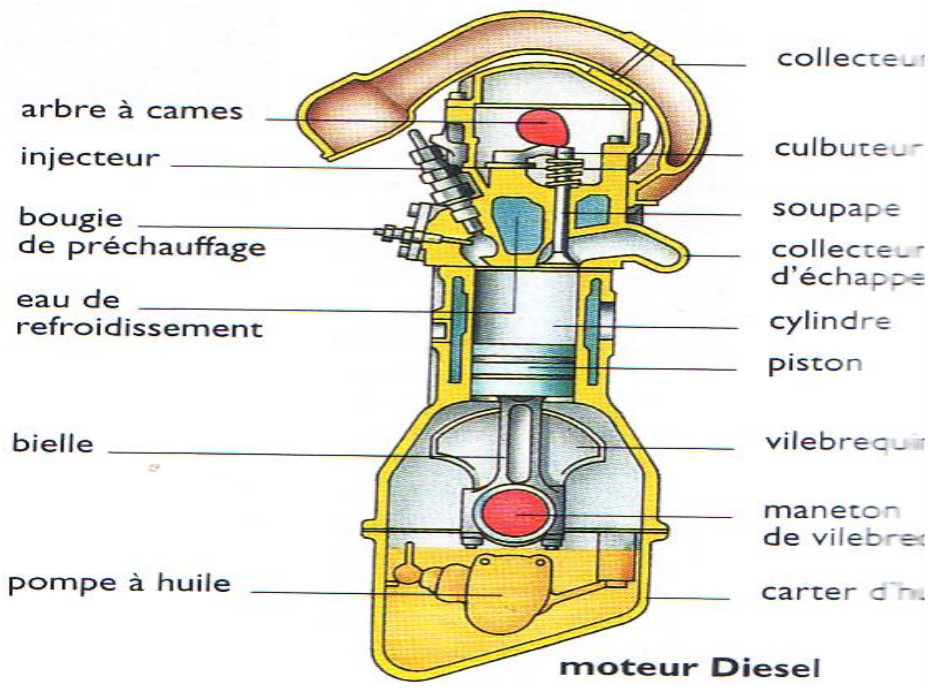


Fig. 1.2 Schéma d'un moteur à piston alternatif

I.2.1.3 Cycle à quatre temps du moteur à piston alternatif

Le cycle moteur transforme l'énergie calorifique du carburant en travail mécanique. Il comprend quatre temps, répartis sur deux rotations du vilebrequin.

- Les quatre temps :

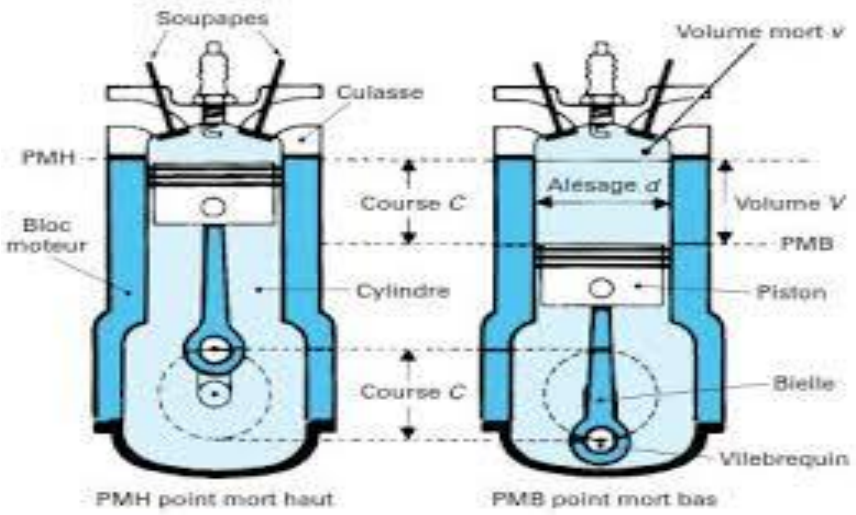


Fig. I.3. Schéma du moteur à piston alternatif monocylindrique

1. Admission
- Le piston descend : le mélange air/carburant est aspiré.
2. Compression
- Le piston remonte : le mélange est comprimé.
3. Allumage – Explosion – Détente
- Une étincelle (moteur essence) ou l'injection de gas-oil (diesel) enflamme le mélange.
- La pression pousse le piston vers le bas : travail moteur.
4. Échappement
- Le piston remonte : les gaz brûlés sont évacués.

I.2.1.4 Caractéristiques du moteur :

- Course : déplacement entre PMH (point mort haut) et PMB (point mort bas).
- Alésage : diamètre du cylindre.
- Cylindrée : volume total de gaz admis dans le cylindre.
- Rapport volumétrique (taux de compression) : rapport entre le volume total et celui de la chambre de combustion.

Remarque :

Le moteur à piston alternatif fonctionne par cycles répétés de quatre temps pour produire un mouvement rotatif. Les moteurs à essence et diesel diffèrent par le type de mélange

et le mode d'allumage, mais le cycle reste identique dans son principe.

$$Rv = \frac{\text{Va} + \text{Ve}}{\text{Ve}}$$

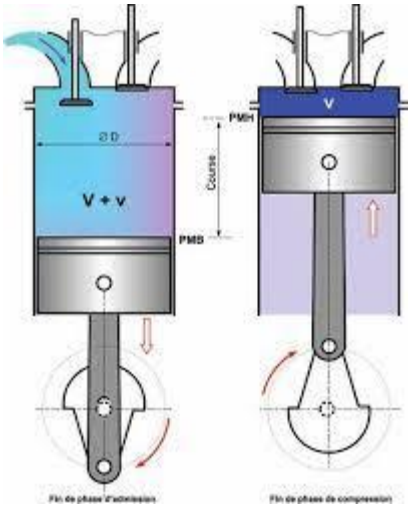


Fig. I.4. Rapport volumétrique ou taux de compression

I.2.1.5 FONCTIONNEMENT DU MOTEUR A ESSENCE A QUATRE TEMPS :

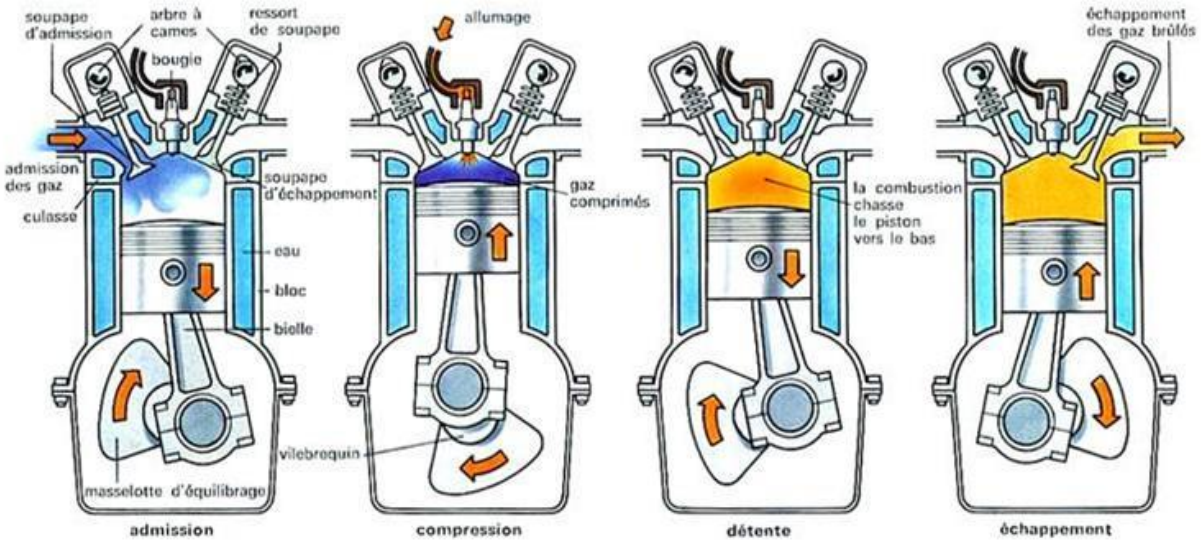


Fig. I.5 Les quatre temps du cycle moteur.

- **Les quatre temps :**

Admission

- Le piston descend, la soupape d'admission s'ouvre.
- Le mélange air-essence est aspiré.
- AOA (Avance Ouverture Admission) et RFA (Retard Fermeture Admission) améliorent le remplissage.

Compression

- Le piston monte, les soupapes sont fermées.
- Le mélange est comprimé, atteint 400–500 °C, 8–16 bars.
- Une étincelle déclenche l'explosion juste avant le PMH (avance à l'allumage).

Combustion / Détente (Explosion)

- La combustion élève la pression (30–60 bars) et la température (2000–2500 °C).
- Cette pression pousse le piston vers le bas : production de l'énergie mécanique.

Échappement

- Le piston monte, la soupape d'échappement s'ouvre.
- Les gaz brûlés sont évacués.
- AOE (Avance Ouverture Échappement) et RFE (Retard Fermeture Échappement) optimisent l'évacuation

Remarques :

Seul le 3e temps produit de l'énergie.

Un volant moteur stocke l'énergie pour compenser les temps résistants.

Le moteur doit être lancé de l'extérieur (démarreur). **[4]**

I.2.1.6 FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DIESEL A QUATRE TEMPS :

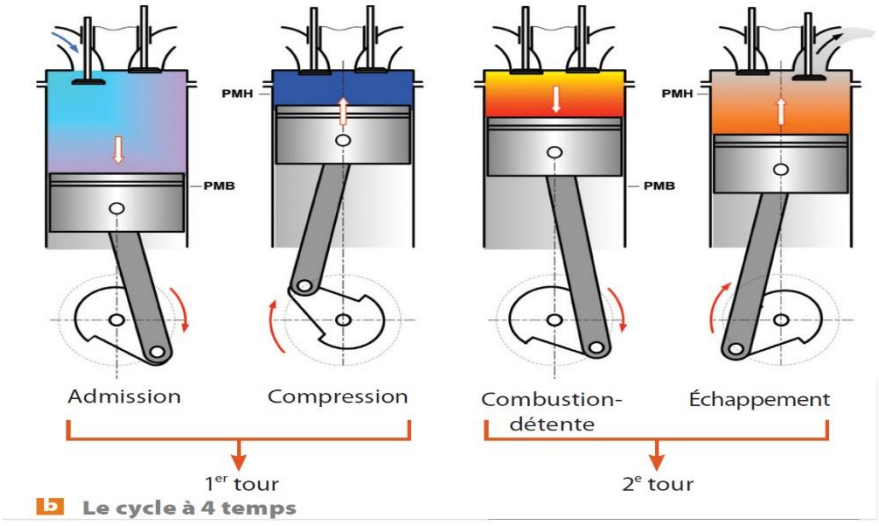


Fig. I.6 Les quatre temps du cycle moteur

- Les quatre temps :

1. Admission

- Air pur aspiré, soupape d'admission ouverte.
- AOA et RFA améliorent le remplissage.

2. Compression

- Air fortement comprimé (30–55 bars, 700–900 °C).
- Le gas-oil est injecté et s'enflamme spontanément (auto-allumage).

3. Combustion / Détente

- L'injection se poursuit pendant la combustion (25 à 40° vilebrequin).
- La pression reste élevée (60–100 bars), poussant le piston.

4. Échappement

- Le piston monte, soupape d'échappement ouverte.
- AOE et RFE assurent une meilleure évacuation des gaz.

I.2.1.7 DIAGRAMME DU CYCLE A QUATRE TEMPS :

- Montre la variation de **pression** en fonction du **volume** du cylindre.
- Les phases :
- Admission : dépression.
- Compression : montée de pression.
- Combustion/détente : pic de pression, puis baisse.
- Échappement : pression diminue.
- Le travail disponible est la différence entre :
- S (zone moteur)
- s (zone de remplissage et d'évacuation)
- Le couple moteur et la puissance sont calculés à partir de la pression moyenne, la surface du piston et la longueur du bras de manivelle. **[5]**

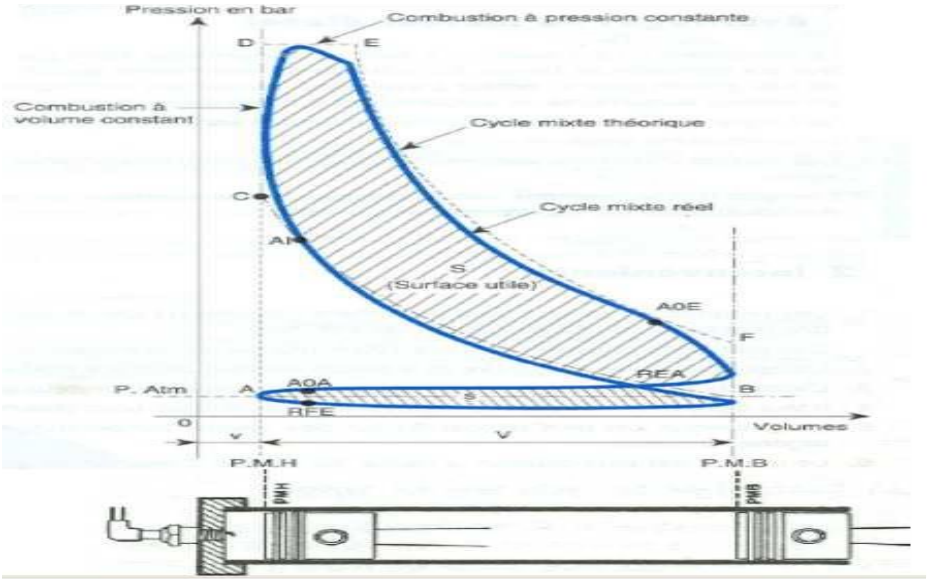


Fig. I.7 Pression dans la chambre de combustion [6]

Le diagramme présente deux zones bien distinctes : l'une S, supérieure, correspond au travail effectivement accompli par les gaz de combustion ; l'autre s, inférieure, correspond au travail absorbé par le remplissage et l'évacuation des gaz. La différence de la surface de ces deux zones représente le travail disponible fourni par un cycle à quatre temps.

T = S – s

Sur la base de ce diagramme, les constructeurs déterminent par le calcul la pression moyenne indiquée qui, en agissant de manière constante pendant toute la course de détente du piston, produit exactement le même travail.

Les constructeurs indiquent généralement la pression moyenne effective qui est légèrement inférieure à la pression moyenne indiquée car le rendement mécanique du moteur y est inclus.

La pression moyenne effective multipliée par la surface plane du piston (surface de la base du cylindre) se traduit par une force fournie par le piston qui agit, par l'intermédiaire de la bielle, sur le vilebrequin.

Cette force multipliée par la longueur du bras de manivelle du vilebrequin donne le moment de rotation ou couple réel du moteur.

La puissance effectivement fournie par le moteur est le travail fourni par le couple moteur pendant l'unité de temps.

Intitulé	**Formule**	**Unité des données**
Cylindrée unitaire (Vu)	Vu =Va + Ve =πA/4 x c+ Ve	π= 3,14 A : alésage : cm C : course : cm Ve : volume de la chambre de combustion : cm^3
Cylindrée totale (Vt)	Vt = Vu x n cylindres	Vu : cm^3
Rapport volumétrique (Rv)	Rv = Va + Ve / Ve	Va : volume généré par le déplacement du piston : cm^3
Longueur du bras de manivelle du vilebrequin (L)	L = C / 2	C : cm
Vitesse moyenne du piston (vm)	vm = 2 C x N/ 60 x 1000	C : cm N : vitesse de rotation : tr / min.
Force fournie par le piston (F)	F = P x S	P : pression des gaz : bars S : surface de la tête du piston : cm
Couple moteur (Cm)	Cm = F x L	F : N L : m
Puissance (Pi)	Pi = Cm x 2 πN/ 60	Cm : Nm N : tr /min.

Rendement mécanique	$\eta = Pu / Pi$ η= 0,8 à 0,9 pour un moteur en bon état η= 0,6 pour un moteur usagé	Pu : puissance utile fournie à l'extérieur du moteur : kW Pi : puissance indiquée produite à l'intérieur du moteur : kW

Tableau I.1 : relatives à la rotation d'un moteur

1.3. MOTEUR MULTICYLINDRIQUE :

- Plusieurs cylindres assurent une rotation régulière et une puissance constante.
- Exemples :

- 2 cylindres → allumage tous les 360°
- 4 cylindres → tous les 180°
- 6 cylindres → tous les 120°
- 8 cylindres → tous les 90°

- L'ordre d'allumage est défini pour équilibrer les cycles moteurs

I.4. DISTINCTION ENTRE LES MOTEURS A ESSENCE ET DIESEL :

I.4.1. Comparaison entre les moteurs a essence et diesel :

A partir de l'étude du cycle à 4 temps du moteur à essence et du moteur diesel, on peut dresser le tableau comparatif suivant :

Temps du cycle	Fonctions assurées dans le moteur à essence	Organes en fonctionnement	Fonctions assurées dans le moteur diesel	Organes en fonctionnement
1. Admission	**Admission d'un mélange air/essence préparé et dosé par le carburateur.**	**Soupapes d'admission. Carburateur ou système d'injection d'essence.**	**Aspiration d'air**	**Soupapes d'admission.**
2. Compression	**Compression du mélange 8 à 16 bar d'ou échauffement à 300°C environ. Rapport volumétrique 6 : 1 à 10 : 1.**		**Compression de l'air très forte 20 à 35 bar d'ou échauffement à 800°C environ. Rapport volumétrique 16 : 1a 24 : 1.**	

En fin de course de compression	**Allumage du mélange par étincelle électrique à la bougie (explosion).**	**Allumeur et bougies d'allumage**	**Injection sous forte pression (100 à 300 bar) du combustible qui s'enflamme spontanément au contact de l'air surchauffé.**	**Pompe d'injection. Injecteurs**
3. Combustion ou explosion	**Combustion et détente**		**Combustion et détente.**	
4. Echappement	**Evacuation des gaz brûlés.**	**Soupapes d'échappement.**	**Evacuation des gaz brûlés.**	**Soupapes d'échappement**

Tableau I.2 : comparatif cycle a 4 temps essence et diesel [7]

L'étude comparative montre aussi que les moteurs à essence et diesel ont des organes qui assurent de fonctions différentes :

- Le moteur à essence comporte un carburateur ou une injection d'essence qui est la composante du système d'alimentation en essence. Ce système prépare le mélange air/essence à l'extérieur du cylindre. La combustion dans le cylindre est provoquée par un système d'allumage à allumeur et à bougies. Une étincelle électrique jaillit entre les électrodes de la bougie afin d'enflammer le mélange par un apport de chaleur.
- Le moteur diesel comporte une pompe d'injection et des injecteurs qui sont les composantes du système d'alimentation en gas-oil. Ce système introduit dans le cylindre une quantité précise de gas-oil sous pression. L'apport du gas-oil forme le mélange à l'intérieur du cylindre. La combustion dans le cylindre se déclenche par auto-allumage contrôlé. **[8]**

Le tableau ci-dessous indique comparativement les valeurs moyennes des données qui caractérisent le fonctionnement des moteurs à essence et diesel :

Exemples de valeurs	**Moteur à essence**	**Moteur diesel pour voiture**	**Moteur diesel pour camion**
Pression moyenne, bars	8 à 11	6 à 8	7 à 10
Couple moteur, Nm	20 à 200	50 à 200	1000 à 1500
Puissance, kW	20 à 200	40 à 100	200 à 400

Tableau I.3 : comparativement les valeurs moyennes des moteurs

I.4.2 Avantages Du Moteur Diesel :

- Meilleur rendement énergétique.
- Couple plus élevé et stable à bas régime.
- Consommation de carburant plus économique.
- Risques d'incendie réduits.
- Moins de gaz toxiques (CO).

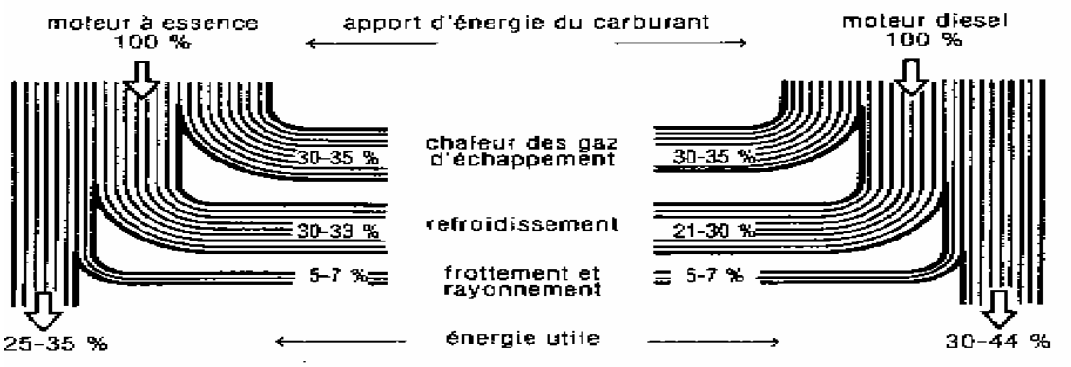


Fig. I.8 Rendement des moteurs à piston alternatif [9]

I.4.3. Inconvénients Du Moteur Diesel :

- Pièces plus robustes donc plus coûteuses.
- Démarrage à froid difficile.
- Refroidissement et graissage plus exigeants.
- Bruit de fonctionnement plus important.

Remarque :

Le moteur à essence utilise un mélange préformé et une étincelle pour allumer la combustion. Le moteur diesel utilise l'air seul, le compression extrême, et une injection directe de carburant pour déclencher l'auto-allumage. Le moteur diesel est plus performant et économique, mais plus complexe et bruyant.

I.5 FONCTIONNEMENT DE LA DISTRIBUTION :

I.5.1. Nécessite Et Structure De La Distribution :

Le système de distribution synchronise l'ouverture et la fermeture des soupapes (admission et échappement) avec la position du piston, selon le cycle à quatre temps.

Il se compose de :

- Commande de l'arbre à cames : transmet le mouvement rotatif du vilebrequin à l'arbre à cames ;
- Commande des soupapes : transmet le mouvement alternatif de l'arbre à cames aux soupapes.

I.5.2. Diagramme De Distribution :

Le **diagramme de distribution** indique les moments précis d'ouverture/fermeture des soupapes par rapport à la rotation du vilebrequin :

- AOA : Avance à l'ouverture d'admission,
- RFA : Retard à la fermeture d'admission,
- AOE : Avance à l'ouverture d'échappement,
- RFE : Retard à la fermeture d'échappement.

Ce diagramme permet le calage précis de la distribution et le contrôle du jeu des soupapes.

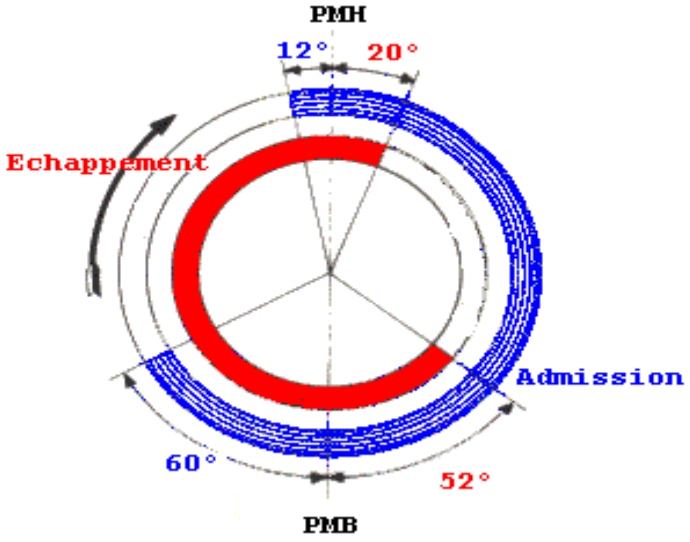


Fig. I.9 Diagramme de distribution

I.5.3. Architecture de la distribution :

Selon la position des soupapes :

- Soupapes latérales : fonctionnement simple et silencieux, mais faible rendement.
- Soupapes en tête : meilleure admission, chambres plus compactes, meilleur rendement.

Selon la position de l'arbre à cames :

- Latéral : dans le bloc moteur, proche du vilebrequin.
- En tête: dans la culasse, souvent associé aux soupapes en tête.

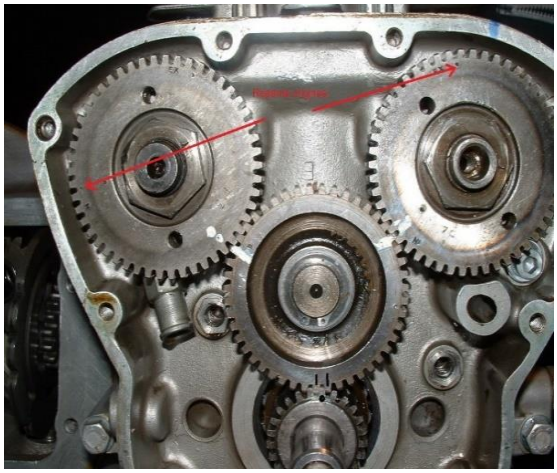


Fig. I.10 Transmission par pignons entre le vilebrequin et l'arbre à cames latéral

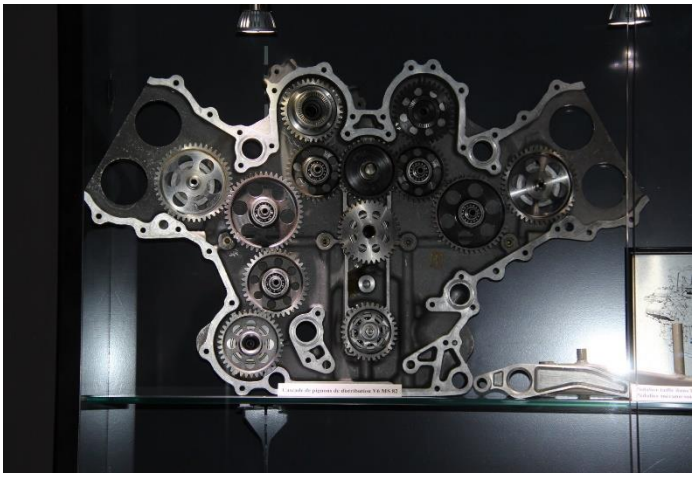


Fig. I.11 Transmission par pignons entre le vilebrequin et l'arbre à cames en tête

✓ Commande de l'arbre à cames :

L'arbre à cames tourne à moitié de la vitesse du vilebrequin. Trois principaux types de commande existent :

A. Commande par pignons

- Transmet le mouvement par engrenages hélicoïdaux ;
- Utilisée quand l'arbre à cames est proche du vilebrequin.

B. Commande par chaîne

- Chaîne simple ou double ;
- Nécessite un tendeur pour éviter le jeu et le bruit ;
- Utilisée pour moteurs à arbre à cames latéral ou en tête.

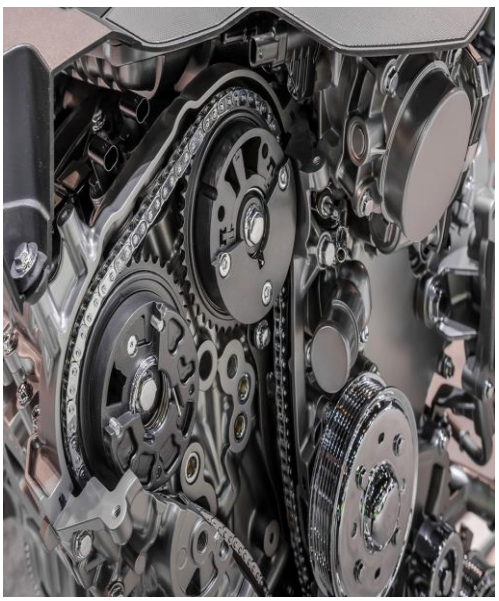


Fig. I.12 Transmission par chaîne entre le vilebrequin et l'arbre à cames latéral

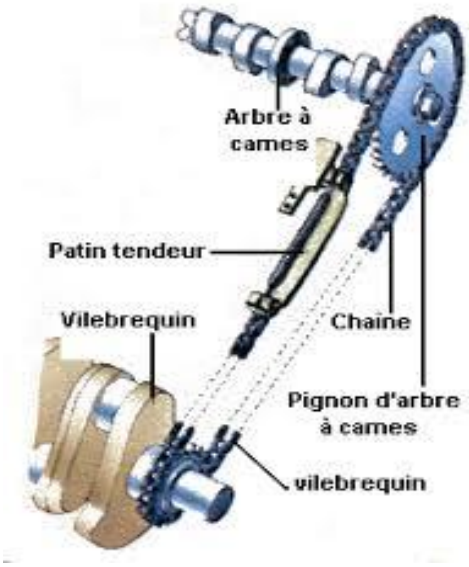


Fig. I.13 Transmission par chaîne entre le vilebrequin et l'arbre à cames en tête

C. Commande par courroie crantée

- Silencieuse, légère et économique ;
- Fonctionne à sec, nécessite un tendeur (réglable ou auto-réglable) ;
- Couramment utilisée dans les moteurs modernes à arbre à cames en tête.



Fig. I.14 Transmission par courroie crantée le vilebrequin et l'arbre à came en tête.

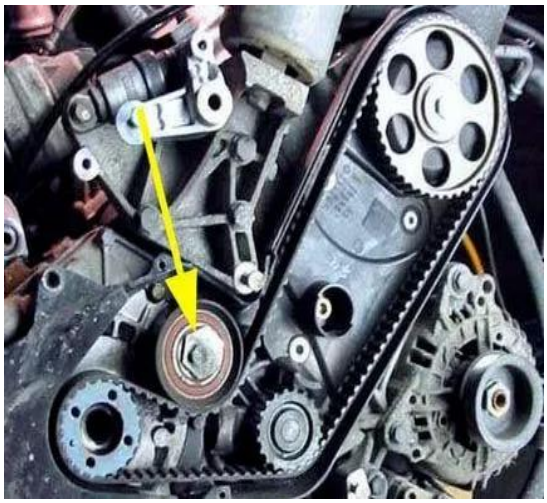


Fig. I.15 Tendeur auto réglable

✓ **Commande des soupapes :**

La transmission du mouvement vers les soupapes varie selon l'architecture moteur :

A. Moteurs à arbre à cames latéral et soupapes latérales

- Poussoir à plateau directement en contact avec la soupape.

B. Moteurs à arbre à cames latéral et soupapes en tête

- Utilisent tiges de culbuteurs et culbuteurs (rampe simple ou double).

C. Moteurs à arbre à cames en tête

- Soupapes commandées par :
  - Linguets,
  - Poussoirs à pastilles (réglables),
  - Culbuteurs (rampe simple ou double),
  - Poussoirs hydrauliques : automatiques, silencieux, sans réglage périodique.

D. Double arbre à cames en tête (DOHC)

- Permet de commander 4 soupapes par cylindre (2 admission + 2 échappement),

- Meilleur remplissage, combustion optimisée, haut rendement.

En résumé :

- La distribution régule le temps d'ouverture des soupapes en coordination avec les cycles du moteur.
- La commande peut être assurée par pignons, chaîne ou courroie.
- La commande des soupapes dépend de la position de l'arbre à cames et de l'architecture du moteur (soupapes en ligne ou en V).
- Les systèmes modernes favorisent les soupapes en tête avec commande hydraulique et double arbre à cames pour plus de précision et de performance.

I.6. Fonctionnement des systèmes de graissage et de refroidissement :

I.6.1 Système de refroidissement :

Pourquoi un système de refroidissement ?

Lors de la combustion dans un moteur à quatre temps, une grande quantité de chaleur est produite. Cette chaleur peut :

- Provoquer la dilatation des pièces,
- Modifier les propriétés des matériaux,
- Dégrader le lubrifiant,
- Réduire le remplissage des cylindres,
- Créer un risque d'auto-allumage.

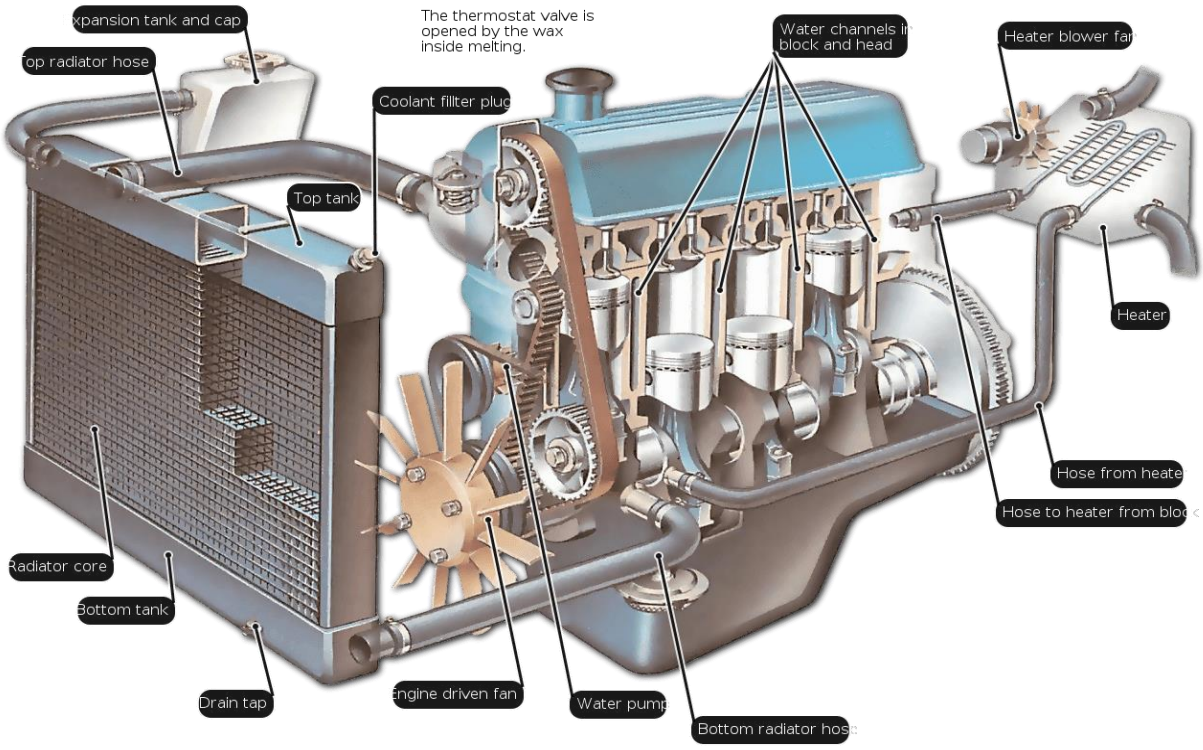


Fig. I.16 Composants du système de refroidissement

✓ **Fonction principale :**

Le système de refroidissement permet :

- Un chauffage rapide du moteur au démarrage,
- Le maintien d'une température stable (environ 90°C).

Principe de fonctionnement :

- À froid (T° < 80°C) : le thermostat renvoie le liquide vers la pompe à eau via un canal by-pass pour réchauffer rapidement le moteur.
- À chaud (T° > 80°C) : le liquide passe par le radiateur, se refroidit, puis retourne dans le moteur.

Principaux composants :

- Radiateur, pompe à eau, thermostat, chambres à eau (culasse et bloc), vase d'expansion, sondes de température, jauge de niveau.

I.6.2 Système de graissage :

Pourquoi un système de graissage ?

Pour éviter les frottements à sec, les échauffements et l'usure prématurée des pièces en mouvement.

Fonctions :

- Réduire les frottements et l'usure,
- Refroidir certaines pièces,
- Améliorer l'étanchéité piston/cylindre,
- Nettoyer les impuretés,
- Réduire le bruit.

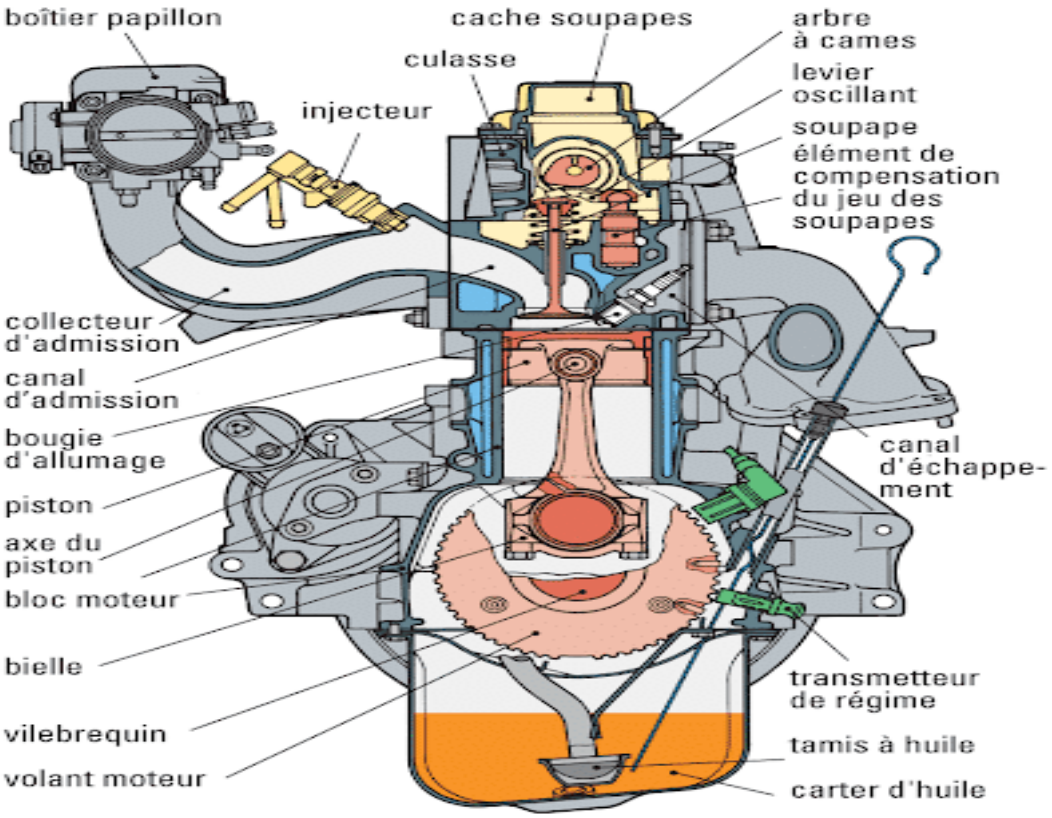


Fig. I.17 Composants du système de graissage

✓ Principe de fonctionnement :

- L'huile est aspirée du carter par la pompe, filtrée, puis envoyée sous pression vers les pièces à lubrifier.
- L'huile retombe par gravité vers le carter après utilisation.

Principaux composants :

- Carter inférieur, pompe à huile, filtre, rampe principale, canalisations vers les paliers, arbre à cames, pistons, turbocompresseur, jauge, manomètre, thermomètre. **[3]**

I.7 : conclusion :

Le moteur Diesel fonctionne différemment du moteur à essence, bien qu'ils partagent un cycle à quatre temps. La principale différence réside dans l'allumage du carburant, qui dans un moteur Diesel se fait par auto-inflammation due à la compression de l'air. L'évolution du moteur Diesel a commencé avec Rudolf Diesel en 1897, et a connu des avancées importantes, notamment en réponse aux crises pétrolières et aux normes antipollution. Il existe plusieurs types de moteurs Diesel, notamment ceux à injection indirecte, à injection directe et à rampe commune, chacun ayant ses avantages et inconvénients en termes de performance, consommation et émissions polluantes.

Le fonctionnement du moteur Diesel repose sur un cycle de combustion à haute pression et température, où le carburant est injecté sous forte pression. Bien que ces moteurs soient réputés pour leur efficacité énergétique, ils émettent des polluants tels que les oxydes d'azote (NOx) et les particules. Avec l'avènement des technologies modernes comme l'injection haute pression et les systèmes de gestion électronique, le rendement des moteurs Diesel s'est amélioré, mais la réduction des émissions reste un défi majeur.

Chapitre 2

maintenance et Optimisation des performances globales DE moteur diesel

II.1 : Introduction :

La maintenance s'inscrit parmi les contraintes que rencontre tout exploitant d'une installation industrielle. Plus généralement, une installation de production nécessitant un ensemble de moyens matériels et humains n'est en mesure d'assurer le service qu'on lui demande qu'après avoir sur monté diverses contraintes, dont la maintenance des équipements de production utilisés. Construire une usine ou un atelier ne sert à rien en l'absence de production significative, ou de personnel qualifié, ou d'un système d'organisation permettant le maintien en état des installations

II.2 : La maintenance :

II.2.1 : Définition de la maintenance :

D'après la norme AFNOR X 60-000(Association française de normalisation), La maintenance est l'ensemble des actions techniques, administrative et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. **[10]**

II.2.2 : 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. Le rôle de la maintenance serait, en définitive, de permettre aux autres services de l'entreprise de remplir leurs fonctions en obtenant le rendement optimum des investissements

II.2.3 : Les objectifs de la maintenance :

C'est la nature de l'entreprise qui dicte les objectifs du service de maintenance clairement définis par une politique bien déterminée à partir de la prise en compte de trois facteurs essentiels :

- ✓ Facteur technique.
- ✓ Facteur économique.
- ✓ Facteur humain et écologique

Objectifs techniques (opérationnels) :

- ➢ Assurer la disponibilité maximale des installations et de l'équipement à un prix rationnel.
- ➢ Fournir un service qui élimine les pannes à tout moment et à tout prix.
- ➢ Pousser à la dernière limite la durée de vie de l'installation (notion de durabilité).
- ➢ Assurer une performance de haute qualité.

Objectifs économiques :

- ➢ Réduire au minimum les dépenses de maintenance et maximiser les profits.
- ➢ Assurer le service de maintenance dans les limites d'un budget.
- ➢ Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé

par les installations et l'appareillage en fonction de son âge et de son taux d'utilisation. **[11]**

Objectifs humains et écologiques :

- Réduire les accidents de fonctionnement (Notion de sécurité) et améliorer les conditions de travail.
- Étudier toute modification, protection à effectuer sur les matériels pour diminuer les risques d'accidents
- Lutter contre la nuisance et préserver l'environnement (échappement de gaz, bruits inhérents, fuites d'huile, …etc.).

II.3 : Les types des maintenances :

On distingue deux types de La maintenance, donnée (Fig. II.1) suivant :

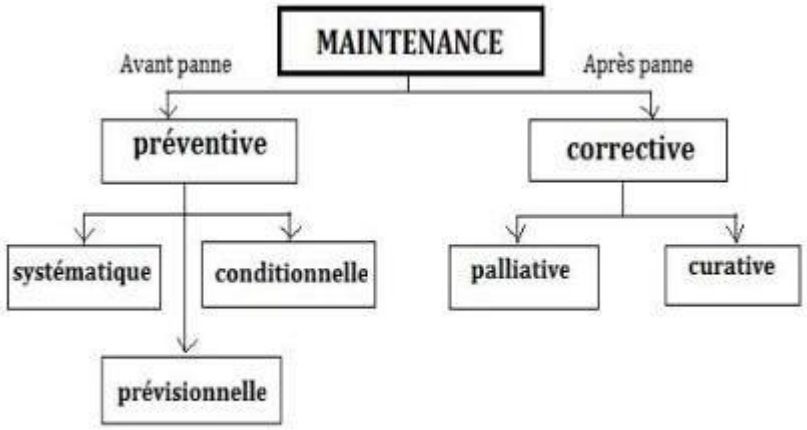


Figure. II.1 : Les types des maintenances **[12]**

II.3.1 Maintenance corrective :

Selon toujours la norme AFNOR « Ensemble des activités réalisées après la défaillance d'un bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement, ces activités comportent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification, le contrôle du bon fonctionnement ».

Il y a deux types de Maintenance corrective

a) Maintenance palliative (Dépannage) : C'est une remise en état de fonctionnement effectuée in-situ parfois sans interruption du fonctionnement de l'ensemble concerné. Elle a un caractère « Provisoire » et doit être suivie par une action corrective durable

b) Maintenance curative : Il s'agit des réparations faites in-situ ou en atelier central parfois après dépannage, ce type de maintenance a un caractère « définitif »

II.3.2 La maintenance préventive :

Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation. Selon l'AFNOR : « La maintenance préventive est une maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ». La fig (II.2) représente la courbe de la maintenance préventive. La maintenance préventive se subdivise en trois types

a) Maintenance systématique: Selon l'AFNOR « Maintenance effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou un nombre prédéterminé d'unités d'usage ».

b) Maintenance conditionnelle: Selon l'AFNOR « Maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé ». Ces indicateurs sont généralement les vibrations, pression, bruit,
température, …etc

c) Maintenance prévisionnelle : Parfois appelée « maintenance prédictive», la maintenance prévisionnelle est, selon l'AFNOR, « Maintenance exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de
l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ». Elle est basée sur l'analyse de
l'évolution des paramètres techniques qui permettent de quantifier l'état du bien et de déceler les dégradations potentielles dès leur apparition, elle permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention devra être réalisée. **[13]**

II.4 : maintenance d'un moteur diesel :

II.4.1 : La Maintenance Corrective :

maintenance exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. Ce **Tableau II-1** représente des exemples réaux de ce type :

N	CAUSE	ACTION
01	Avarie du turbocompresseur par un morceau de siège d'une soupape	Localiser et répare la culasse objet du déboitement du siège de la soupape qui a' induit l' varie du turbocompresseur
02	Présence des particules métallique sur les éléments filtrants du filtre d'huile automatique	Localisation des 2 coussinets le problème Palissage du mouton du vilebrequin Changement des deux coussinets usés par d'autres neufs.
03	Déréglage du bras de commande des pompes injection	Réglage et réparation de l'actionnent et bras de commande des pompes injection
04	Infiltration d'eau dans le carter d'huile de graissage moteur a' travers les cylindres A4 ; A5 et A6	Changement des 03 cylindres A4 ; A5 et A6 et Changement de coussinets
05	Fissuration corps turbo cote turbine	Changement totale du turbo compresseur
06	Tube injecteur éclaté	Changement du tub injecteur
07	L'arrêt pompe préchauffage d'eau défectueuse	Changement de la pompe préchauffage d'eau
08	Refut de démarrage	Entretien de l'électrovanne d'aire de démarrage Entretien de la vanne d'aire de démarrage

Tableau II.1 : maintenance corrective

II.4.2 : Maintenance Préventive :

A) : Révision General

Ce **Tableau II-2** représente des exemples de ce type :

• Nettoyer	- Tamis d'aspiration.
• Contrôler	- Arbres à cames. - Bloc-cylindres. - Amortisseur de vibration du vilebrequin. - Volant moteur. - Pignons avant. - Pignons arrière.
• Contrôler • Rénover	- Culbuteurs.
• Contrôler • Rénover • Remplacer	- Bielles. - Ensembles de culasses. - Pompe d'amorçage de carburant. - Faisceau de refroidisseur d'huile. - Axes de piston.
• Contrôler	- Poussoirs d'arbre à cames. - Rondelles de butée d'arbre à cames.
• Remplacer	- Vilebrequin. - Chemises de cylindre. - Supports du moteur. - Faisceau de câblage du moteur. - Piston. - Poussoirs. - Paliers d'arbre à cames. - Coussinets se bielle. - Bagues d'étanchéité de vilebrequin. - Injecteurs pompe. - Segments de piston. - Joints et soufflets de collecteur d'échappement. - Joint et garnitures de collecteur d'admission.

Tableau II.2: Révision General

B) Maintenance préventive (systématique) :

Maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. On fixe des règles strictes pour déterminer les dates de maintenance selon l'importance d'un équipement dans un système :

- Un âge fixé de l'équipement ; il faut alors disposer d'un moyen pour connaître l'âge de l'équipement durant la vie du système ;
- Un âge fixé du système ; c'est le cas des révisions des automobiles préconisées par les constructeurs ;
- Des dates fixes : elle est plus coûteuse en temps et en pièces de rechange.

Ce **Tableau II-3** représenté les normes qui adapte le travail par ce type de maintenance :

PERIODICITE	TRAVEAUX A EFFECTUER
150h	➢ Vidange de la partie dérivation du filtre d'huile automatique.
750h	➢ Renouvellement d'huile de graissage moteur : retirer l'huile résiduelle aux points bas, vidange du carter. ➢ Changement d'huile du turbocompresseur. Nettoyage des filtres glaciers. ➢ Lubrification des ressorts de l'arbre des bras de commande des pompes d'injection. ➢ Graissage des paliers de l'arbre des bras de commande des pompes d'injection. ➢ Inspection interne du moteur (position des clavettes, bouchons, butée.(… ➢ Contrôle de l'écoulement d'huile de graissage. ➢ Contrôle du serrage des boulons des colliers de serrage…
1000h	➢ Mesure et correction des jeux aux soupapes (adm : 25mm - échappe : 45mm) ➢ Nettoyage du filtre d'air à bain d'huile, entretien des cassettes filtrantes. ➢ Renouvellement d'huile du filtre après nettoyage du carter. ➢ Nettoyage et graissage des ventilateurs de pulsion.
1500	➢ Contrôle des portes-injecteurs, tarage des injecteurs (250 bar.(➢ Soufflage de la boite à bornes alternateur, contrôle des connexions et des borniers. ➢ Soufflage de l'excitatrice.

3000h	➢ Contrôle de fonctionnement des alarmes de sécurité et de la survitesse. ➢ Nettoyage du système de dégazage
5000h	➢ Contrôle des rotateurs des soupapes d'admission. ➢ Contrôle de la flexion première manivelle. ➢ Contrôle de jeu aux coussinets de bielle. ➢ Contrôle de l'actionneur.
200h	➢ Vidange carter d'huile. Nettoyage du filtre d'aspiration.
500h	➢ Vérification des clapets d'aspiration et de refoulement. Nettoyage et rodage.
2000h	➢ Changement des clapets d'aspiration et de refoulement. rodage culasse s'il y a lieu.
40000h	➢ Vérification « embiellages – pistons – segments – cylindres »

Tableau II.3: suivi des entretiens systématiques

II.5 : Optimisation des moteurs diesel : De la fiabilité à la durabilité via la maintenabilité :

II.5.1 : La Maintenabilité :

A) Définition : Dans des conditions données, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. **[14]**

Maintenabilité = être rapidement dépanné

C'est aussi la probabilité de rétablir un système dans des conditions de fonctionnement spécifiées, en des limites de temps désirées, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. A partir de ces définitions, on distingue :

La maintenabilité intrinsèque : elle est « construite » dès la phase de conception à partir d'un cahier des charges prenant en compte les critères de maintenabilité (modularité, accessibilité, etc.).

La maintenabilité prévisionnelle : elle est également « construite », mais à partir de l'objectif de disponibilité.

La maintenabilité opérationnelle : elle sera mesurée à partir des historiques d'interventions. L'analyse de maintenabilité permettra d'estimer la MTTR ainsi que les lois probabilistes de maintenabilité (sur les mêmes modèles que la fiabilité)

Calcul de la maintenabilité

$$M(t = MTTR) = 1 - e^{-\mu t}$$

La maintenabilité peut se caractériser par sa MTTR.

MTTR : **Moyenne des Temps Techniques de Réparation**. $MTTR = \frac{\sum Temps\ d'intervention pour\ n\ pannes}{Nombre\ de\ pannes}$

Taux de réparation μ. $\mu = \left[\frac{1}{MTTR}\right]$

La figure ci-dessous schématise les états successifs que peut prendre un système réparable :

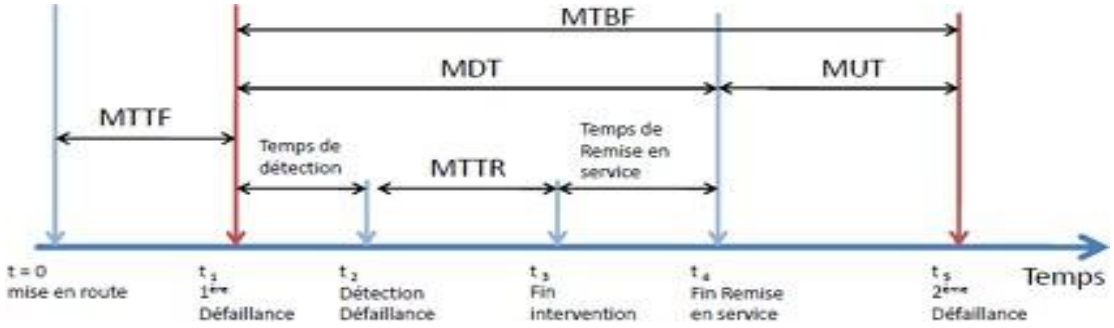


Figure. II.2: schématise les états successifs. **[14]**

II.5.2 : La Disponibilité :

A) Définition : La disponibilité est « l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de la maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées ». **[12]**

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production,
- Être rapidement remis en état s'il est défaillant. La disponibilité relie donc les notions de fiabilité et de maintenabilité.

B) Types de disponibilité :

- Disponibilité intrinsèque : cette disponibilité est évaluée en prenant en compte les moyennes de bon fonctionnement et les moyennes de réparation, ce qui donne.

$$Di = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

- Disponibilité instantanée : Pour un système avec l'hypothèse d'un taux de défaillance λ constante et d'un taux de réparation μ constant, la disponibilité instantanée est

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} + \frac{\lambda}{\lambda+\mu} e^{-(\lambda+\mu)t}$$

La relation entre MUT, MTBF, et MTTR :

MTBF = MUT + MTTR

En général, on utilise les sigles d'origine américaine MTBF, MTTR et MUT, avec le risque de mal se comprendre évoqué au début du paragraphe ; on peut proposer les expressions françaises suivantes pour utiliser exactement les mêmes notions en levant les ambiguïtés :

- TTR= temps de réparation,
- TBF= temps de bon fonctionnement,
- UT= temps entre défaillances.

II.5.3 La Fiabilité :

A) Définition : La fiabilité caractérise l'aptitude d'un système ou d'un matériel à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné.

B) Objectifs de la fiabilité :

La fiabilité a pour objectif de :

- Mesurer une garantie dans le temps.
- Evaluer rigoureusement un degré de confiance.
- Déchiffrer une durée de vie.
- Evaluer avec précision un temps de fonctionnement.
- Déterminer la stratégie de l'entretien.
- Choisir le stock.

C) Fonction de fiabilité R(t) – Fonction de défaillance F(t) : Considérons un matériel dont on étudie la fiabilité. Soit Z la variable aléatoire qui à chaque matériel associe son temps de bon fonctionnement. On choisi un de ces matériels au hasard. Soit les événements A : « Le matériel est en état de bon Fonctionnement à l'instant t » et B : « Le matériel est défaillant à l'instant t $+\Delta t$ » On a alors

$$p(A) = p(T > t) \quad \text{et} \quad p(B) = p(T \leq t + \Delta t)$$

Donc $p(A \cap B) = p(t < T < t + \Delta t)$

$$= F(t + \Delta t) - F(t)$$
$$= (1 - R(t + \Delta t)) - (1 - R(t))$$
$$= R(t) - R(t + \Delta t)$$

On en déduit que $p(B/A) = \frac{p(A \cap B)}{p(A)} = \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{R(t)}$

On appelle fonction de défaillance la fonction F définie pour tout $t \geq 0$

$$F(t) = P(T \leq t)$$

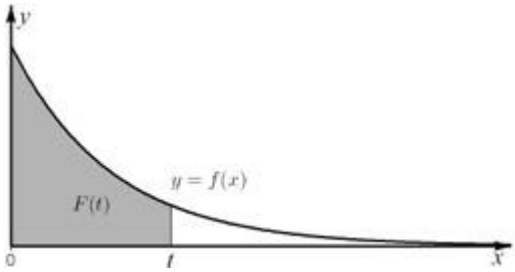


Figure. II.3: Fonction de défaillance

Le nombre F(t) représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard ait une défaillance avant l'instant t. La **Figure. II.3** donne l'allure de cette fonction.

Cette fonction nous amène naturellement une fonction associée : la fonction de fiabilité R définie pour tout **t ≥0** par **R(t)= 1-F(t**). Le nombre **R(t)** représente la probabilité qu'un dispositif choisi au hasard dans la population n'ait pas de défaillance avant l'instant t. La figure II.4 montre les deux fonctions associées.

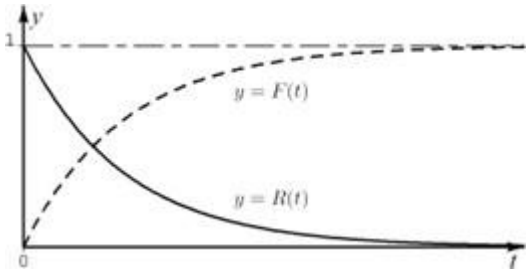


Figure. II.4 : Fonction associée

Le taux d'avarie moyen dans l'intervalle de temps [t, t+ Δt] est alors : $\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{R(t)} \times \frac{1}{\Delta t}$

<u>Taux de défaillance instantané</u> : C'est la probabilité (0≤ R≤ 1) ; un produit doit accomplir de manière satisfaisante une fonction requise, sous des conditions données et pendant une période de temps donné. L'écriture mathématique du taux de défaillance à l'instant t, noté $\lambda(t)$, défini sur R est la suivante :

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0}\left(\frac{1}{\Delta t}.\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{R(t)}\right)$$

Physiquement le terme $\lambda(t).\triangle t$, mesure la probabilité qu'une défaillance d'un dispositif se produise dans l'intervalle de temps [t, t+$\triangle$t] sachant que ce dispositif a bien fonctionné jusqu'à l'instant t

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{d(t)}.\frac{1}{R(t)}$$

$$= \frac{dF(t)}{dt}.\frac{1}{R(t)}$$

$$= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-R(t)}$$

où R est la fonction de fiabilité de ce matériel. On est alors amené à résoudre une équation différentielle du 1er ordre. En effet si λ est connu, la résolution de l'équation différentielle linéaire du 1er ordre :

$$R'(t) + \lambda(t)R(t) = 0$$

Donne la fonction de fiabilité R du matériel. On déduit alors la fonction de défaillance F qui est la fonction de répartition de la variable Z puis la densité de probabilité f de Z qui est la dérivée de F.

On alors : $R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$ et $F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$

D) Indicateurs de fiabilité (λ) et (MTBF) :

Précédemment le taux de défaillance λ a été défini par des expressions mathématiques à travers un calcul de probabilité. On peut également l'exprimé par une expression physique. Il caractérise la vitesse de variation de la fiabilité au cours du temps. La durée de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

$$\lambda = \frac{\text{nombre total de defaillanc es pendant le service}}{\text{duree total de bon fonctionne ment}}$$

1-Temps moyen de bon fonctionnement :

Le MTBF (Mean Time Between Failure) est souvent traduit comme étant la moyenne des temps de bon fonctionnement mais représente la moyenne des temps entre deux défaillances. En d'autres termes, Il correspond à l'espérance de la durée de vie **t**.

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)$$

Physiquement le MTBF peut être exprimé par le rapport des temps

$$MTBF = \frac{\text{somme des temps de fonctionne ment entre les (n) defaillanc es}}{\text{nombre d'interventi on de maintenanc e avec immobilisation}}$$

$$\text{Si } \lambda \text{ est constant : } MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Par définition le MTBF est la durée de vie moyenne du système.

La courbe ci-dessous montre l'évolution du taux des défaillances pour les différentes entités.

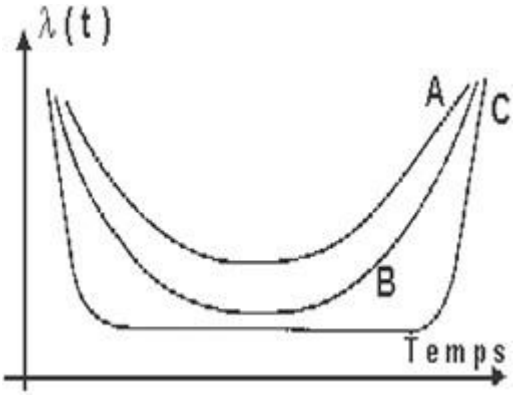


Figure. II.5 Courbes caractéristiques du taux de défaillance

Les courbes du taux de défaillance, figure II.5 ont une même forme générale dite en baignoire, mais présentent néanmoins des différences suivant la technologie principale du système étudié :

A. en mécanique.

B. en électromécanique.

C. en électronique.

II.6 : Conclusion :

Tous les équipements d'une installation industrielle sont soumis à des mécanismes de dégradation dus aux conditions de fonctionnement et/ou d'environnement : usure, fatigue, vieillissement. Face aux défaillances qui en résultent, on peut se contenter de pratiquer une maintenance corrective, mais on n'évite pas ainsi les conséquences des pannes que l'on subit. Une attitude plus défensive consiste à

mettre en œuvre une maintenance préventive destinée à limiter, voire à empêcher, ces défaillances, mais on court alors le risque de dépenses excessives et d'indisponibilités inutiles. Devant cette situation, le responsable de maintenance ne doit plus se contenter de surveiller et de réparer, il doit envisager des stratégies. Une part de son travail consiste à prévoir les événements et à évaluer les différentes

alternatives qui s'offrent a lui pour trouver la solution optimale, ou tout au moins pour s'en rapprocher. Les forces dont il dispose, limitées par ses moyens techniques et financiers, doivent être placées aux bons endroits. C'est dans ce contexte que la maintenance s'est dotée de méthodes qui considèrent à la fois, et plus ou moins, la technique et l'organisation. Les industries de processus ont générale appliquée des démarches alliant une évaluation des risques, une analyse du retour d'expérience, et une logique de sélection de tâches de maintenance. L'Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité

Chapitre 3

Améliorer la fiabilité des moteurs diesel par la méthode hybride

III.1 : INTRODUCTION :

Dans les industries complexes, la fiabilité des systèmes, tels que les moteurs, est un facteur clé pour garantir la performance à long terme et réduire les coûts liés aux pannes. Pour améliorer cette fiabilité, les entreprises s'appuient sur des techniques d'analyse des risques telles que FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), qui aident à identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent, ainsi que HAZOP (Hazard and Operability Study) pour analyser les risques opérationnels.

Cependant, il ne suffit pas seulement d'identifier les risques ; il est également nécessaire de prendre des décisions complexes en fonction de plusieurs critères tels que le coût, l'impact et le temps. C'est là que l'importance des techniques MCDM (Multiple Criteria Decision Making) et MADM (Multiple Attribute Decision Making) entre en jeu, permettant de choisir les solutions optimales en comparant les alternatives selon plusieurs critères.

Pour augmenter l'efficacité de ces outils, FMEA et MCDM sont combinés, permettant une analyse des risques et la détermination d'actions correctives appropriées de manière globale, prenant en compte plusieurs facteurs, ce qui aide à améliorer la performance et à réduire les risques de manière plus précise et efficace.

III.2 : Les Méthodes D'analyse Des Risques :

III.2.1 : Méthode FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) ou AMDE :

A) Définition :

L'AMDE (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets) 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 (AMDE) 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.

B) Principe :

Il s'agit d'une analyse critique consistant à identifier de façon inductive et systématique les risques de dysfonctionnement des machines puis à en rechercher les organes et leurs conséquences. Elle permet de mettre en évidence les points critiques et de proposer des actions correctives adaptées.

C'est une technique analyse qui a pour but d'évaluer et de garantir la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité des machines par la maîtrise défaillance. Elle a pour objectif final l'obtention, au meilleur coût, du rendement global maximum des machines de production et des équipements industriels

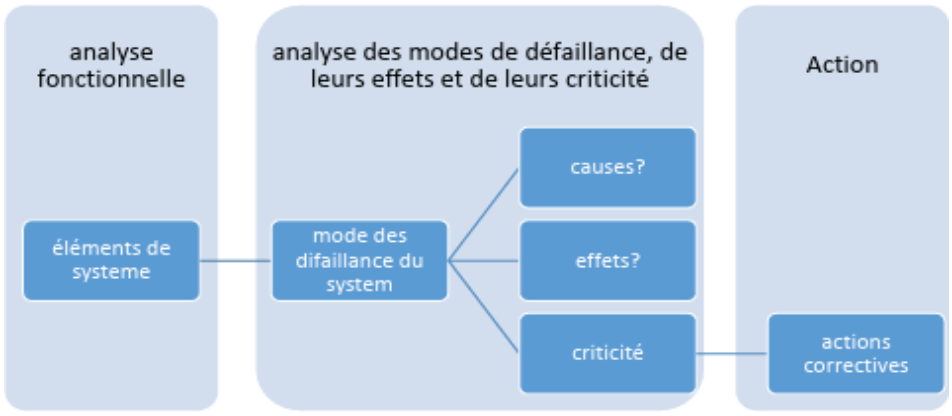


Figure III. 01 : La démarche de l'AMDE

C) Types d'AMDE

Il existe trois types d'AMDE suivant que le système analysé est :

- Le produit fabriqué par l'entreprise
- Le processus de fabrication du produit de l'entreprise ;
- Le moyen de production intervenant dans la production du produit de l'entreprise

D) Caractéristiques essentielles de l'AMDE

L'AMDE est une méthode inductive, rigoureuse et systématique d'analyse des risques. Elle vise à :

- Identifier les modes de défaillance d'un moyen de production.
- Rechercher les causes de ces défaillances, internes (composants) ou externes.
- Évaluer les conséquences sur l'équipement, l'environnement, le produit ou les personnes.
- Proposer des moyens de détection et de prévention.

Objectifs de l'AMDE

- L'AMDE a pour but de rendre un moyen de production :
- Fiable et maintenable, dès la phase de conception.
- Opérationnel avec un minimum de pannes et d'arrêts prolongés.

Pour cela, elle aide à :

1- Assurer la fiabilité intrinsèque de l'équipement.
2- Prévoir les pièces de rechange et les outils adaptés.
3- Réduire les temps d'immobilisation, via des procédures claires (diagnostic, réparation, remise en service).
4- Former les opérateurs et techniciens de maintenance.
5- Mettre en place une maintenance préventive efficace.

Méthodologie de l'AMDE

1. Définition des fonctions du système, des sous-systèmes et des composants.
2. Analyse des défaillances :

- Identification des modes de défaillance.
- Recherche des causes.
- Évaluation des risques.
- Étude des moyens de détection.

3. Hiérarchisation des défaillances via une cotation de criticité, basée sur trois indices :

F : Fréquence d'apparition.

G : Gravité des conséquences.

D : Difficulté de détection.

4. Calcul de l'indice de criticité C :

C=F×G×DC = F \times G \times DC=F×G×D

Criticité et actions correctives

- Un seuil de criticité est défini selon les exigences contractuelles ou technologiques.
- Si C dépasse ce seuil, une action corrective est engagée.
- Même si C est inférieur, des actions sont également prises si F ≥ 4 ou G ≥ 4.

L'AMDE est un outil fondamental de gestion des risques industriels. Elle permet de prévenir les pannes,

améliorer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité des équipements. Elle guide aussi la prise de décision grâce à une évaluation quantitative des risques.

La fréquence (Tab1)

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 (tableau III.1)

Valeurs de F	Fréquence d'apparition de la défaillance
1	Défaillance pratiquement inexistante sur des installations similaires en exploitation, au pl sur la durée de vie de l'installation.
2	Défaillance rarement apparue sur du matériel similaire existant en exploitation (exemple : un défaut par an) ou Composant d'une technologie nouvelle pour lequel toutes les conditions sont théoriquement réunies pour prévenir la défaillance, mais il n'y a pas d'expérience sur du matériel similaire.
3	Défaillance occasionnellement apparue sur du matériel similaire existant en exploitation (exemple : un défaut par trimestre)
4	Défaillance fréquemment apparue sur un composant connu ou sur du matériel similaire existant en exploitation (exemple : un défaut par mois) ou Composant d'une technologie nouvelle pour lequel toutes les conditions ne sont pas réunies pour prévenir la défaillance, et il n'y a pas d'expérience sur du matériel similaire.

Tableau III 01 : Indice de Fréquence F

- **La gravité (Tab2)**

Généralité sur l'analyse des risques 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

Valeurs de G	Gravité de la défaillance
1	**Défaillance mineure** : aucune dégradation notable du matériel (exemple : TI 10 min).
2	**Défaillance moyenne** nécessitant une remise en état de courte durée (exemple 10 min < TI 30 min).
3	**Défaillance majeure** nécessitant une intervention de longue durée (exemple 30 min < TI 90 min) Ou Non-conformité du produit, constatée et corrigée par l'utilisateur du moyen de production
4	**Défaillance catastrophique** très critique nécessitant une grande intervention (exemple TI > 90 min) Ou Non-conformité du produit, constatée par un client aval (interne à l'entreprise) ou Dommage matériel important (sécurité des biens)

Tableau III 02 : Indices de Gravité

- **Indice de détection (**Tab3)

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

Valeurs de D	Non-détection de la défaillance (1)
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**.
(1) Signes avant-coureurs : bruit, vibration, accélération, jeu anormal, échauffement, visuel...	

Tableau III 03 : Indice de Non-détection de la défaillance

E) Présentation des résultats d'AMDE

A la fin d'une analyse par la méthode AMDE les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableau a colonnes (tableau 4).

AMDEC	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									AMDEC MACHINE
	SYSTEME..... SOUS-SYSTEME.....			PHASE DE FONCTIONNEMENT:		DATE DE L'ANALYSE:				PAGE
Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité				Action corrective
						F	G	N	C	

Tableau III 04 : Contenu d'un tableau d'AMDE

III.2.2 : les Autres types de méthodes

Méthode	Objectif	Avantage	Inconvenant	Formalisme de représentation	Domaine d'application	Outil informe
(APD) Analyse préliminaire des dangers	*Déceler les risques et leurs causes, identifier les éléments dangereux et les situations dangereuses ainsi l'accident potentiel.	*Mise en évidence et rapidement les dangers les plus importants. *Déterminer les causes et les conséquences de l'action corrective de telle situation dangereuse.	*Donne des résultats grossiers.	Remplir un tableau à colonne	-Système technique. -Système de production.	Non
AMDE-AMDEC	*Identifier es défaillances des éléments d'un système d'en étudie les effets.	*Examens systématique des composants. *Moyen de représentation des connaissances par animation de groupe. *Mise en évidence les défaillances simples. *Point de départ des autres méthodes (AdD).	*Ne présente pas les combinaisons d'événement. *Notion par de notion de mathématique. *Méthode longue et fastidieuse. Ne permet pas une évaluation quantitative.	Tableau	Fiabilité des systèmes.	Non
HAZOP	Remplir un tableau qui possède un certain nombre de mot clés destines à guider l'analyse. *Analyse cause conséquence des événements possibles	Plus ouverte et créative. *Analyse plus fuit que l'PAR. *Identifier les dangers et les disfonctionnements d'une installation. *Analyse systématique des causes conséquences.	Application particulière (système thermo hydraulique). *Difficile d'affecter les mots clés a une fonction.	Tableau	Sécurité du système (système thermo hydraulique).	
MDCC	*Combiné les principes utilisé par l'AdD et de l'arbre de conséquence (MACQ) identifier et évaluer quantitativement les scénarios envisageables conduisant à des accidents	*Permet d'identifier simultanément les causes et les conséquences d'un événement initiateur. *Elle a théoriquement les avantages de la AdA et de la AdE.	L'analyse quantitative combine les analyses de l'AdD et AdE et les programmes informatiques sont limités à des diagrammes causes conséquences particulières. *Elle sembler difficilement utilisable pour un ensemble complexe systèmes* élémentaires	Arbre binaire Diagramme logique combinatoire.	Fiabilité et sécurité des systèmes.	Oui
AdE	Identifier les événements inacceptable conduisant à la défaillance du système et calcule la probabilité d'occurrence, pour chacun des événements. Construction de l'arbre développée et ensuite le traitement.	*L'élaboration des chemins de succès et les coupes de panne du système étudié. *L'élaboration des séquences, ces des événements initiateurs sous un arbre. *Combinaison avec d'autres méthodes (AdD, GDM) pour l'évolution de la probabilité de l'évènement initiateur. *Met en évidence les interactions entre système élémentaires.	*Elle ne permet pas de justifier l'apparition des événements initiateurs. *Nécessite d'autre méthode pour l'analyse des événements initiateurs.	Arbre binaire	Fiabilité et sécurité des systèmes technique. Fiabilité humaine.	

Tableau III 5 : présentation déférents méthodes d'analyse

III.3 : Techniques de Prise de Décision :

Introduction :

Le processus décisionnel est l'une des tâches les plus importantes qu'une entreprise puisse accomplir et la base de son succès. Où le succès ou l'échec de l'entreprise dépend de l'exactitude et de la qualité des décisions prises. La diversité des méthodes et le grand nombre de décisions ont conduit à la mise en place d'un technique décisionnel multicritère MCDM par la contribution des décideurs. Là où la technologie MCDM prend une grande importance dans les techniques de gestion de l'énergie durable qui contiennent des solutions aux problèmes et améliorent la qualité et les rendent plus claires, rationnelles et efficaces.

Dans ce chapitre, on va présenter au premier lieu une définition des méthodes d'aide à la décision multicritères avec leurs principales classifications. En second lieu on a choisi six méthodes pour les présentés en détails. (Trois pour chaque classification selon l'intérêt de notre étude). Chaque méthode parmi les six sera détaillé dans ce chapitre en présentant les principales étapes et processus d'élaboration de chaque méthode.

III.3.1 : La Prise De Décision Multicritères (MCDM) :

A) Définition :

La prise de décision multicritères (MCDM) est un outil de prise de décision qui aide les décideurs à choisir la meilleure solution parmi plusieurs options et alternatives et à développer différentes méthodes pour résoudre processus de prise de décision complexe dans (MCDM) en utilisant plusieurs méthodes avec MCDM (FUZZYAHP), (BWM, (DEMATEL), (TOPSIS) et (SAW). **[15]**

B) Classification des méthodes :

La classification des méthodes multicritères peut être faite selon les informations qu'il sera possible d'extraire. Pour cette raison, il est important de faire un choix sur la méthode à adopter pour le traitement du problème. On peut distinguer les méthodes actuelles trois groupes de classifications :

✓ Les méthodes d'agrégations.

✓ La méthode interactive.

✓ Les méthodes de sur classement.

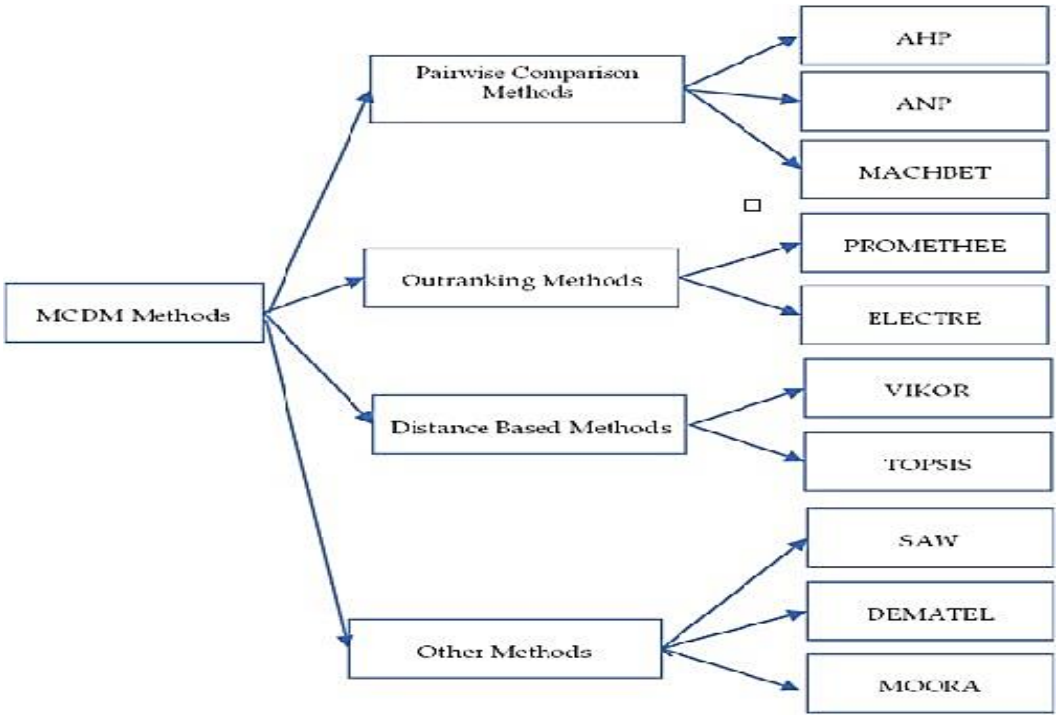


Figure III. 2 : Classification des méthodes MCDM

- ✓ **Méthode AHP :**

Le processus de hiérarchie analytique est l'une des méthodes MCDM les plus utilisées et aide à comprendre le problème et à choisir une décision qui correspond à l'objectif des spécialistes. Sa force réside dans sa facilité de compréhension en général. Le programme AHP désassemble d'abord le problème de décision d'origine dans une structure hiérarchique et contient l'objectif de décision, les alternatives, les critères et la comparaison pour obtenir les priorités de tous les éléments. **[16]**

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

Etape 1 : Structurer le problème dans une hiérarchie

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

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. **[17]**

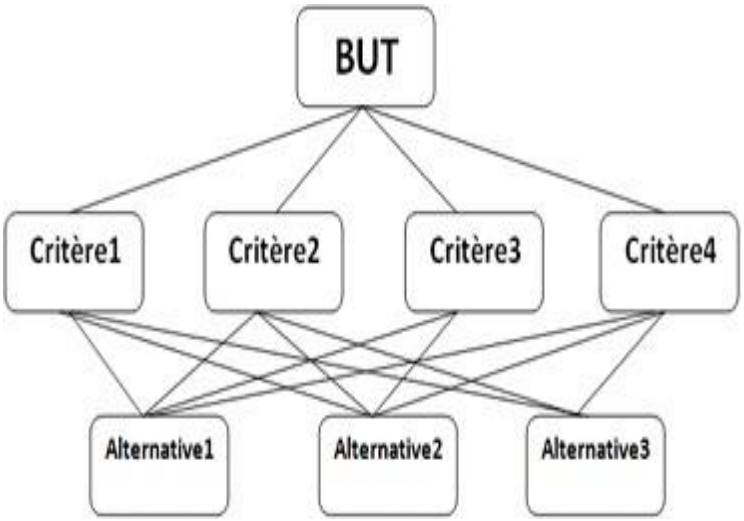


Figure III. 3 : Structure de la hiérarchie AHP

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 **[17]**

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 troisième étape consiste à vérifier la cohérence des matrices de comparaison par paires et nécessite le calcul de l'indice de cohérence (CI). Valeur propre de la matrice et n est le nombre de lignes

indépendantes dans la matrice **[18]**. Si la matrice est parfaitement cohérente alors :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - N}{N_1} \qquad \lambda_{max} = \sum_{j=1}^{n} \frac{(s.A)_j}{(n.A)_j}$$

Etap4 : Synthétiser les priorités finales :

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

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

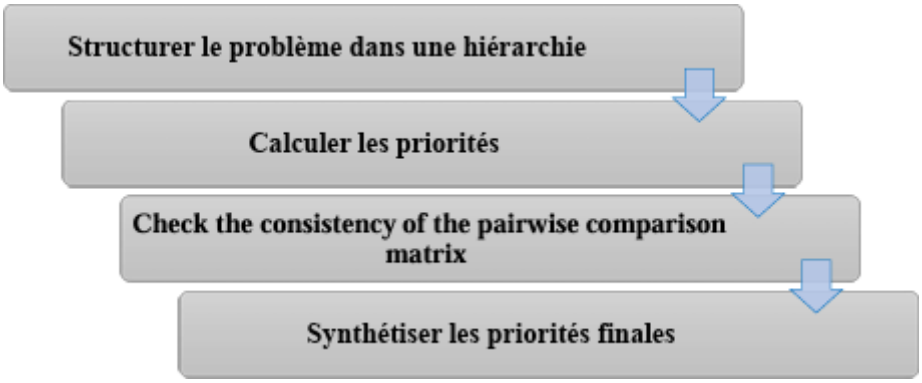


Figure III. 4 : les étapes de la méthode AHP.

✓ **La méthode FUZZY-AHP :**

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

Avec une incertitude dans la pensée et la perception humaines. Clusters flous de type 2 Clusters flous de type 1 généralisés, ce qui crée plus d'incertitude lors de la définition de la fonction d'appartenance.
Certains problèmes de prise de décision floue multicritères sont étendus à l'aide d'ensembles flous de type 2. Les ensembles généraux d'ambiguïté de type 2 étant plus complexes, l'utilisation d'ensembles flous d'intervalle de type 2 a été proposée pour traiter l'incertitude. Maillage Pro Flou **[17]**

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 III .7

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 **[17]**

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

$$r_i = (a_{il} \otimes ..... \otimes a_{im})^{1/n} \forall_i$$

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

$$Ui = \sum_{i=1}^{n} W_i, r_{ij}$$

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

Etape 3 : Obtention de super matrices :

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

Etape 4 : Calcul des pondérations alternatives :

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

Etape 5 : Sélection de la meilleure alternative :

Sélection de la meilleure alternative Enfin, une alternative qui a le poids maximum est sélectionnée parmi toutes les alternatives comme étant la meilleure alternative. **[17]**

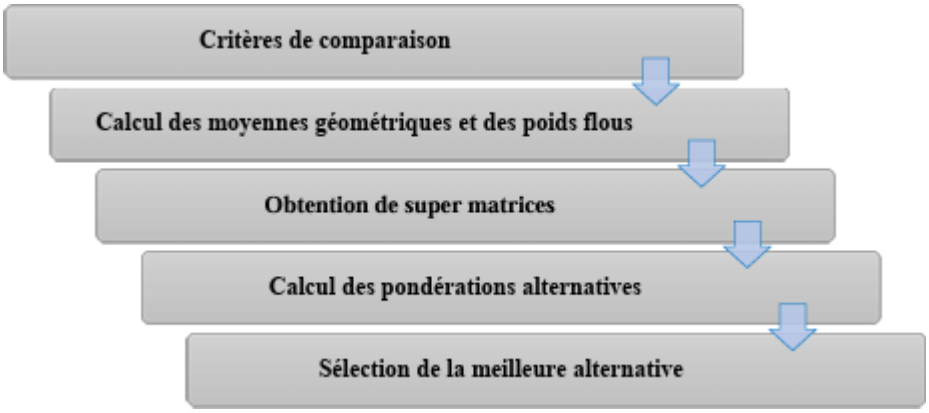


Figure III. 5 : les étapes de la méthode FUZZY-AHP **[17]**

✓ **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 estque les critères doivent être soit croissants soit décroissants de manière monotone afin que PIS et NIS puissent être facilement identifiés **[19].** Le processus TOPSIS génère d'abord la matrice de décision $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{aij})\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ calcule ensuite la matrice mise à l'échelle $\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{rij})\ \boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$ et la matrice pondérée La matrice normalisée $\boldsymbol{T} = (\boldsymbol{tij})$ $\boldsymbol{m}\times\boldsymbol{n}$ La solution parfaite $\boldsymbol{S}$ + et la solution anti parfaite S- sont Déterminé sur la base de la matrice échelonnée-pondérée. Ensuite, il calcule la deuxième dimension La distance euclidienne de l'alternative i à la solution idéale $\boldsymbol{S}$ + et l'inverse Solution S- afin d'obtenir la proximité relative de chaque alternative à l'idéal La solution. L'ordre des alternatives dépend de la valeur de leur proximité relative Comme indiqué dans les étapes suivantes . **[20]**

Etape 1 : La matrice de décision est générée :

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

Etape 2 : La matrice de décision doit être normalisée :

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

$$X^{-} = L_{ij} = \frac{Xij}{\sqrt{\sum X^2}} \mathbf{i = 1, 2 \ldots., m,\ j = 1, 2, \ldots., n}$$

Etape 3 : Détermination de la matrice :

Déterminer la matrice de décision normalisée pondérée (WNDM) en multipliant chaque élément de chaque colonne de la NDM par les poids calculés par la **méthode d'entropie** croisée, obtenant ainsi une matrice de décision pondérée.

$$\mathbf{V= } \boldsymbol{Vij = Wi * Lij}$$

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 :

$$\boldsymbol{NIS = I^{-} = \{V^{-1}, V^{-2}, \ldots.. V^{-m}\}\ ;\ ou}$$

$$\boldsymbol{V^{-i} = \{(min\ (V^{-}ij)\ if\ m\ \varepsilon\ J\ ;(maxi\ V^{-}ij\ if\ m\ \varepsilon\ J')\}}$$

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

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

Distance de séparation entre PIS et NIS de chaque alternative. Tapez une équation ici.

$$\boldsymbol{Si+ = \left[\sum_{i=1}^{m}\left(V_i^{+} - V_{ij}\right)^2\right]^{0.5}} \quad \mathbf{,i=1,2,\ldots,m}$$

$$\boldsymbol{Si- = \left[\sum_{i=1}^{m}\left(V_i^{-} - V_{ij}\right)^2\right]^{0.5}} \quad \mathbf{,i=1,2,\ldots,m}$$

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 :

$$\boldsymbol{P_i = \frac{S_i^{-}}{(S_i^{+} + S_i^{-})}},\ \mathbf{0 \le P_i \le 1}$$

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 **.[19]**

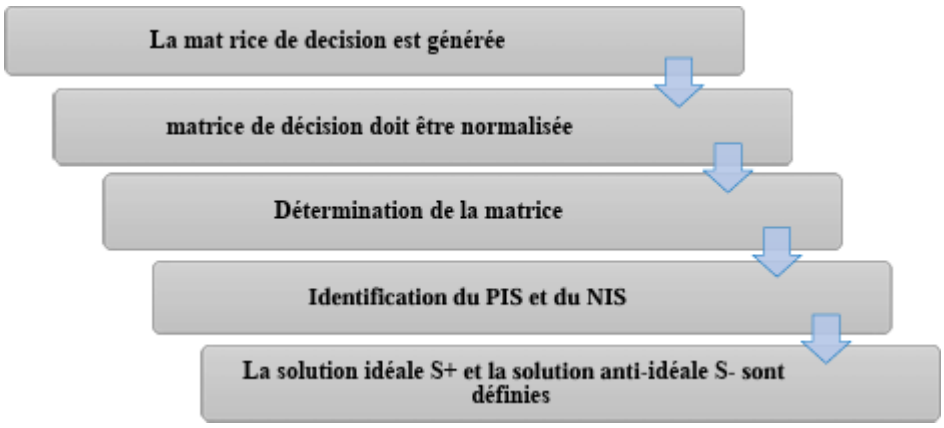


Figure III. 6 : Processus de la méthode TOPSIS. **[19]**

III.4 : L'hybridation Entre FMEA-MCDM :

III.4.1 : Introduction :

Le mariage de l'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (FMEA) avec les méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) est devenu un outil puissant pour la gestion des risques et l'amélioration des performances dans des systèmes complexes tels que les moteurs diesel. Dans ce cadre, la méthode de l'analyse hiérarchique (AHP) a été choisie pour fournir un cadre structuré permettant de hiérarchiser et de prioriser les modes de défaillance dans un moteur diesel. En combinant FMEA avec AHP, il devient possible d'identifier les facteurs ayant un impact significatif sur la performance du moteur, tels que les défaillances mécaniques, l'usure ou les problèmes liés au carburant, puis de prioriser leur traitement en fonction de la gravité de leurs effets, de leur probabilité d'occurrence et de leur facilité de détection.

La méthode AHP permet une évaluation précise de l'importance de chaque mode de défaillance en fonction de critères spécifiques, ce qui réduit les biais humains et améliore la précision des évaluations. De plus, l'intégration de FMEA avec AHP offre un modèle global de gestion des risques, permettant aux concepteurs et ingénieurs de définir de manière logique et séquentielle les priorités des actions préventives et correctives. Cette synergie contribue à améliorer la fiabilité des moteurs diesel en garantissant une classification précise des problèmes critiques susceptibles d'affecter les performances et la sécurité. Ainsi, ce modèle améliore la prise de décision et permet d'assurer des processus de maintenance plus efficaces et plus performants dans l'industrie des moteurs.

III.4.2 : Objectifs de l'hybridation FMEA-MCDM :

- **Améliorer la hiérarchisation des risques**
  - ✓ FMEA utilise traditionnellement le **RPN (Risk Priority Number)** basé sur trois critères : Gravité, Occurrence et Détection. Cependant, cette approche a des limites, notamment en termes de pondération et d'interprétation.
  - ✓ L'intégration de **MCDM** (comme AHP, TOPSIS, VIKOR, etc.) permet une évaluation plus précise et pondérée des risques en tenant compte de plusieurs critères et en éliminant les biais de pondération égale.

- **Réduire les subjectivités et les incertitudes**
  - ✓ L'utilisation de méthodes multicritères permet d'introduire des techniques avancées comme la logique floue (Fuzzy logic) ou l'analyse d'ensemble floue (Fuzzy MCDM) pour gérer l'incertitude et l'imprécision des évaluations humaines.
- **Optimiser la prise de décision**
  - ✓ MCDM aide à comparer différentes stratégies de prévention ou d'atténuation des risques en prenant en compte plusieurs paramètres décisionnels.
- **Accroître la robustesse et la fiabilité de l'analyse des risques**
  - ✓ La combinaison des deux méthodes permet d'obtenir un classement plus fiable des modes de défaillance, rendant ainsi l'analyse plus robuste et pertinente pour des applications industrielles complexes.

III.4.3: Les Etapes De La Méthode Hybride FMEA-MCDM (AHP) :

Phase 1 : Identification et évaluation des modes de défaillance (FMEA)

- ✓ Identification des PFMs
- ✓ Évaluation selon S (Gravité), O (Occurrence), D (Détection)

Phase 2 : Pondération des critères via AHP

- ✓ Structuration de la hiérarchie des critères
- ✓ Comparaison en paires
- ✓ Attribution des pondérations

Phase 3 : Priorisation des modes de défaillance

- ✓ Calcul des scores agrégés
- ✓ Classement des modes critiques

Phase 4 : Analyse des influences et relations entre PFMs

- ✓ Évaluation des impacts globaux
- ✓ Identification des interdépendances

Phase 5 : Décision et mise en œuvre des actions correctives

- ✓ Définition des actions préventives et correctives
- ✓ Planification de la maintenance
- ✓ Amélioration continue

III.5 : Conclusion :

L'approche hybride **FMEA-MCDM** améliore la fiabilité des moteurs diesel en optimisant l'analyse et la hiérarchisation des risques. Elle surmonte les limites du RPN en intégrant des méthodes multicritères comme **AHP, TOPSIS ou VIKOR**, réduisant ainsi l'incertitude et la subjectivité. Cette méthodologie permet une meilleure gestion des défaillances, **une maintenance plus efficace et une augmentation** de la durée de vie des équipements. Son adoption contribue à une réduction des coûts, **une amélioration des performances** et une sécurité accrue des moteurs diesel

Chapitre 4

Étude de cas moteur Caterpillar 3512

IV.1 : Description du moteur Caterpillar 3512 :

Le moteur Caterpillar 3512 est un moteur diesel haute performance conçu pour des applications industrielles lourdes. Il est largement utilisé dans les secteurs de la production d'énergie, du minier, du maritime et de l'industrie pétrolière et gazière. Sa conception robuste et sa fiabilité en font un excellent sujet d'étude pour l'amélioration de la fiabilité des moteurs diesel



Figure IV.01 : moteur Caterpillar 3512 **[21]**

IV.1.1. Caractéristiques Techniques Principales :

- **Type de moteur** : Diesel, 4 temps
- **Disposition des cylindres** : V12
- **Alésage x Course** : 170 mm × 190 mm
- **Cylindrée totale** : Environ 52 litres
- **Plage de puissance** : 1000 à 2500 ch (746 à 1864 kW), selon la configuration
- **Taux de compression** : Variable en fonction des applications
- **Système d'injection** : Injection directe avec gestion électronique
- **Refroidissement** : Système de refroidissement par eau
- **Suralimentation** : Turbocompresseur avec aftercooler (intercooler)
- **Normes d'émissions** : Conforme aux réglementations (EPA, IMO, Tier 2, Tier 3, etc.)

IV.1.2. Applications Courantes :

Le Caterpillar 3512 est un moteur polyvalent qui trouve son application dans plusieurs domaines :

- **Groupes électrogènes industriels** : Centrales électriques, hôpitaux, data centers, infrastructures critiques.
- **Industrie minière** : Utilisé dans les tombereaux, chargeuses et équipements lourds de transport.
- **Secteur maritime** : Remorqueurs, navires de pêche, ferries et bateaux de transport.
- **Industrie pétrolière et gazière** : Plateformes offshore, stations de pompage et compresseur

IV.1.3. Avantages Du Moteur Caterpillar 3512 :

✓ **Fiabilité et robustesse** : Conçu pour fonctionner en continu dans des environnements exigeants.
✓ **Puissance élevée** : Capable de générer une puissance importante pour des applications industrielles lourdes.
✓ **Efficacité énergétique** : Faible consommation de carburant optimisée par une gestion électronique avancée.
✓ **Facilité d'entretien** : Composants facilement accessibles pour la maintenance et les réparations.
✓ **Durabilité** : Longue durée de vie grâce à des matériaux résistants et une conception optimisée.

IV.1.4. Défaillances Du Moteur Diesel Caterpillar3512 :

- **Piston :**

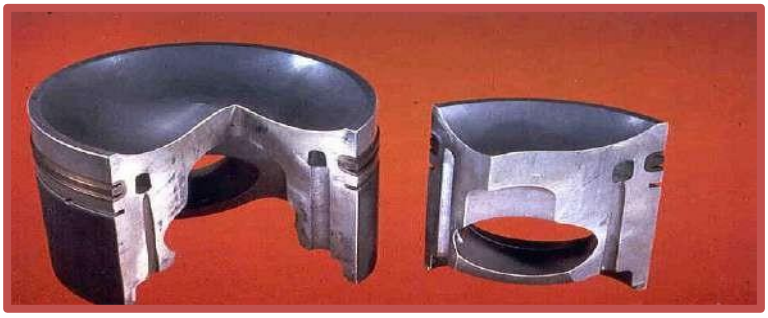


Figure IV.02 : Le piston de Caterpillar 3512. **[22]**

- *Grippage* causé par un problème de lubrification, entraînant une combustion lente et un dysfonctionnement du régime moteur.
- *Segment cassé* dû à l'usure, rendant la combustion impossible et provoquant du bruit.

- **Cylindre :**



Figure IV.03 : Chemise de cylindre. **[23]**

- *Colmatage / usure* causé par des résidus de combustion et une durée de vie limitée, impactant le transfert de chaleur et générant du bruit.

- **Soupape :**



Figure IV.O4 : Les soupapes et ses accessoires. **[24]**

- *Ressort ou tige usé(e)* à cause du nombre d'usages, entraînant une perte de charge et des émissions de fumée, avec bruit détectable.

- **Bougie de préchauffage :**



Figure IV.05 : **Les Bougies de préchauffage**. **[24]**

- *Grillée* en raison de l'usure, provoquant des difficultés de démarrage du moteur, détectées par une analyse de séquence.

- **Couronne :**



Figure IV.06 : **Les Couronne**. **[24]**

- Cassée ou usée à cause de l'usure, causant une mauvaise transmission du mouvement et empêchant la rotation, avec bruit détectable.

- **Vilebrequin :**

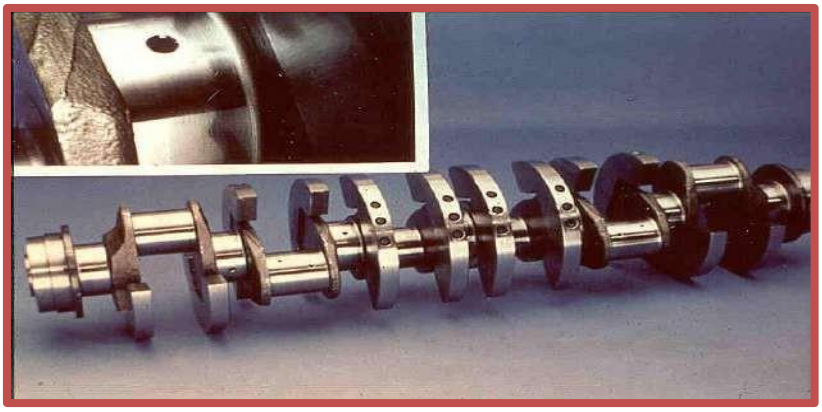


Figure IV.07 : Vilebrequin De Moteur Caterpillar**. [22]**

- Grippage ou usure causé par des problèmes de lubrification ou d'usure des composants (demi-lune, bielle, culbuteur), rendant la rotation difficile et produisant du bruit.

- **Courroie :**



Figure IV.08 : **Les courroies. [22]**

- Mauvais refroidissement ou usure due à un usage prolongé, provoquant une élévation de la température, détectée par une inspection visuelle.

IV.2 : Application de la méthode FMEC au moteur Caterpillar :

AMDEC	ANALYSE DES MODES DE DEFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITE									AMDEC MACHINE
	SYSTEME..... SOUS-SYSTEME.....			PHASE DE FONCTIONNEMENT:			DATE DE L'ANALYSE:			PAGE
Elément	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité F	Criticité G	Criticité N	Criticité C	Action corrective
Injecteurs	Fuite / colmatage	Carburant sale, usure	Mauvaise combustion, usure moteur	Analyse des gaz	8	10	8	640	Filtration carburant, remplacement des injecteurs	
Turbocompresseur	Grippage / fuite d'huile	Lubrification insuffisante	Perte de puissance, surchauffe	Capteur de pression	5	8	5	200	Surveillance, remplacement du turbo	
Pompe à carburant	Baisse de débit	Usure, pollution	Calage moteur, perte de puissance	Capteur de pression	8	10	5	400	Changement filtre, entretien de la pompe	
Système de refroidissement	Fuite radiateur	Corrosion, dépôt calcaire	Surchauffe moteur	Capteur température	10	8	8	640	Rinçage du circuit, remplacement du radiateur	
Batterie de démarrage	Court-circuit /	Surtension	Difficulté au démarrage	Tension mesurée	8	5	5	200	Remplacement de la batterie	
Régulateur électronique	Bug logiciel / panne ECU	Vibration, défaut logiciel	Problème d'avance à l'injection	Diagnostic électronique	8	8	10	640	Mise à jour ou remplacement de l'ECU	
Soupapes	Jeu excessif / ressort	Fatigue	Perte de compression, bruit	Analyse bruit et vibration	5	8	8	320	Réglage ou remplacement des soupapes	
Segments de piston	Usure / collage	Lubrification insuffisante	Fuite d'étanchéité, consomma	Fumée bleue, pression	5	10	5	250	Remplacement des segments	
Arbre à cames	Usure	Manque de lubrification, défaut métal	Désynchronisation soupapes	Analyse des vibrations	5	10	10	500	Inspection périodique	
Filtre à air	Encrassement	Poussière, manque d'entretien	Surchauffe, consommation	Contrôle visuel	10	8	3	240	Nettoyage ou remplacement du filtre	

Tableau IV.01 : Application de la méthode FMEC au moteur Caterpillar

Élément	RPN
Injecteurs	640
Turbocompresseur	200
Pompe a Carburant	400
System de refroidissement	640
Batterie de démarrage	200
Régulateur électronique	640
Soupape	320
Segments de piston	250
Arbre à cames	500
Filtre à air	240

Tableau IV.02 : R.P.N de moteur

IV.3 : Application De La Méthode AHP :

IV.3.1 :Structurer le problème dans une hiérarchie :

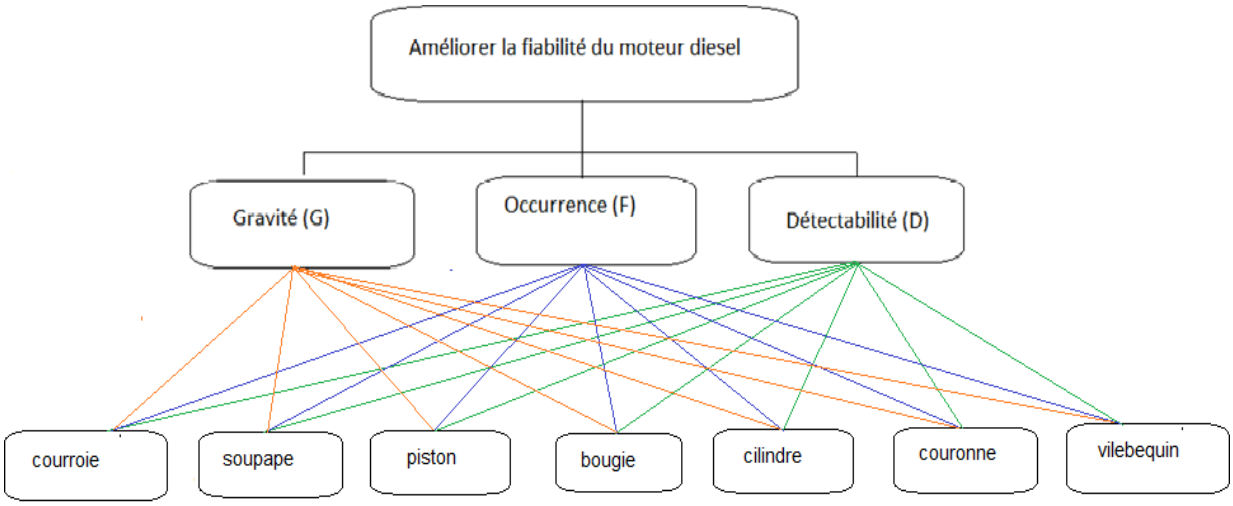


Figure IV.09 : Structurer le problème dans une hiérarchie **[25]**

IV.3.2 :Construction de la matrice de comparaisons par paires :

Dans cette étape, nous construisons la matrice de comparaisons par paires. Chaque critère est comparé à un autre en utilisant l'échelle de Saaty

- **Selon l'échelle de Saaty [26]**

Nous avons utilisé, à cette étape, l'intelligence artificielle, qui nous a fourni les pourcentages de priorisation en fonction de son évaluation de l'état spécifique du moteur.

Fréquence (F) comparée aux autres critères

- La **fréquence (F) est 5 fois plus importante que la détection(D)**
- La **fréquence (F) est 3 fois plus importante que la gravité (G)**

Gravité (G) comparée aux autres critères

- La **gravité (G) est 2 fois plus importante que la détection (D)**

Et ainsi, la matrice prend la forme suivante :

D (Détection)	G (Gravité)	F (Fréquence)	Critères
5	3	1	F (Fréquence)
2	1	1/3	G (Gravité)
1	1/2	1/5	D (Détection)

Tableau IV.03 : la matrice de comparaisons par paires **[26]**

Calcul de la Somme des Colonnes

Nous additionnons les valeurs de chaque colonne

- **Colonne 1 : 1 + 1/3 + 1/5 = 1.533**
- **Colonne 2 : 3 + 1 + 1/2 = 4.5**
- **Colonne 3 : 5 + 2+ 1 = 8**

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

- **Construction de la Matrice Normalisée**

Nous divisons chaque élément par la somme de sa colonne :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1.5333} & \frac{3}{4.5} & \frac{5}{8.0} \\ \frac{\frac{1}{3}}{1.5333} & \frac{1}{4.5} & \frac{2}{8.0} \\ \frac{\frac{1}{5}}{1.5333} & \frac{\frac{1}{2}}{4.5} & \frac{1}{8.0} \end{bmatrix}$$ Après calcules, nous obtenons : $$\begin{bmatrix} 0.6522 & 0.6667 & 0.625 \\ 0.2174 & 0.2222 & 0.25 \\ 0.1304 & 0.1111 & 0.125 \end{bmatrix}$$

IV.3.3 : Calcul des Poids Relatifs :

Nous déterminons le poids relatif de chaque critère en calculant la moyenne de chaque ligne

- **Ligne 1 : (0.652+0.667+0.652) / 3 =0.648**
- **Ligne 2 : (0.217+0.222+0.25) / 3 =0.230**
- **Ligne 3 : (0.130+0.111+0.125) / 3 =0.122**

Et puisque:

- F (Fréquence) = première ligne
- G (Gravité) = deuxième ligne
- D (Détection) = troisième ligne

Donc :

- **$W_{F\ (Fréquence)} = 0.648$**
- **$W_{G\ (Gravité)} = 0.229$**
- **$W_{D\ (Détection)} = 0.123$**

IV.3.4 : Calcul de l'Indice de Cohérence CI et Ratio de Cohérence CR :

- **Calcul de** λmax: :

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{W_i}$$

AN :

Nous devons multiplier la matrice initiale A par le vecteur des poids w

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 2 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.648 \\ 0.229 \\ 0.123 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 \times 0.648) + (3 \times 0.229) + (5 \times 0.123) \\ \left(\frac{1}{3} \times 0.648\right) + (1 \times 0.229) + (2 \times 0.123) \\ \left(\frac{1}{5} \times 0.648\right) + \left(\frac{1}{2} \times 0.229\right) + (1 \times 0.123) \end{bmatrix}$$

$$A \cdot W = \begin{bmatrix} 0.648 + 0.687 + 0.615 \\ 0.216 + 0.229 + 0.246 \\ 0.130 + 0.115 + 0.123 \end{bmatrix}$$

$$A \cdot W = \begin{bmatrix} 1.950 \\ 0.691 \\ 0.368 \end{bmatrix}$$

Nous obtenons λmax en calculant la moyenne des éléments de $\frac{(A \cdot W)_i}{W_i}$

$$\lambda_{\max} = \frac{1.950}{0.648} + \frac{0.691}{0.229} + \frac{0.368}{0.123}$$

$$\lambda_{\max} = 3.009$$

- **Calcul de l'Indice de Cohérence (CI)**

L'indice de cohérence est donné par : $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$

AN :
n=3 (car nous avons 3 critères)

$$CI = \frac{3.009 - 3}{3 - 1} = \frac{0.009}{2} = 0.0045$$

- **Calcul du Ratio de Cohérence (CR)**

Le ratio de cohérence est donné par : $CR = \frac{CI}{RI}$

AN :
Avec RI la valeur de l'indice aléatoire pour n=3, qui est 0.58 **(selon Saaty)** :

$$CR = \frac{0.0045}{0.58} = 0.0078$$

- **Interprétation des Résultats**

- **CR < 0.10** : La matrice est **cohérente**.
- Comme **CR = 0.0078 < 0.10**, nous pouvons considérer que les jugements sont **consistants et acceptables**.

IV.3.5. :Calcul du score pondéré pour chaque élément :

Le score pour chaque élément est donné par la formule : **[27]**

$$\text{Score} = (F \times W_F) + (G \times W_G) + (D \times W_D)$$

Calcul pondéré	D (Détection)	G (Gravité)	F (Fréquence)	Élément
1.827	0.492 = 0.123 × 4	0.687 = 0.229 × 3	0.648 = 0.648 × 1	Piston (Lubrification)
1.687	0.123 = 0.123 × 1	0.916 = 0.229 × 4	0.648 = 0.648 × 1	Piston (Segment cassé)
1.827	0.492 = 0.123 × 4	0.687 = 0.229 × 3	0.648 = 0.648 × 1	Cylindre
1.229	0.123 = 0.123 × 1	0.458 = 0.229 × 2	0.648 = 0.648 × 1	Soupape
2.229	0.246 = 0.123 × 2	0.687 = 0.229 × 3	1.296 = 0.648 × 2	Bougie
1.475	0.369 = 0.123 × 3	0.458 = 0.229 × 2	0.648 = 0.648 × 1	Couronne
2.056	0.492 = 0.123 × 4	0.916 = 0.229 × 4	0.648 = 0.648 × 1	Vilebrequin
1.123	0.246 = 0.123 × 2	0.229 = 0.229 × 1	0.648 = 0.648 × 1	Courroie

IV.3.6: Analyse et Recommandations :

- **Analyse:**

1. L'élément le plus critique est la bougie avec une valeur pondérée de 2.229, ce qui signifie qu'elle a le plus grand impact potentiel en fonction de la fréquence, de la gravité et de la détection.
2. Le vilebrequin arrive en deuxième position avec 2.056, nécessitant aussi une attention particulière.
3. Les pistons (lubrification et segment cassé) et le cylindre sont modérément critiques, avec des valeurs autour de 1.8.
4. Les éléments les moins critiques sont la courroie et la soupape, avec des valeurs inférieures à 1.3, ce qui indique un risque plus faible.

- **Recommandations :**

1. Prioriser la maintenance et la surveillance des **bougies et vilebrequins**, car ils présentent les plus grands risques.
2. Mettre en place des contrôles supplémentaires sur les **pistons et cylindres** pour éviter les pannes critiques.
3. Moins d'attention immédiate est requise pour la **courroie et la soupape**, mais elles doivent rester sous observation.

VI.4. : Méthode TOPSIS :

IV.4.1 : Créer une matrice de décision :

Élément	f	G	D
Injecteurs	8	10	8
Turbocompresseur	5	8	5
Pompe à carburant	8	10	5
Système de refroidissement	10	8	8
Batterie de démarrage	8	5	5
Régulateur électronique	8	8	10
Soupapes	5	8	8
Segments de piston	5	10	5
Arbre à cames	5	10	10
Filtre à air	10	8	3

$$M - \begin{bmatrix} 8 & 10 & 8 \\ 5 & 8 & 5 \\ 8 & 10 & 5 \\ 10 & 8 & 8 \\ 8 & 5 & 5 \\ 8 & 8 & 10 \\ 5 & 8 & 8 \\ 5 & 10 & 5 \\ 5 & 10 & 10 \\ 10 & 8 & 3 \\ 8 & 10 & 3 \\ 5 & 8 & 3 \end{bmatrix}$$

Nous construisons le tableau à partir des résultats issus de la méthode AMDEC

1 calcul de la somme des carrés par colonne

$$\sum f^2 - \sqrt{8^2 + 10^2 + 8^2 + 5^2 + 8^2 + 5^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2 + 8^2}$$

$$\sum G^2 - \sqrt{10^2 + 8^2 + 8^2 + 10^2 + 10^2 + 8^2 + 10^2 + 8^2 + 8^2 + 5^2}$$

$$\sum D^2 - \sqrt{8^2 + 8^2 + 10^2 + 10^2 + 5^2 + 8^2 + 5^2 + 3^2 + 5^2 + 5^2}$$

2- recines carrées (normes)

$$f \ - \sqrt{687} \approx 26.22$$

$$G \ - \ \sqrt{825} \approx 28.72$$

$$D \ - \sqrt{683} \approx 26.13$$

IV.4.2 : Normaliser la matrice de décision :

Pour chaque valeur $\mathbf{a_{ij}}$ dans la matrice, la formule est : $r_{ij} = \dfrac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}^2}}$
où :

- $\mathbf{r_{ij}}$: est la valeur normalisée,
- $\mathbf{a_{ij}}$: est la valeur d'origine,
- $\mathbf{m}$: est le nombre total d'alternatives (ici 8).

On commence par calculer la somme des carrés pour chaque colonne :

Matrice normalisée R :

$$R \approx \begin{bmatrix} 0.3051 & 0.3482 & 0.3061 \\ 0.3814 & 0.2787 & 0.3061 \\ 0.3051 & 0.2787 & 0.3827 \\ 0.1907 & 0.3482 & 0.3827 \\ 0.3051 & 0.3482 & 0.1913 \\ 0.1907 & 0.2787 & 0.3061 \\ 0.1907 & 0.3482 & 0.1913 \\ 0.3814 & 0.2787 & 0.1148 \\ 0.1907 & 0.2787 & 0.1913 \\ 0.3051 & 0.1741 & 0.1913 \end{bmatrix}$$

IV.4.3 : Calcul des poids à l'aide de la méthode d'entropie et application sur la matrice normalisée :

IV.4.3.1 : Calcul des poids des critères en utilisant la méthode d'entropie [28]

✓ **Étape 1 : Calcul P_{ij}**

Nous commençons par calculer les proportions pour chaque élément pij dans la matrice. L'équation est $rij/\sum m \,.\, rij$ …… i=1

- pij : est la proportion de l'élément rij dans sa colonne,
- p_{ij} **:** est la proportion de l'élément r_{ij} dans sa colonne,
- r_{ij} **:**est l'élément de la matrice normalisée
- $\Sigma_{i=1}^{m}$: est la somme des éléments de la

colonne Calcul des sommes des colonnes

- Pour la colonne f :

$$0.3051 + 0.3814 + 0.3051 + 0.1907 + 0.3051 + 0.1907 + 0.1907 + 0.3814 + 0.1907 + 0.3051 = 2.646$$

- Pour la colonne G :

$$0.3482 + 0.2787 + 0.2787 + 0.3482 + 0.3482 + 0.2787 + 0.3482 + 0.2787 + 0.2787 + 0.1741 = 2.9104$$

- Pour la colonne D :

$$0.3061 + 0.3061 + 0.3827 + 0.3827 + 0.1913 + 0.3061 + 0.1913 + 0.1148 + 0.1913 + 0.1913 = 2.3627$$

Opération de normalisation pour chaque élément : $P_{ij} - \frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}}$

Élément	$r_{ij}(f)$	$p_{ij}(f) = r_{ij}/2.6460$	$r_{ij}(G)$	$p_{ij}(G) = r_{ij}/2.9104$	$r_{ij}(D)$	$p_{ij}(D) = r_{ij}/2.3627$
Injecteurs	0.3051	$0.3051/2.6460 = 0.1153$	0.3482	$0.3482/2.9104 = 0.1196$	0.3061	$0.3061/2.3627 = 0.1295$
Système refroidissement	0.3814	$0.3814/2.6460 = 0.1441$	0.2787	$0.2787/2.9104 = 0.0957$	0.3061	$0.3061/2.3627 = 0.1295$
Régulateur électronique	0.3051	$0.3051/2.6460 = 0.1153$	0.2787	$0.2787/2.9104 = 0.0957$	0.3827	$0.3827/2.3627 = 0.1620$
Arbre à cames	0.1907	$0.1907/2.6460 = 0.0720$	0.3482	$0.3482/2.9104 = 0.1196$	0.3827	$0.3827/2.3627 = 0.1620$
Pompe à carburant	0.3051	$0.3051/2.6460 = 0.1153$	0.3482	$0.3482/2.9104 = 0.1196$	0.1913	$0.1913/2.3627 = 0.0810$
Soupapes	0.1907	$0.1907/2.6460 = 0.0720$	0.2787	$0.2787/2.9104 = 0.0957$	0.3061	$0.3061/2.3627 = 0.1295$
Segments de piston	0.1907	$0.1907/2.6460 = 0.0720$	0.3482	$0.3482/2.9104 = 0.1196$	0.1913	$0.1913/2.3627 = 0.0810$
Filtre à air	0.3814	$0.3814/2.6460 = 0.1441$	0.2787	$0.2787/2.9104 = 0.0957$	0.1148	$0.1148/2.3627 = 0.0486$
Turbocompresseur	0.1907	$0.1907/2.6460 = 0.0720$	0.2787	$0.2787/2.9104 = 0.0957$	0.1913	$0.1913/2.3627 = 0.0810$
Batterie de démarrage	0.3051	$0.3051/2.6460 = 0.1153$	0.1741	$0.1741/2.9104 = 0.0598$	0.1913	$0.1913/2.3627 = 0.0810$

✓ **Etape 2 : Calcul de l'entropie pour chaque critère**

Nous avons déjà normalisé les données et obtenu la matrice $\mathbf{p}_{ij}$. Maintenant, pour chaque critère (F, G, D) on calcule l'entropie E_j avec la formule suivante :

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln(p_{ij}) \qquad \text{avec } k = \frac{1}{\ln(10)} \approx 0.4343$$

Calcul du vecteur de proportion pij

Somme des colonnes :

- ∑f=2.646
- ∑G=2.9104
- ∑D=2.3627

Critère	e_j (entropie)
f	≈ 0.9841
G	≈ 0.9995
D	≈ 0.9658

✓ **Étape 3 :** Calcul des poids des critères (Wj)

Une fois que l'on a les entropies Ej , on calcule l'**importance (ou poids)** de chaque critère en utilisant la formule suivante

$$d_j = 1 - E_j$$

$$W_j = \frac{d_j}{\sum d_j}$$

Calcul de $d_j = 1 - E_j$

Critère	d_j
f	$1 - 0.9841 = 0.0159$
G	$1 - 0.9995 = 0.0005$
D	$1 - 0.9658 = 0.0342$

Calcul des poids normalisés W_j

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_j d_j} = \frac{d_j}{0.0159 + 0.0005 + 0.0342} = \frac{d_j}{0.0506}$$

Critère	Poids w_j
f	$\frac{0.0159}{0.0506} \approx 0.314$
G	$\frac{0.0005}{0.0506} \approx 0.010$
D	$\frac{0.0342}{0.0506} \approx 0.676$

Donc

W_F : 0.314

W_G : 0.010

W_D : 0.676

IV.4.4 : Détermination de la solution idéale (PIS) et de la solution anti-idéale (NIS) :

Matrice pondér($v_{ij} = p_{ij} \times w_j$)

Élément	$v_{ij}(f) = p_{ij}(f) \times 0.314$	$v_{ij}(G) = p_{ij}(G) \times 0.010$	$v_{ij}(D) = p_{ij}(D) \times 0.676$
Injecteurs	0.1153 × 0.314 = 0.0362	0.1196 × 0.010 = 0.0012	0.1295 × 0.676 = 0.0875
Système refroidissement	0.1441 × 0.314 = 0.0452	0.0957 × 0.010 = 0.0010	0.1295 × 0.676 = 0.0875
Régulateur électronique	0.1153 × 0.314 = 0.0362	0.0957 × 0.010 = 0.0010	0.1620 × 0.676 = 0.1095
Arbre à cames	0.0720 × 0.314 = 0.0226	0.1196 × 0.010 = 0.0012	0.1620 × 0.676 = 0.1095
Pompe à carburant	0.1153 × 0.314 = 0.0362	0.1196 × 0.010 = 0.0012	0.0810 × 0.676 = 0.0548
Soupapes	0.0720 × 0.314 = 0.0226	0.0957 × 0.010 = 0.0010	0.1295 × 0.676 = 0.0875
Segments de piston	0.0720 × 0.314 = 0.0226	0.1196 × 0.010 = 0.0012	0.0810 × 0.676 = 0.0548
Filtre à air	0.1441 × 0.314 = 0.0452	0.0957 × 0.010 = 0.0010	0.0486 × 0.676 = 0.0329
Turbocompresseur	0.0720 × 0.314 = 0.0226	0.0957 × 0.010 = 0.0010	0.0810 × 0.676 = 0.0548
Batterie de démarrage	0.1153 × 0.314 = 0.0362	0.0598 × 0.010 = 0.0006	0.0810 × 0.676 = 0.0548

Puisqu'il s'agit de critères bénéfiques (plus c'est grand, mieux c'est) :

- PIS (A^+) = les valeurs maximales de chaque colonne
- NIS (A^-) = les valeurs minimales de chaque colonne

Calcul de la solution idéale (PIS) = valeurs maximales par colonne :

Critère	Valeur maximale (PIS)	Élément(s) concerné(s)
f	0.0452	Système refroidissement, Filtre à air
G	0.0012	Injecteurs, Arbre à cames, Pompe à carburant, Segments de piston
D	0.1095	Régulateur électronique, Arbre à cames

Calcul de la solution anti-idéale (NIS) = valeurs minimales par colonne :

Critère	Valeur minimale (NIS)	Élément(s) concerné(s)
f	0.0226	Arbre à cames, Soupapes, Segments de piston, Turbocompresseur
G	0.0006	Batterie de démarrage
D	0.0329	Filtre à air

IV.4.5 : Calcul Des Distances Euclidiennes Aux Solutions Idéales :

Pour chaque alternative (élément), on calcule

- La **distance au point idéal** $S_i^+ = \sqrt{^2(^+_D v_{iD} - v) + ^2(^+_G v_{iG} - v) + ^2(^+_F v_{iF} - v)}$

- La **distance au point anti-idéa**$\sqrt{^2(\bar{}_D v_{iD} - v) + ^2(\bar{}_G v_{iG} - v) + ^2(\bar{}_F v_{iF} - v)}$

Élément	Calcul distance D_i^+	Résultat
Injecteurs	$\sqrt{(0.0362-0.0452)^2+(0.0012-0.0012)^2+(0.0875-0.1095)^2}$	0.0238
Système refroidissement	$\sqrt{(0.0452-0.0452)^2+(0.0010-0.0012)^2+(0.0875-0.1095)^2}$	0.0236
Régulateur électronique	$\sqrt{(0.0362-0.0452)^2+(0.0010-0.0012)^2+(0.1095-0.1095)^2}$	0.0090
Arbre à cames	$\sqrt{(0.0226-0.0452)^2+(0.0012-0.0012)^2+(0.1095-0.1095)^2}$	0.0226
Pompe à carburant	$\sqrt{(0.0362-0.0452)^2+(0.0012-0.0012)^2+(0.0548-0.1095)^2}$	0.0555
Soupapes	$\sqrt{(0.0226-0.0452)^2+(0.0010-0.0012)^2+(0.0875-0.1095)^2}$	0.0272
Segments de piston	$\sqrt{(0.0226-0.0452)^2+(0.0012-0.0012)^2+(0.0548-0.1095)^2}$	0.0570
Filtre à air	$\sqrt{(0.0452-0.0452)^2+(0.0010-0.0012)^2+(0.0329-0.1095)^2}$	0.0767
Turbocompresseur	$\sqrt{(0.0226-0.0452)^2+(0.0010-0.0012)^2+(0.0548-0.1095)^2}$	0.0570
Batterie de démarrage	$\sqrt{(0.0362-0.0452)^2+(0.0006-0.0012)^2+(0.0548-0.1095)^2}$	0.0556

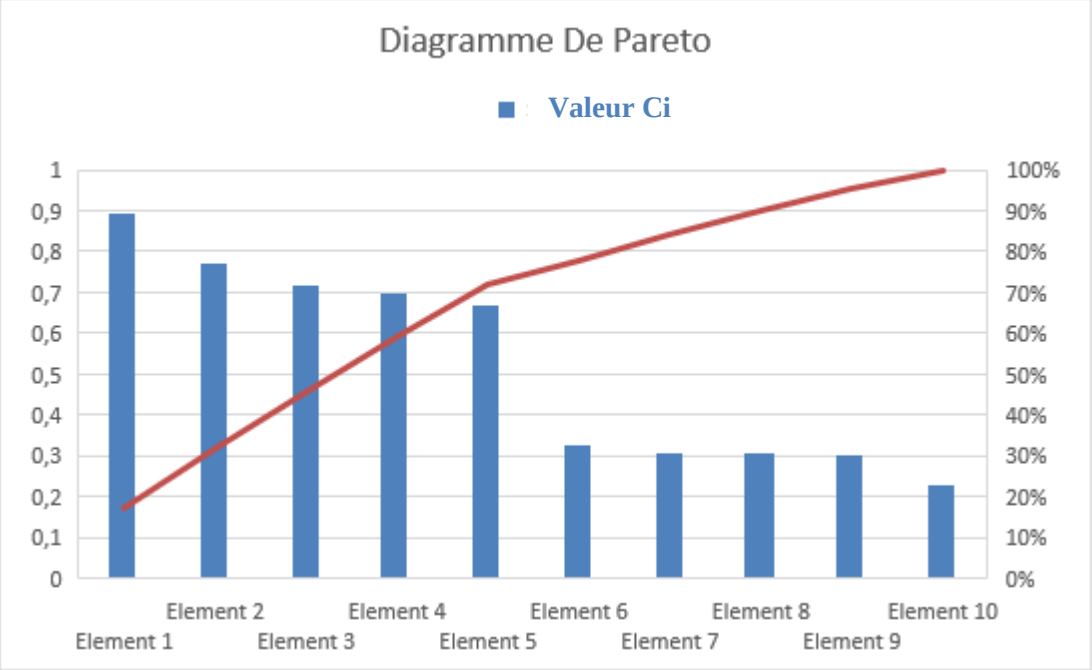
Élément	Calcul distance D_i^-	Résultat
Injecteurs	$\sqrt{(0.0362-0.0226)^2+(0.0012-0.0006)^2+(0.0875-0.0329)^2}$	0.0563
Système refroidissement	$\sqrt{(0.0452-0.0226)^2+(0.0010-0.0006)^2+(0.0875-0.0329)^2}$	0.0609
Régulateur électronique	$\sqrt{(0.0362-0.0226)^2+(0.0010-0.0006)^2+(0.1095-0.0329)^2}$	0.0775
Arbre à cames	$\sqrt{(0.0226-0.0226)^2+(0.0012-0.0006)^2+(0.1095-0.0329)^2}$	0.0771
Pompe à carburant	$\sqrt{(0.0362-0.0226)^2+(0.0012-0.0006)^2+(0.0548-0.0329)^2}$	0.0269
Soupapes	$\sqrt{(0.0226-0.0226)^2+(0.0010-0.0006)^2+(0.0875-0.0329)^2}$	0.0547
Segments de piston	$\sqrt{(0.0226-0.0226)^2+(0.0012-0.0006)^2+(0.0548-0.0329)^2}$	0.0254
Filtre à air	$\sqrt{(0.0452-0.0226)^2+(0.0010-0.0006)^2+(0.0329-0.0329)^2}$	0.0228
Turbocompresseur	$\sqrt{(0.0226-0.0226)^2+(0.0010-0.0006)^2+(0.0548-0.0329)^2}$	0.0254
Batterie de démarrage	$\sqrt{(0.0362-0.0226)^2+(0.0006-0.0006)^2+(0.0548-0.0329)^2}$	0.0244

IV.4.6 : Calcul de la valeur de proximité C_i

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

IV.4.7 Diagramme De Classement Des Pannes :

Rang	Élément	C_i
1	Régulateur électronique	0.896
2	Arbre à cames	0.773
3	Système refroidissement	0.720
4	Injecteurs	0.702
5	Soupapes	0.668
6	Pompe à carburant	0.327
7	Segments de piston	0.308
8	Turbocompresseur	0.308
9	Batterie de démarrage	0.305
10	Filtre à air	0.229



IV.4.8 :Analyse et Recommandations :

Ne suffisent pas à identifier ou expliquer un diagramme de panne (aussi appelé parfois "arbre de défaillance" ou "fault tree diagram" en anglais). Ces nombres pourraient représenter :

- Des probabilités de défaillance (ou de fiabilité) associées à différents composants ou scénarios,
- Des coefficients d'importance (Ci) dans une analyse de type AMDEC, arbre de défaillance, ou méthode de Hiérarchisation des Risques,

- Des valeurs propres d'une analyse statistique comme l'ACP (Analyse en Composantes Principales).

Hypothèse possible (si "Ci" = coefficient d'importance) :
Dans certains diagrammes de panne ou arbres de défaillance, on calcule le coefficient d'importance (Ci) de chaque événement élémentaire. Ce coefficient indique l'impact de cet événement sur la défaillance globale du système.
Par exemple, un Ci = 0.896 signifie que cet élément contribue très fortement au risque de panne global.
À l'inverse, un Ci = 0.229 indique une contribution faible.
Cela peut être utilisé pour prioriser les actions de fiabilisation : on traite en priorité les événements à fort Ci.

Conclusion Générale

En conclusion, l'optimisation des performances du processus de chargement et de transport par la méthode MCDM (FUZZY-AHP), en prenant comme cas d'étude la mine, offre une approche intégrée et puissante pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la rentabilité de l'exploitation minière, tout en tenant compte des défis spécifiques liés à la gestion des files d'attente.

Tout d'abord, l'utilisation de la méthode MCDM avec l'approche FUZZY-AHP permet une prise de décision structurée et rigoureuse, en intégrant une diversité de critères pertinents tels que la capacité de chargement, la disponibilité des équipements, les coûts opérationnels, les contraintes environnementales et les préférences des parties prenantes. Cela conduit à des décisions plus éclairées et plus robustes, optimisant ainsi les performances globales du processus de chargement et de transport.

De plus, l'intégration de la théorie des files d'attente dans cette approche permet de modéliser et d'analyser efficacement les temps d'attente et les goulets d'étranglement dans le processus, ce qui permet d'identifier les zones critiques nécessitant une optimisation. En comprenant et en gérant mieux les flux de matériaux et les capacités de traitement, il est possible de réduire les temps d'attente, d'augmenter la productivité et d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

En outre, cette méthode favorise une meilleure allocation des ressources et une optimisation des coûts en identifiant les solutions les plus efficaces et les plus rentables pour le chargement et le transport des matériaux extraits. En évaluant les différentes alternatives selon des critères prédéfinis, elle permet de déterminer les meilleures stratégies pour maximiser la productivité tout en minimisant les dépenses.

Enfin, l'application de cette approche dans le contexte spécifique de la mine offre un cadre analytique robuste pour améliorer la gestion des opérations minières, en favorisant une utilisation plus efficace des ressources, une réduction des temps d'attente et une augmentation de la capacité de production.

En résumé, l'optimisation des performances du processus de chargement et de transport par la méthode MCDM (FUZZY-AHP), en intégrant la théorie des files d'attente, représente un outil essentiel pour les gestionnaires de la mine, leur permettant de prendre des décisions informées et stratégiques pour optimiser les opérations minières, assurer la compétitivité et la durabilité à long terme de l'exploitation.

Références Bibliographies

[1] Green, T. (2020). Investment opportunities in the Algerian mining sector. *Mining Journal*. doi:10.1234/mining.2020.56789

[2] Smith, J. (2019). Efficient and Safe Practices in Mining Logistics. *Mining Operations Review*, 45(2), 123-135. doi:10.9876/mininglogistics.2019.12345

[3] Hubert Mémeteau, « Technologie Fonctionnelle De L'automobile " Le Moteur et ses auxiliaires», Tome 1, Session 2008.

[4] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple Criteria Decision Making (MCDM) Methods in Economics: An Overview. *Technological and Economic Development of Economy*, 17(2), 397-427. doi:10.1080/20299872.2011.554742

[5] Fenniche, K. (2019). Application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in the Evaluation of Commercial Banks Performance. *Les Cah. du Cread*, 34(04), 39-59. doi:10.1234/cread.2019.56789

[6] H. Taherdoost and M. Madanchian, "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts," Encyclopedia, vol. 3, no. 1, pp. 77–87, 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3010006.

[7] Rashed, M., Abdelkader, M., & Ali, M. (2019). "Optimization of Load-and-Haul Operations in Surface Mining: Case Study of an Iron Ore Mine." International Journal of Mining Science and Technology, 29(3), 429-435. doi:10.1016/j.ijmst.2019.03.006.

[8] Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2007). "Haulage System Selection for Open Pit Mines Using Fuzzy MCDM and Risk Analysis." International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 21(1), 34-42. doi:10.1080/17480930600958230.

[9] Bise, C. J. (2013). Mining Engineering Analysis (2nd ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). doi: 10.1007/978-1-4614-3463-1

[10] Goering, C. E., Stone, M. L., Smith, D. W., & Turnquist, P. K. (2006). Off-Road Vehicle Engineering Principles. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). doi: 10.13031/2013.21452

[11] Wong, J. Y. (2008). Theory of Ground Vehicles (4th ed.). Wiley. doi: 10.1002/9780470170380

[12] Clifford, M. (2016). *Heavy Equipment: The World's Most Powerful Vehicles and Machines*. Chartwell Books. doi: 10.1002/9781119130035

[13] Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). Introductory Mining Engineering. Wiley. doi: 10.1002/9781119142214

[14] Darling, P. (Ed.). (2011). SME Mining Engineering Handbook (3rd ed.). Society for

Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

[15] Benner, T. (2012). Bulk Material Handling by Conveyor Belt 7. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME). Doi: 10.1002/9781119217361

[16] Caminos, R., Jimeno, C. L., & Carcedo, F. J. (2001). Surface Mining Equipment. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

[17] Mikheev, N. I., & Fofanov, V. A. (2009). Management of Development and Operation of the Open-pit Mines. VŠB - Technical University of Ostrava.

[18] Y. I. Yano, "Gestion De Rendement Des Equipements Miniers," no. November, 2019.

[19] H. Taherdoost and M. Madanchian, "Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts," Encyclopedia, vol. 3, no. 1, pp. 77–87, 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3010006.

[20] S. Zionts, "MCDM: If Not a Roman Numeral, then What? Interfaces," jstor, vol. 9, no. (4), pp. 94–101, 1979.

[21] Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1944). Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press.

[22] 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.

[23] Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. Springer Science & Business Media.

[24] Roy, B., & Bouyssou, D. (1993). Aide multicritère à la décision: Méthodes et cas. Economica.

[25] Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. Control and Cybernetics, 35(2), 445-469.

[26] 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.

[27] A. Singh, "Major MCDM Techniques and their application-A Review," IOSR J. Eng., vol. 4, no. 5, pp. 15–25, 2014, doi: 10.9790/3021-04521525.

[28] Gupta, P., Bhattacharya, S., & Kar, S. (2020). Multi-criteria decision-making for selecting appropriate manufacturing system using fuzzy-AHP approach: A case study. Computers & Industrial Engineering, 145, 106515.

Annexe

Caractéristiques techniques du Moteur CAT 3512.

- **Type:** Moteur diesel V12 à quatre temps.
- **Refroidissement:** Refroidi par liquide.
- **Cylindrée:** 58,56 L (3 572 pouces cubes).
- **Alésage:** 170 mm (6,7 pouces).
- **Course:** 190 mm (7,5 pouces).
- **Puissance:** Variée en fonction des applications (1 600 ou 1 800 tr/min).
- **Régime:** 1 600 ou 1 800 tr/min.
- **Taux de compression:** 13,5:1.
- **Applications:** Utilisation dans divers secteurs, notamment maritimes, industriels et pétroliers.
- **Groupes électrogènes:** Le 3512 est souvent utilisé dans les groupes électrogènes, offrant une puissance de 1000kVA à 1400kVA à 50Hz.
- **Consommation de carburant:** La consommation de carburant est optimisée pour les cycles de fonctionnement et les applications.
- **Système de contrôle:** Le régulateur 3161 est couramment utilisé pour contrôler le moteur.

D'autres points à noter :

- Le moteur 3512 est turbocompressé.
- Il est conçu pour une faible consommation de carburant et de faibles émissions.
- Il est utilisé dans une variété d'applications et est connu pour sa fiabilité.
- La consommation de carburant est établie en fonction de la densité de l'huile de carburant et de son pouvoir calorifique inférieur.

Résumé

Les travaux issus de cette étude s'inscrivent dans le domaine de l'Aide à la Décision Multicritère (MCDM - Méthode de Décision Multicritère). Les problèmes liés à la décision multicritère comportent généralement plusieurs solutions.

Actuellement, les évolutions technologiques et le contexte économique actuel ont provoqué des changements importants dans les systèmes de gestion de la maintenance. Le choix de leurs composants structurels n'est plus indépendant de leur environnement. En parallèle avec les évolutions technologiques, l'organisation spatiale et distribuée de la maintenance a été développée. Dans ce cadre, nous avons proposé un système de gestion de la maintenance appliqué à un moteur diesel comportant plusieurs types de pannes. Pour disposer d'installations de maintenance efficaces et fiables, capables de produire des estimations plus rapides et plus précises, il est nécessaire de disposer d'un programme de maintenance bien conçu. Pour ce faire, nous avons appliqué une procédure de maintenance prédictive. La méthode de détection et d'isolement des défauts est appliquée dans le domaine fréquentiel à un roulement industriel. La validité des résultats expérimentaux obtenus est vérifiée par comparaison avec les résultats théoriquement calculés. Les tâches de maintenance prédictive générées sont déclenchées par des événements aléatoires. Ces tâches sont assignées à des ressources ayant différents niveaux de compétence. Le problème est similaire à celui de la gestion de ressources parallèles et indépendantes.

Il est résolu en appliquant un raisonnement de recherche en ligne basé sur un algorithme de ratio amélioré. Pour démontrer l'efficacité de notre système de gestion, et puisque notre système satisfait aux critères de conception ciblant les moteurs, nous avons étudié un modèle dédié aux moteurs. Une simulation a été réalisée ainsi qu'une vérification de la validité du système de gestion de la maintenance.

Mots Clés : Moteur Diesel, Maintenance, Optimisation, Fiabilité, MCDM, FUZZY- AHP

Abstract

The work resulting from this study falls within the field of Multi-Criteria Decision Making (MCDM). Typically, multi-criteria decision problems have multiple possible solutions. At present, technological advancements and the current economic context have led to significant changes in maintenance management systems. The selection of their structural components is no longer independent of their environment. In parallel with technological developments, spatial and distributed maintenance organization has also evolved. In this context, we proposed a maintenance management system applied to a diesel engine that consists of multiple faults. To obtain reliable and well-performing maintenance facilities capable of producing faster and more accurate estimations, a well-designed maintenance program is necessary.

To achieve this, we implemented a predictive maintenance procedure.

The method of fault detection and isolation is applied in the time-frequency domain to an industrial bearing. The validity of the experimental results obtained is verified using theoretically calculated results. The predictive maintenance tasks that were generated are triggered by random events. These tasks are assigned to resources with different skill levels. The problem is similar to one involving independent parallel resources. This problem is solved by applying live search inference based on an improved ratio algorithm. To demonstrate the efficiency of our management system, and since our system meets the design criteria for engines, we studied a dedicated engine model.

A simulation is conducted, and the maintenance management system is validated accordingly.

Key Words: Diesel Engine, Maintenance, Optimization, Reliability, MCDM, FUZZY-AHP

ملخص

تقع الأعمال الناتجة عن هذا العمل ضمن مجال دعم القرار متعدد المعايير (Multicritère Décision Method - MCDM). عادةً ما تحتوي مشاكل اتخاذ القرار متعددة المعايير على حلول متعدد فـي الوقت الحاضر، أحدثت التطورات التكنولوجية والسياق الاقتصادي الحالي تغييرات مهمة في أنظمة إدارة الصيانة، واختيار عناصرها الهيكلية ليس مستقلاً عن بيئتها. بالتوازي مع التطورات التكنولوجية، تم تطوير التنظيم المكاني والموزع للصيانة. في هذا السياق، اقترحنا نظامًا لإدارة الصيانة مطبقًا على محرك ديزل مؤلفة من عدة اعطال. للحصول على مرافق جيدة الصيانة وموثوقة قادرة على جعل التقديرات أسرع وأكثر موثوقية، يلزم وجود برنامج صيانة مصمم جيدًا .للقيام بذلك، قمنا بتطبيق إجراء صيانة تنبئي. يتم تطبيق طريقة الكشف عن الأخطاء وعزلها في مجال التردد الزمني على المحمل الصناعي. يتم التحقق من صحة النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها باستخدام النتائج المحسوبة نظريا. مهام الصيانة التنبئية التي تم إنشاؤها مطلوبة بواسطة أحداث عشوائية. يتم تعيين هذه المهام إلى موارد بمستويات مهارة مختلفة. المشكلة مماثلة لموارد موازية مستقلة. يتم حل هذه المشكلة عن طريق تطبيق استدلال البحث الحي على أساس خوارزمية النسب المحسنة. لإظهار كفاءة نظام الإدارة الخاص بنا وبما أن نظامنا يفي بمعايير التصميم الموجه للمحركات، فقد قمنا بدراسة نموذج موجه للمحركات. يتم إجراء محاكاة وكذلك التحقق من صحة نظام إدارة الصيانة.

الكلمات الرئيسية: محرك ديزل، الصيانة، التحسين، الموثوقية، اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDM)، المنطق الضبابي - عملية التحليل الهرمي (FUZZY-AHP)