



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
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Option : Contrôle Technique et Maintenance des Véhicules

Étude, détection et diagnostic des défauts d'un groupe électrogène

Par les étudiants :

1. Chegrouche Bilal et 2. Sellami Khaled

Devant le jury :

Daouadi Rabeh	Président	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Moghrani Radhouane	Encadreur	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Amara Abderrazak	Examineur	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026



Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le :

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

- 1- Sellami Khaled
- 2- Chegrouche Bilal
- 3- _____

Niveau : Master 2 Option : --

Thème : Control Technique des véhicules
Etude de détection et diagnostic des
defauts d'un groupe électrogène

Nom et prénom de l'encadreur :

Moghrani Radhouane

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
<u>Généralités sur les groupes électrogènes</u>	
<u>Constitution et fonctionnement interne.</u>	
<u>Maintenance industrielle et Méthode d'analyse.</u>	
<u>Diagnostic des pannes et application ANDEC</u>	
<u>Analyse quantitative de fiabilité.</u>	



Année universitaire : 2023/2024

Tébessa le :

Fiche de critique

Noms et prénoms des étudiants :

1-----
-2-----3-----

Niveau : ----- Option : -- -----

Thème :-----

Concernant la
forme :-----

-----Concernant le
fond :-----

--Décision :-----

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) نصير مكي خزال
الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم :

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 412097493 و الصادرة بتاريخ

2024/107/05

المسجل بمعهد معهد الحاجم

قسم الحاجم والجيوتكنولوجيا

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

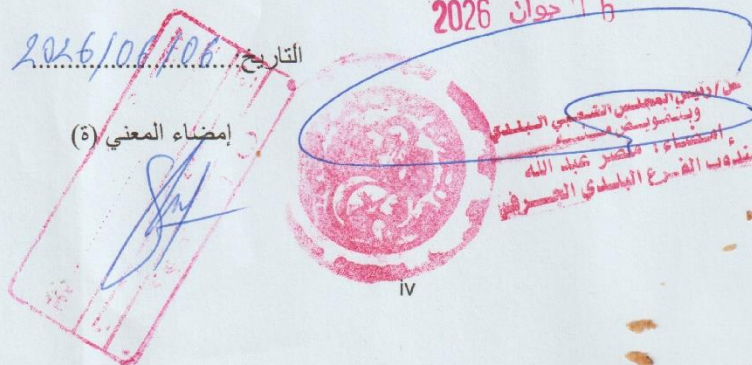
عنوانها :

Étude de détection et de diagnostic des défauts
d'un groupe électrogène

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

التاريخ : 2026/06/06

إمضاء المعني (ة)



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد (ة) شكروش بلال الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم :
طالب

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : 105858787 و الصادرة بتاريخ
2017-08-26

المسجل بمعهد معهد الحسن بن علي
قسم الحاسن بن علي والجيوتكنولوجيا
و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)،
عنوانها :

Etude de détection et diagnostic des défauts مذكرة ماستر
d'un groupe électrogène
.....

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

التاريخ: 2026-06-04

إمضاء المعني (ة)



تخضع للتصديق
على الامضاء السيد : شكروش بلال
بتاريخ : 04 جوان 2026
موسم :
رئيس المجلس الشعبي البلدي

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
.....
رئيسة :
مجلس الإدارة الإقليمية
بلدية
إمضاء : شكروش رشيد



Dédicace

Je dédie ce travail à...

Ma mère, dont le courage silencieux et la force de l'âme m'accompagnent chaque jour. Qu'elle trouve dans ces lignes un humble témoignage d'amour, de reconnaissance et de tendresse. J'espère que dieu la guérira de sa maladie et la protégera.

À mon cher père, pour son soutien indéfectible, ses sacrifices et sa présence constante à mes côtés. C'est grâce à lui que je suis arrivée jusqu'ici.

À mes frères « Saleh », « Chaker » et à **mes sœurs** « », avec qui je partage tout mon bonheur. Votre amour et vos encouragements sont ma force au quotidien.

Et à mes amies proches « Ali », « Farid » , pour leurs fidélités, leurs bienveillances et leurs présence précieuse dans ma vie.

Merci à chacun de vous d'avoir été là. Ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

CHEGROUCHE Bilal

Dédicace

Je dédie ce travail à...

Tous ceux qui m'ont appris à aimer le savoir et qui m'ont aidé dans mon apprentissage.

À ma maman et à mon père. Pour leur amour, leurs prières et leur soutien constant.

À mes frères, et mes sœurs

À mes amis

Merci pour votre soutien

À tous ceux qui ont aidé, d'une manière ou d'une autre, à atteindre ce succès, je vous exprime ma profonde gratitude et mon respect

SELLAMI KHALED

Remerciement

Nous remercions d'abord le Dieu de nous avoir donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

Et nous tenons à remercier à l'enseignant : Moghrani Radhouane, le directeur du mémoire, pour son soutien et son accompagnement tout le long de notre recherche.

Nous remercions également l'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention notre travail.

Sans oublier de remercier toutes personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de notre travail

Introduction Générale

Résumé

Le groupe électrogène est une source autonome de production d'énergie électrique. Il est constitué principalement d'un moteur thermique, généralement Diesel pour les puissances industrielles, et d'un alternateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les sites sensibles comme les ateliers industriels, les hôpitaux, les centres informatiques ou les administrations, son rôle devient essentiel car il assure la continuité de service lors d'une coupure du réseau.

Ce mémoire présente une étude technique et une démarche de maintenance appliquée à un groupe électrogène diesel de puissance moyenne, avec un cas d'application autour d'un groupe de 200 kVA.

Le travail décrit les organes principaux, les modes d'utilisation, les protections, les pannes fréquentes et les méthodes de diagnostic. La partie maintenance est développée à l'aide de l'AMDEC.

L'objectif final est de proposer un plan de maintenance préventive clair, réaliste et exploitable par un service de maintenance, en définissant des périodicités de contrôle, des actions correctives et des recommandations pour améliorer la disponibilité du groupe.

Mots-clés : groupe électrogène, moteur Diesel, alternateur, AVR, AMDEC, diagnostic, maintenance préventive, disponibilité.

Abstract

The generator set is an autonomous source of electrical power generation. It primarily consists of an internal combustion engine, typically a Diesel engine for industrial power capacities, and an alternator that converts mechanical energy into electrical energy. In critical infrastructure and sensitive environments such as industrial plants, hospitals, data centers, or administrative facilities, its role becomes vital as it ensures service continuity during grid outages.

This master's thesis presents a technical study and a maintenance methodology applied to a medium-capacity diesel generator set, using a 200 kVA unit as a practical case study. The work outlines the primary components, operating modes, protection systems, common failure modes, and diagnostic techniques. The maintenance framework is developed utilizing Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).

The ultimate objective is to propose a clear, realistic, and actionable preventive maintenance plan for engineering and maintenance teams, specifying inspection intervals, corrective actions, and optimization recommendations to maximize the availability of the generator set.

Keywords: generator set, Diesel engine, alternator, AVR, FMEA, diagnostics, preventive maintenance, availability.

المخلص

تُعَد مجموعة التوليد الكهربائي مصدرًا مستقلًا لإنتاج الطاقة الكهربائية. تتكون أساسًا من محرك احتراق داخلي، وعادة ما يقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية (Alternateur) يكون من نوع الديزل للقدرات الصناعية، بالإضافة إلى مولد تيار متردد إلى طاقة كهربائية. في البنى التحتية الحساسة والبيئات الحيوية مثل المصانع، المستشفيات، مراكز البيانات، أو المنشآت الإدارية، يصبح دور هذه المجموعة حيويًا لأنها تضمن استمرارية الخدمة أثناء انقطاع الشبكة الكهربائية.

تقدم مذكرة الماستر هذه دراسة تقنية ومنهجية صيانة تطبق على مجموعة توليد ديزل متوسطة القدرة، مع تطبيق عملي على يصف العمل المكونات الرئيسية، أوضاع التشغيل، أنظمة الحماية، أنماط (kVA) وحدة بقدرة 200 كيلو فولت أمبير الأعطال الشائعة، وتقنيات التشخيص. تم تطوير إطار الصيانة باستخدام تحليل أنماط الأعطال وتأثيراتها وخرجتها (AMDEC).

الهدف النهائي هو اقتراح خطة صيانة وقائية واضحة وواقعية وقابلة للتطبيق من قبل فرق الهندسة والصيانة، مع تحديد فترات الفحص، والإجراءات التصحيحية، وتوصيات التحسين بهدف تعظيم التوفرية (الجاهزية) لمجموعة التوليد.

،(AVR) منظم آلي للجهد، (Alternateur) الكلمات المفتاحية: مجموعة توليد كهربائي، محرك ديزل، مولد تيار متردد. تشخيص الأعطال، صيانة وقائية، توفرية (جاهزية)، (AMDEC) تحليل أنماط الأعطال وتأثيراتها وخرجتها.

Liste des Figures

Numéro	Titre de la Figure	Page
Fig 1	Composants principaux du groupe électrogène	8
Fig 2	Schéma de la constitution d'un groupe électrogène	9
Fig 3	Schéma fonctionnel du groupe électrogène	15
Fig 4	Diagramme fonctionnel du moteur thermique	16
Fig 5	Vue détaillée d'un moteur diesel	17
Fig 6	Vue éclatée d'un moteur diesel	18
Fig 7	Les 4 temps du moteur à combustion interne	21
Fig 8	Schéma du système d'injection de carburant pour moteur Diesel	23
Fig 9	Schéma du système de lubrification d'un moteur diesel	24
Fig 10	Schéma du circuit de refroidissement d'un moteur diesel	25
Fig 11	Démarrreur manuel d'un moteur diesel	27
Fig 12	Schéma de fonctionnement d'un démarrreur	27
Fig 13	Démarrreur du groupe électrogène GMI de 200 kVA	28
Fig 14	Composants principaux d'un alternateur	29
Fig 15	Stator de moteur / alternateur	30

Introduction Générale

Fig 16	Rotor (à cage d'écureuil) d'un moteur asynchrone	30
Fig 17	Schéma de fonctionnement de l'alternateur	31
Fig 18	Diagramme fonctionnel de l'alternateur	31
Fig 19	Diagramme du système de régulation AVR	32
Fig 20	Principe simplifié de régulation AVR	33
Fig 21	Schéma d'une batterie d'accumulateurs au plomb	33
Fig 22	Diagramme du fonctionnement Electrochimique d'une batterie au plomb	34
Fig 23	Armoire de commande avec un inverseur intégré	35
Fig 24	Diagramme de fonctionnement d'un système d'inversion de source	36
Fig 25	Conditions de couplage avec le réseau	38
Fig 26	Démarche AMDEC utilisée dans l'étude	45
Fig 27	Diagramme d'Ishikawa - démarrage impossible	46
Fig 28	Schéma détaillé du groupe électrogène étudié	52

Introduction Générale

Fig 29	Découpage structurel du groupe électrogène	55
Fig 30	Classement indicatif des criticités	58

Liste des Tableaux

Numero	Titre du Tableaux	Page
Tab 1	Classes d'utilisation et Régimes de puissance	11
Tab 2	Critères de dimensionnement	13
Tab 3	Fonctions et anomalies de certains organes	21
Tab 4	Contrôle des éléments du système de refroidissement	26
Tab 5	Défaillances possibles des composants de l'alternateur	32
Tab 6	Comparaison des différents modes de fonctionnement	37
Tab 7	Comparaison des différents modes d'utilisation	37
Tab 8	Protection contre les défauts électriques possibles	39
Tab 9	Protection contre les défauts mécaniques possibles	43
Tab 10	Les différents indicateurs de performance (FMD)	44

Introduction Générale

Tab 11	Valeurs de cotation des critères F, G et D	45
Tab 12	Principales pannes et premiers contrôles de diagnostic	46
Tab 13	Caractéristiques du groupe électrogène de la marque GMI (Moteur Baudouin)	53
Tab 14	Historique abrégé des interventions sur le groupe électrogène	54
Tab 15	Grille AMDEC : Traitement des anomalies du circuit de refroidissement	55
	Grille AMDEC : Traitement des anomalies des circuits de combustible et lubrification	56
Tab 17	GrilleAMDEC : Traitement des anomalies du système de démarrage	57

Liste des Abréviations et Symboles

Abréviations

Abréviation	Signification / Définition
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
AVR	Automatic Voltage Regulator (Régulateur Automatique de Tension)
BT	Basse Tension
HTA	Haute Tension A
GMAO	Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
PMB	Point Mort Bas
PMH	Point Mort Haut
DDR	Dispositif Différentiel Résiduel
PMP	Plan de Maintenance Préventive
FMD	Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité

Symboles

Les symboles électriques et de maintenance exploités dans ce mémoire sont définis de la manière suivante :

- **U** : Tension électrique (V)
- **I** : Intensité du courant électrique (A)
- **f** : Fréquence électrique (Hz)
- **P** : Puissance active (kW)

Introduction Générale

- **S** : Puissance apparente (kVA)
- **cos φ** : Facteur de puissance
- **C** : Criticité AMDEC
- **F** : Fréquence d'apparition de la défaillance
- **G** : Gravité de la défaillance
- **D** : Indice de détection de la défaillance

Introduction Générale

Section	Page
Dédicace (Bilal)	i
Dédicace (Khaled)	ii
Remerciements	iii
Résumé / Abstract / الملخص	v
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
Liste des abréviations et symboles	x
Introduction générale	12
Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPEES ÉLECTROGÈNES	16
1.1 Définition et rôle d'un groupe électrogène	17
1.2 Importance de la continuité de service	18
1.3 Types des groupes électrogènes	19
1.4 Classes d'utilisation et régimes de puissance	19
1.5 Normes, sécurité et environnement d'installation	20
1.6 Critères de dimensionnement	21
1.7 Conclusion du chapitre 1	21
Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE	22
1.1 Chaîne de conversion de l'énergie	23
1.2 Moteur Diesel : rôle et organes principaux	24
1.2.1 Cycle Diesel quatre temps	28
1.2.2 Circuit d'alimentation en combustible	29

Introduction Générale

1.2.3 Circuit de lubrification	30
1.2.4 Circuit de refroidissement	31
1.2.5 Système de démarrage	32
1.3 Alternateur : principe général	33
1.3.1 Startor, rotor et excitation	33
1.3.2 Régulation automatique de tension AVR	36
1.4 Batterie, chargeur, châssis et réservoir	36
1.4.1 Principe de fonctionnement	37
1.5 Armoire de commande et inverseur de source	39
1.5.1 Modes de fonctionnement : manuel, automatique et essai	40
1.5.2 Modes d'utilisation d'un groupe électrogène	40
1.6 Couplage avec le réseau ou avec un autre groupe	41
1.7 Sécurité lors de l'exploitation	42
Conclusion du chapitre 2	43
Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE	45
1.1 Définition et objectifs de la maintenance	46
1.1.1 Typologie de maintenance appliquées	46
1.2 Stratégie de maintenance industrielle	47
1.2.1 Inspection visuelles	47
1.2.2 contrôles des fluides	47
1.2.3 contrôle de la batterie et du système de démarrage	47
1.3 Indicateurs de performance	48
1.4 Méthode AMDEC	51
1.4.1 Grille de cotation AMDEC	51
1.4.2 logigrammes de mise en œuvre et grille et cotation	52
1.4.3 Arbre et défaillance et diagramme d'Ishi-kawa	53
1.5 Méthodes de diagnostic	54
1.7 Conclusion du chapitre 3	55

Introduction Générale

Chapitre IV : DIAGNOSTIC DES PANNES ET APPLICATION AMDEC	56
1.1 Introduction	57
1.2 Principales pannes et méthode de diagnostic	57
1.3 Présentation du cas d'étude	58
1.4 Découpage structurel pour l'analyse	59
1.5 AMDEC détaille par sous-système	59
1.5.1 Circuit de refroidissement	59
1.6 Tableau AMDEC global et hiérarchisation des criticités	61
1.7 Procédure de diagnostic sur site	62
1.8 Relevés d'essai et interprétation	62
1.9 Plan de maintenance préventive propose	63
1.10 Conclusion du chapitre 4	45
Chapitre V : ANALYSE QUANTITATIVE DE FIABILITÉ – APPROCHE COMBINÉE AMDEC ET LOI DE WEIBULL	65
1.1 introduction	66
1.2 Pourquoi utiliser la loi de Weibull ?	66
1.3 Collecte et justification des données	66
1.4 Tableau AMDEC globale (version quantitative)	67
1.5 Données de bon fonctionnement (TTF) et ajustement de Weibull	68
1.6 Indicateur et fiabilité	70
1.7 Validation du modelé : test de kolmogorow-smirnov	70
1.8 Diagramme de pareto de criticités AMDEC	71
1.9 Taux de défaillance par composant	71
1.10 Réparation des pannes par sous-système	72
1.11 Confrontation AMDEC-Weibull	73
1.12 Synthèse des résultats quantitatifs	74
1.13 Enseignement pour la maintenance	75
1.14 Plan de maintenance parentille détaille du groupe électrogène	75

Introduction Générale

1.14.1 Objectifs de PMP	75
1.14.2 Tableaux détaille des intervention	75
1.15 Analyse de la réparation et de lacharge des intervention	77
1.15.1 Réparation des interventions par type	77
1.15.2 Points remarquables et gestion de la charge	77
1.15.3 Cohérence avec l'approche de fiabilité	78
1.15.4 Conclusion visuelle	78
1.16 Interprétation de la figure – calendrier annuel des intervention	80
1.17 Interprétation de la figure 2 – échéancier des intervention long terme	80
1.17.1 Organisation et traçabilité	81
1.18 Conclusion du chapitre 5	81
Conclusion générale	83
Bibliographie	85

Introduction Générale

Aujourd'hui, l'énergie électrique est devenue indispensable dans presque tous les domaines de la vie moderne. Dans le secteur industriel en particulier, elle représente un élément de base pour le fonctionnement des machines, des chaînes de production, des systèmes de commande, de l'éclairage, de la sécurité et des équipements informatiques [1]. Une simple coupure de courant, même de courte durée, peut provoquer l'arrêt d'un atelier, la perte d'une production en cours, le dérèglement d'un procédé automatisé ou encore la détérioration d'équipements sensibles.

Dans certaines installations critiques, l'interruption de l'alimentation électrique ne se limite pas seulement à une perte matérielle ou financière. Elle peut aussi engendrer des conséquences humaines et sécuritaires graves. C'est le cas, par exemple, dans les milieux hospitaliers où plusieurs appareils de réanimation doivent rester alimentés en permanence, dans les centres de traitement de données (Data Centers) où la continuité du service est obligatoire, ou encore dans les unités de l'industrie lourde (telles que les installations minières et pétrochimiques) où certains procédés thermiques ou cinétiques ne doivent pas être interrompus brutalement [2]. Pour cette raison, la continuité de l'énergie électrique est devenue une exigence essentielle dans la conception et l'exploitation des réseaux électriques modernes.

Malgré les progrès réalisés dans les réseaux de distribution de transport d'électricité, les coupures, les chutes de tension et les perturbations harmoniques restent inévitables. Elles peuvent être causées par des défauts d'isolement sur les lignes, des surcharges transitoires, des opérations de délestage, des interventions de maintenance planifiées ou des incidents climatiques majeurs (foudre, tempêtes). Face à ces aléas, il devient nécessaire de prévoir une source d'alimentation de secours (ou de substitution) capable de prendre le relais de manière autonome et rapide. Parmi les solutions industrielles les plus fiables et les plus répandues, on trouve le groupe électrogène [3].

Le groupe électrogène est un système de conversion d'énergie autonome qui permet de générer de l'énergie électrique à partir d'une source d'énergie mécanique primaire. Dans la configuration industrielle standard, cette énergie mécanique est fournie par un moteur thermique à combustion interne, généralement de type Diesel pour les puissances moyennes et élevées, qui entraîne un alternateur synchrone. Le moteur thermique transforme l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie mécanique de rotation via un système bielle-manivelle, tandis que l'alternateur convertit cette énergie cinétique en énergie électrique triphasée. Ce principe éprouvé rend le groupe électrogène indispensable, qu'il soit exploité comme source principale d'énergie dans les zones isolées (sites miniers, chantiers reculés) ou comme source d'urgence dans les infrastructures raccordées au réseau de distribution global [4].

L'omniprésence des groupes électrogènes dans les architectures électriques actuelles s'explique par leur flexibilité et leur réactivité lors des phases d'interruption du réseau principal. Cependant, pour qu'un tel équipement de secours remplisse efficacement ses fonctions de sûreté, il doit présenter des indicateurs de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité extrêmement élevés. Il doit être capable de démarrer et de prendre sa pleine charge nominale en quelques secondes seulement, parfois après de longues périodes d'inactivité transitoire [5].

Introduction Générale

Bien que le groupe électrogène soit une machine industrielle robuste, son exploitation est soumise à un ensemble complexe de contraintes multiphysiques. Le bloc moteur est exposé de manière continue à des sollicitations mécaniques (forces d'inertie, vibrations), thermiques (gradients de température élevés dus à la combustion) et chimiques (corrosion, dégradation des lubrifiants).

L'alternateur, quant à lui, subit des contraintes magnétiques et électriques sévères, notamment lors des impacts de charge, des déséquilibres de phases ou des phénomènes de court-circuit [6]. À cela s'ajoute la complexité de ses systèmes auxiliaires : le circuit d'alimentation en combustible, le système de refroidissement liquide, le circuit de lubrification, la chaîne de démarrage (batteries et démarreur électrique) et l'armoire de commande dotée d'un régulateur automatique de tension (Automatic Voltage Regulator - AVR). La défaillance d'un seul de ces composants périphériques peut inhiber le processus de démarrage ou provoquer l'arrêt d'urgence du système en pleine charge.

C'est précisément dans ce contexte que la maintenance industrielle s'impose comme un levier stratégique majeur pour l'exploitation de ces équipements. Un groupe électrogène dont la maintenance est négligée présentera inévitablement des anomalies critiques : gommage des injecteurs, usure prématurée des coussinets, dégradation de l'électrolyte des batteries de démarrage, ou dysfonctionnements de l'AVR. Dans le cas d'une application de secours, une défaillance lors du basculement de source peut paralyser l'ensemble d'une usine ou d'un site sensible. La maintenance ne doit donc plus être perçue comme un centre de coût ou une simple suite d'actions de réparation curative, mais comme une démarche d'ingénierie rigoureuse et planifiée visant à maîtriser le cycle de vie de l'actif et à maximiser sa disponibilité opérationnelle [7].

L'ingénierie de la maintenance a connu des mutations profondes. Le modèle traditionnel de la maintenance corrective (ou curative) — consistant à intervenir après la manifestation de la panne — montre rapidement ses limites dans les environnements de production modernes à flux tendus, générant des coûts d'indisponibilité prohibitifs et des risques sécuritaires accrus. L'industrie s'oriente désormais vers des stratégies proactives : la maintenance préventive systématique (basée sur des échéances temporelles ou d'usage) et la maintenance conditionnelle ou prédictive (basée sur le suivi de paramètres physiques comme l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge ou l'analyse d'huile) [1].

Pour structurer efficacement ces politiques de maintenance et hiérarchiser les actions à mener sur un système complexe, les ingénieurs s'appuient sur des méthodes d'analyse de la Sûreté de Fonctionnement (SDF). Parmi ces outils, la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) s'impose comme une démarche de référence [8]. Appliquée à un groupe électrogène, l'AMDEC permet d'isoler méthodiquement chaque sous-ensemble (combustible, lubrification, refroidissement, démarrage, génération électrique), d'identifier ses modes de défaillance potentiels, d'en évaluer la criticité numérique (par le produit de la fréquence, de la gravité et de la non-détection) afin de formaliser un plan de maintenance préventive optimisé, réaliste et directement exploitable par les équipes de terrain.

Le choix de ce sujet d'étude répond ainsi à une double exigence, à la fois scientifique et industrielle. Ce travail permet de faire le pont entre la mécanique des moteurs thermiques, l'électrotechnique des machines synchrones et les concepts d'ingénierie de la maintenance. L'étude ne se contente pas d'une approche descriptive, elle formalise une méthodologie d'analyse applicable aux systèmes énergétiques critiques afin de concourir à l'amélioration de leur fiabilité en milieu de production.

Introduction Générale

Le présent mémoire est dédié à l'étude technique approfondie, au diagnostic et à l'optimisation de la maintenance d'un groupe électrogène diesel. L'objectif central est de modéliser le fonctionnement du système, d'analyser le comportement de ses composants face aux pannes à l'aide de l'outil AMDEC, et de proposer un plan de maintenance préventive rigoureux capable de minimiser le taux de défaillance et de garantir une disponibilité maximale de l'installation.

2. Problématique, objectifs et démarche suivie

La problématique centrale de cette recherche peut être formulée à travers la question suivante : Comment garantir un niveau optimal de disponibilité opérationnelle d'un groupe électrogène industriel tout en minimisant l'occurrence des défaillances critiques et en optimisant les coûts d'exploitation et de maintenance associés ?

Cette problématique est d'autant plus complexe pour un groupe électrogène de secours, car ce type d'équipement passe de longues périodes à l'arrêt (phase de veille passive) tout en devant garantir un taux de réussite au démarrage proche de 100 % dès l'apparition d'une anomalie sur le réseau de distribution principal [3].

Pour résoudre cette problématique globale, notre travail se fixe les objectifs spécifiques suivants :

Réaliser une étude technique détaillée de la chaîne de conversion d'énergie (moteur thermique et alternateur synchrone).

Identifier de manière exhaustive les modes de défaillance, leurs causes physiques et leurs impacts systémiques sur l'ensemble des sous-systèmes auxiliaires.

Mettre en œuvre la méthodologie AMDEC pour quantifier la criticité des composants et isoler les éléments à risques majeurs.

Élaborer un plan de maintenance préventive (PMP) structuré, spécifiant les tâches, les périodicités et les recommandations opérationnelles applicables par un service de maintenance.

Afin de guider notre démarche d'analyse, plusieurs questions secondaires structureront notre étude :

Quels sont les principes physiques et les composants critiques qui régissent la chaîne de conversion mécano-électrique du groupe ?

Quelles sont les lois de dégradation et les pannes récurrentes qui affectent ses performances sur site ?

Comment quantifier précisément la criticité des organes à l'aide d'une grille de cotation AMDEC harmonisée ?

Quels indicateurs clés de performance (KPI) de maintenance permettent de valider l'efficacité du plan préventif proposé ?

Pour répondre méthodiquement à ces questions, le manuscrit de ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres principaux :

Le Chapitre I (Généralités sur les groupes électrogènes) dresse un panorama complet de ces équipements, définissant leur rôle stratégique dans l'industrie, les classes d'utilisation de puissance

Introduction Générale

(COP, PRP, LTP, ESP), les critères technico-économiques de dimensionnement ainsi que les contraintes normatives et environnementales associées à leur installation.

Le Chapitre II (Constitution et fonctionnement interne) détaille l'architecture multiphysique de la machine. Il aborde de manière approfondie le cycle Diesel à quatre temps, la modélisation des circuits fluides (combustible, lubrification, refroidissement), le système de démarrage électrique, les principes de l'alternateur synchrone, ainsi que la régulation de tension par boucle fermée AVR et la cinématique des systèmes d'inversion de source.

Le Chapitre III (Maintenance industrielle et méthodes d'analyse) pose les fondements théoriques de l'ingénierie de la maintenance. Il passe en revue les concepts de fiabilité, maintenabilité et disponibilité (FMD), détaille les outils d'analyse des pannes (Diagramme d'Ishikawa, Arbre de défaillances), explicite la méthodologie normative de l'AMDEC et introduit le rôle de la Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) dans le suivi des indicateurs.

Le Chapitre IV (Diagnostic des pannes et application AMDEC) constitue le cœur pratique et expérimental de notre recherche. Il applique l'ensemble des concepts précédents à un cas d'étude réel : un groupe électrogène industriel de 200 kVA de marque GMI, équipé d'un moteur Baudouin. Ce chapitre intègre le découpage structurel du système, les grilles de cotation et les tableaux AMDEC par circuit, la hiérarchisation des criticités, la procédure de diagnostic sur site et, enfin, le plan de maintenance préventive proposé pour l'installation.

Une Conclusion Générale viendra synthétiser les principales contributions de ce travail de recherche, en mettant en relief les résultats obtenus et en ouvrant des perspectives techniques quant à l'intégration des technologies de l'industrie 4.0 pour la maintenance prédictive des systèmes énergétiques autonomes.

Chapitre I
***GÉNÉRALITÉS SUR LES
GROUPES ÉLECTROGÈNES***

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPES ÉLECTROGÈNES

1.1 Définition et rôle d'un groupe électrogène

Un groupe électrogène est un système autonome de conversion d'énergie conçu pour générer une puissance électrique stable à partir de la combustion d'un hydrocarbure liquide ou gazeux [4]. Cet équipement est impérativement déployé lorsque le réseau de distribution public est absent, structurellement insuffisant ou temporairement interrompu par des aléas d'exploitation. Dans l'environnement industriel contemporain, son rôle stratégique est prépondérant : de nombreuses architectures de production ne peuvent tolérer une micro-coupure de tension sans induire un arrêt d'urgence des lignes de fabrication, des phénomènes de gommage ou de perte de synchronisme sur les automates de commande, des préjudices financiers prohibitifs, voire la mise en péril de vies humaines dans les infrastructures critiques [2].

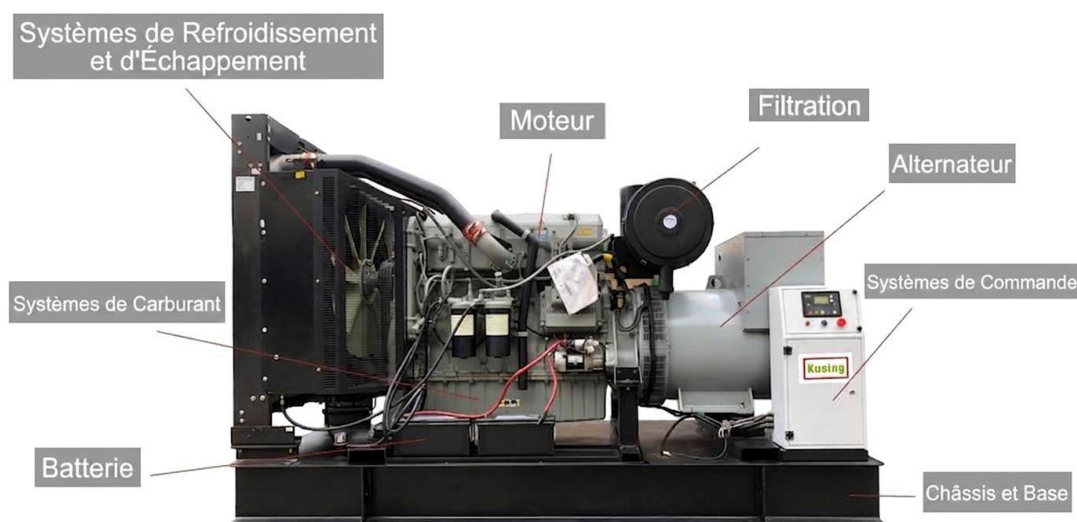


Fig. 1.1 – Composants principaux et agencement structurel d'un groupe électrogène

Sur le plan de l'ingénierie, un groupe électrogène est un système mécatronique intégré. Ses deux organes fondamentaux sont le moteur thermique à combustion interne (généralement de type Diesel pour les applications de moyenne et forte puissance, en raison de son couple massique élevé et de sa réponse transitoire) et la machine synchrone ou alternateur triphasé [4]. À cette chaîne de conversion principale sont asservis de multiples sous-systèmes auxiliaires : le châssis structurel amortisseur, la cinématique d'alimentation en combustible, l'accumulateur et le démarreur électrique, les circuits d'échange thermique (radiateur et pompe de circulation), le circuit de lubrification forcée, et l'armoire de commande numérique intégrant le régulateur automatique de tension (AVR). Le

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPES ÉLECTROGÈNE

fonctionnement global repose sur une double transition énergétique : l'énergie chimique du carburant est convertie en énergie mécanique de rotation au niveau du vilebrequin par un cycle thermodynamique, puis cette énergie cinétique est transformée en énergie électrique triphasée par le champ magnétique rotorique de l'alternateur [1].

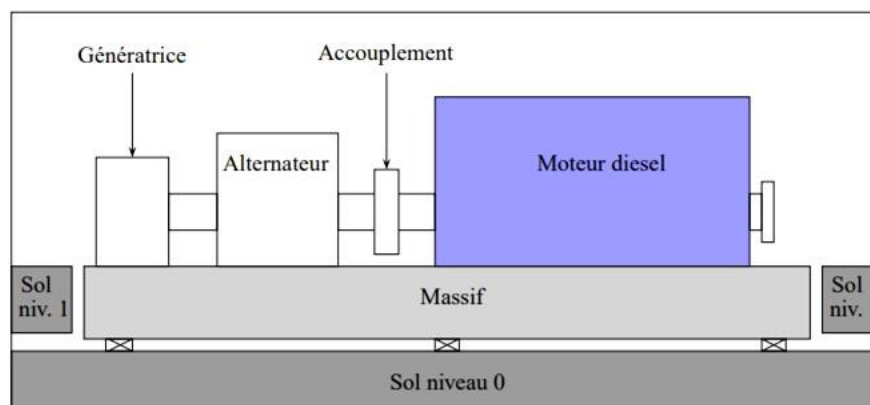


Fig. 1.2 – Schéma synoptique des flux énergétiques et des liaisons fonctionnelles internes

1.2 Importance de la continuité de service

Au sein des installations industrielles lourdes (telles que les complexes miniers ou pétrochimiques), la continuité de l'alimentation électrique s'impose comme une contrainte d'exploitation absolue [3]. Une interruption de l'onde de tension, même d'une durée inférieure à la seconde, est susceptible de provoquer le déclenchement par sous-tension des contacteurs de puissance, de figer les systèmes d'entraînement cinématique et d'entraîner des pertes de matières premières en cours de process. La criticité de cette continuité atteint son paroxysme dans les infrastructures numériques de type Data Centers, où la rupture d'alimentation menace l'intégrité des données globales, ainsi que dans le secteur hospitalier où la disponibilité énergétique conditionne directement les équipements de support de vie [2].

C'est pour pallier ces vulnérabilités systémiques que le groupe électrogène est intégré comme source de substitution prioritaire. Connecté à un inverseur de source automatique (Normal/Secours), le système supervise en continu les paramètres électriques du réseau principal (tension, fréquence, déséquilibre). Dès le franchissement d'un seuil critique, la logique de commande initie la séquence de démarrage du moteur thermique et commande le basculement des lignes de charge vers l'alternateur. Le temps de reprise global (couramment compris entre 8 et 15 secondes) demeure intimement corrélé à des facteurs physiques tels que la température du bloc moteur (maintien en préchauffage obligatoire), l'état de charge de la batterie de démarrage et la dynamique d'établissement du champ magnétique de l'alternateur [4]. La garantie de cette réactivité opérationnelle exige la mise en œuvre d'une politique de maintenance rigoureuse, matérialisée par des essais de délestage périodiques, des analyses physico-chimiques des fluides (lubrifiant et liquide de refroidissement) et un suivi métrologique des actionneurs [6].

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPES ÉLECTROGÈNE

1.3 Typologie des groupes électrogènes

Les groupes électrogènes se déclinent en plusieurs configurations techniques adaptées aux contraintes d'implantation et aux profils de charge [4] :

- **Unités portables** : De faible puissance (généralement inférieures à 10 kVA), exploitées pour des applications intermittentes, des besoins domestiques ou des chantiers isolés.



- **Unités capotées / insonorisées** : Intégrées dans une enveloppe métallique isolée acoustiquement par des matériaux phono-absorbants, réduisant l'émergence sonore conformément aux directives environnementales en vigueur.



- **Groupes industriels fixes** : Unités de forte puissance (de plusieurs centaines à quelques milliers de kVA), installées de manière permanente dans des locaux techniques dédiés ou des conteneurs maritimes ISO standardisés, configurées pour un couplage réseau ou une exploitation en centrale d'énergie.



1.4 Classes d'utilisation et régimes de puissance

La caractérisation d'un groupe électrogène requiert la définition exacte de son régime de puissance conformément à la norme internationale de référence ISO 8528-1 [1]. On distingue trois régimes principaux :

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPES ÉLECTROGÈNE

- **Puissance de secours d'urgence (ESP - Emergency Standby Power) :** Puissance maximale disponible pour une utilisation sous charge variable en cas de panne du réseau de distribution. L'utilisation annuelle est contractuellement limitée (généralement inférieure à 200 h/an).
- **Puissance à durée limitée (LTP - Limited-Time Running Power) :** Puissance maximale que le groupe peut fournir pendant un nombre d'heures fixe (jusqu'à 500 h/an) à charge constante.
- **Puissance principale (PRP - Prime Power) :** Puissance maximale disponible pour un fonctionnement continu sous charge variable, avec une capacité de surcharge temporaire de 10% pour une durée limitée.

En parallèle, le comportement dynamique du système face aux impacts de charge est régi par des classes de performances strictes, allant de la classe G1 (exigences de stabilité faibles pour l'éclairage basique) à la classe G4 (exigences de stabilité draconiennes pour l'informatique critique et les systèmes automatisés sensibles) [1].

Classe	Typologie des charges raccordées	Exigence de stabilité dynamique
G1	Systèmes d'éclairage, résistances chauffantes simples, charges passives	Faible (tolérance élevée aux variations d'onde)
G2	Systèmes de pompage, ventilateurs, actionneurs mécaniques standard	Moyenne (caractéristiques proches du réseau public)
G3	Charges électroniques non linéaires, variateurs de vitesse, automates	Élevée (distorsion harmonique et Transitoires maîtrisés)
G4	Systèmes informatiques, Data Centers, imagerie médicale, charges critiques	Très élevée (stabilité statique et dynamique absolue)

Tab. 1.1 – Classes d'utilisation de performances dynamiques selon la norme ISO 8528-1 [1]

1.5 Normes, sécurité et environnement d'installation

L'implantation d'un groupe électrogène industriel ne peut s'affranchir d'une analyse fine des risques environnementaux et thermiques [4]. Lors de sa phase de fonctionnement à pleine charge, un moteur Diesel dissipe une énergie thermique considérable sous forme de rayonnement de bloc et de gaz d'échappement à haute température (dépassant fréquemment 450°C). Si le débit de ventilation mécanique du local technique est sous-dimensionné, l'accentuation de la température ambiante engendre une chute de la densité de l'air d'admission, provoquant un phénomène de dérating (déclassement de la puissance nominale du groupe) et le déclenchement de la sécurité d'arrêt par surchauffe de la culasse.

L'ingénierie du local doit donc valider mathématiquement les sections des gaines d'amenée d'air frais

Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LES GROUPES ÉLECTROGÈNE

et d'extraction de l'air chaud traversant le radiateur. De plus, l'installation doit respecter scrupuleusement la réglementation sur le stockage des hydrocarbures (double paroi pour les réservoirs journaliers, bacs de rétention des fuites), l'atténuation acoustique (silencieux d'échappement critiques) et la conformité des schémas de liaison à la terre (régimes de neutre IT ou TN pour la sécurité des personnes contre les contacts indirects).

1.6 Critères de dimensionnement de l'installation

Le processus de dimensionnement technique exact d'un groupe s'appuie sur une méthodologie rigoureuse d'inventaire de la charge [4]. Une erreur classique consiste à sommer de manière arithmétique les puissances nominales des récepteurs. En réalité, le dimensionnement est gouverné par le comportement transitoire des moteurs asynchrones triphasés au démarrage, dont l'appel de courant (pouvant atteindre 6 à 8 fois l'intensité nominale) génère une chute de tension transitoire sévère au niveau des bornes de l'alternateur. Si cette chute excède 15 à 20%, les contacteurs en amont risquent de s'ouvrir intempestivement, inhibant la reprise de charge.

Critère d'ingénierie	Paramètre d'analyse requis	Conséquence sur le choix du système
Bilan de puissance	Profil de la charge nominale et facteur de marche	Fixe la puissance apparente nominale (S_n en kVA).
Régime transitoire	Puissance unitaire et mode de démarrage du plus gros moteur	Détermine la taille de l'alternateur pour absorber l'impact.
Autonomie fluidique	Durée de criticité requise sans Intervention logistique	Spécifie la géométrie du réservoir journalier et de la cuve.
Facteurs de site	Température maximale de l'air, altitude géographique	Impose les coefficients de correction de puissance (Dérating).

Tab. 1.2 – Matrice des critères fondamentaux de dimensionnement d'une installation

1.7 Conclusion du chapitre I

Ce chapitre introductif met en exergue qu'un groupe électrogène industriel ne se résume pas à un simple assemblage de composants mécaniques et électriques. Il constitue un système multiphysique intégré dont la fiabilité opérationnelle dépend d'une interaction parfaite entre la thermodynamique du moteur Diesel, l'électromagnétisme de l'alternateur et l'automatisme de la régulation de tension. La maîtrise de ces interfaces est le prérequis indispensable à l'analyse de sa sûreté de fonctionnement [5]. C'est cette architecture interne et le couplage de ses circuits fluides et électriques que nous allons modéliser et analyser de manière approfondie dans le Chapitre II.

Chapitre II
***CONSTITUTION ET
FONCTIONNEMENT INTERNE***

Chapitre 2 : Constitution et Fonctionnement du Groupe Électrogène

Pour produire l'électricité, le groupe électrogène réalise le schéma ci-dessous. Le moteur thermique alimenté en combustible (gasoil) convertit l'énergie chimique en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est transmise au rotor de l'alternateur, pour ensuite être convertie en énergie électrique et distribuée sur la plaque à borne [1].

1.1 Chaîne de conversion de l'énergie

Le fonctionnement d'un groupe électrogène peut être résumé par une chaîne de conversion. Le carburant est stocké dans un réservoir, puis envoyé vers le moteur par le circuit d'alimentation. Dans les cylindres, la combustion produit une pression qui déplace les pistons. Le mouvement alternatif est transformé en rotation par l'ensemble bielle-manivelle [1].

L'arbre moteur entraîne ensuite l'alternateur. Dans l'alternateur, le champ magnétique tournant coupe les enroulements du stator et induit une tension triphasée. La fréquence dépend directement de la vitesse de rotation et du nombre de pôles. Pour obtenir 50 Hz avec un alternateur quatre pôles, le moteur tourne généralement à 1500 tr/min [1].

Cette chaîne explique pourquoi un défaut mécanique peut devenir un défaut électrique : si la vitesse moteur varie, la fréquence varie ; si l'excitation varie, la tension varie.

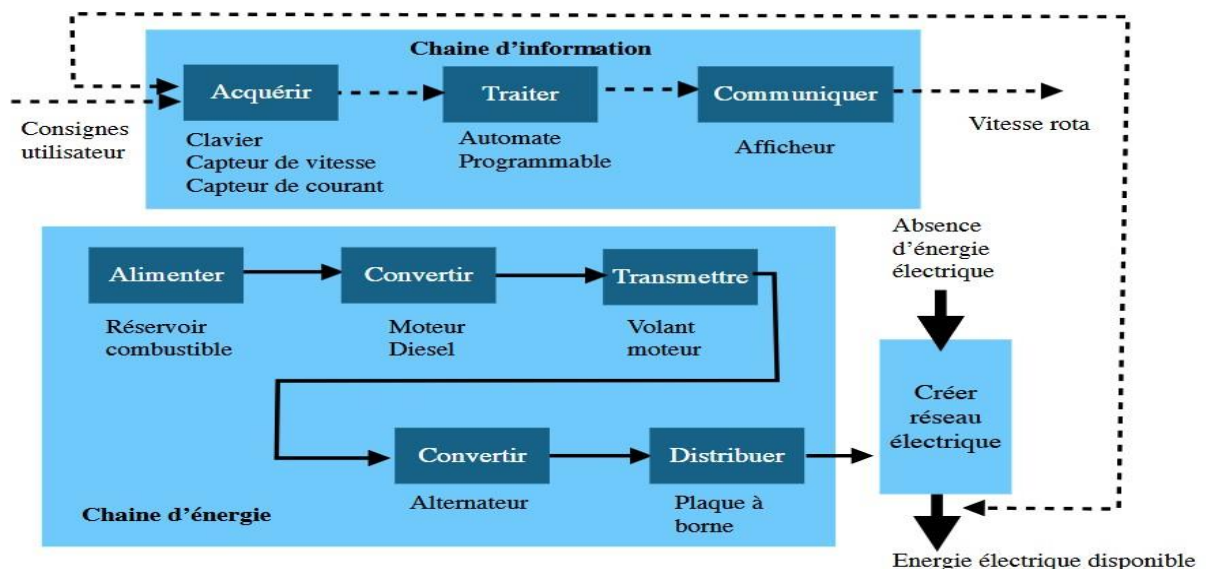


Fig3. Schéma fonctionnel du groupe électrogène [1].

1.2 Moteur Diesel : rôle et organes principaux

Le moteur Diesel représente la partie mécanique principale du groupe électrogène. C'est lui qui fournit l'énergie nécessaire pour faire tourner l'alternateur. Dans les installations industrielles, ce type de moteur est souvent préféré parce qu'il est robuste, économique en carburant et capable de travailler pendant plusieurs heures avec une vitesse relativement stable [2]. Cette stabilité est importante, car la fréquence de la tension produite par l'alternateur dépend directement de la vitesse de rotation du moteur.

Dans la plupart des groupes électrogènes industriels, on trouve un moteur Diesel à quatre temps, généralement refroidi par eau. Son fonctionnement passe par quatre phases : l'admission, la compression, la combustion-détente et l'échappement. Pendant la compression, l'air atteint une température élevée, puis le gasoil est injecté sous pression dans la chambre de combustion. Le carburant s'enflamme alors spontanément, ce qui crée une forte pression sur le piston et produit le mouvement mécanique transmis au vilebrequin [2].

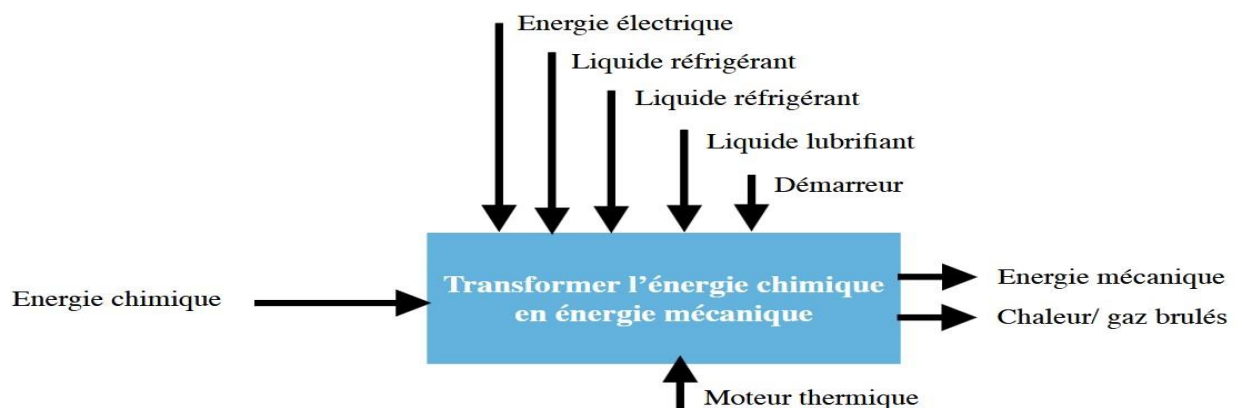


Fig4. Diagramme fonctionnel du moteur thermique [2].

Le moteur est constitué de plusieurs organes essentiels, comme le bloc-cylindres, la culasse, les pistons, les segments, les bielles, le vilebrequin, l'arbre à cames, les soupapes, les injecteurs et la pompe d'injection. Ces éléments travaillent ensemble dans des conditions sévères, avec des efforts mécaniques importants et des températures élevées. Pour assurer leur bon fonctionnement, le moteur a besoin de circuits auxiliaires : le circuit d'alimentation en gasoil, le circuit de lubrification, le circuit de refroidissement, l'admission d'air, l'échappement et le système de démarrage [3].

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

Les composants du moteur diesel sont présentés dans les figures suivantes :

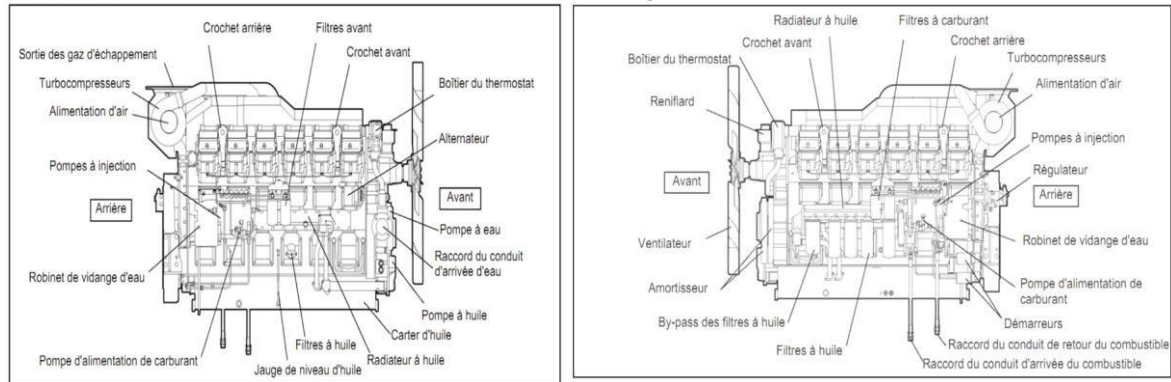


Fig5. Vue détaillée d'un moteur diesel [2]



Fig6. Vue éclatée d'un moteur diesel [2].

Les éléments constitutifs d'un moteur peuvent être classifiés comme suit :

Eléments fixes	Eléments mobiles
1. Couvre – culasse	6. Arbre à cames
2. Culasse	7. Soupapes
3. Bloc moteur ou bloc cylindre	8. Courroie ou chaîne de distribution
4. Carter chapeau de palier	9. Equipage mobile (volant moteur, bielles, pistons)

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

On définit les composants principaux comme suit :

- **Cylindre** : Partie du moteur qui sert de guide au piston et dans laquelle se déroule le cycle de combustion.



- **Culasse** : Bloc qui enferme le haut des cylindres et qui porte en creux une partie importante de la chambre de combustion.



- **Bloc cylindre** : Pièce massive de fonderie en fonte ou en aluminium qui forme la partie centrale du bloc moteur, creuse dans les endroits où circulera le liquide de refroidissement et percée de différents orifices et des circuits de graissage.



- **Carter** : Pièce en tôle emboutie ou en alliage léger coulé, qui ferme le bas du moteur et qui sert de réservoir d'huile.



Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

- **Came** : Organe mécanique, de profil non circulaire, qui transforme un mouvement circulaire en mouvement rectiligne alternatif ou oscillant.



- **Arbre à cames** : Organe du moteur, entraîné par le vilebrequin, portant des excentriques qui commandent l'ouverture des soupapes.
- **Soupapes** : Pièces réglant l'entrée et la sortie des gaz dans la chambre de combustion.



- **Bielle** : Pièce mécanique reliant le piston au vilebrequin, transformant le mouvement rectiligne en rotation.



- **Piston** : Élément coulissant dans le cylindre recevant la poussée des gaz brûlés.



- **Vilebrequin** : Arbre rotatif transformant le mouvement des pistons en force circulaire.

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE



Organe	Fonction	Risque en cas de default
Piston/bielle	Transformer la pression en mouvement	Cognement, casse mécanique
Vilebrequin	Transmettre le couple	Vibration, grippage
Injecteur	Pulvériser le gasoil	Fumée, perte de puissance
Pompe huile	Assurer la lubrification	Usure rapide, serrage
Radiateur	Évacuer la chaleur	Surchauffe moteur

Tab3. Fonctions et anomalies de quelques organes [2].

1.2.1 Cycle Diesel quatre temps

Le moteur Diesel utilisé dans un groupe électrogène fonctionne généralement selon le cycle à quatre temps : admission, compression, détente et échappement. Chaque temps correspond à un mouvement précis du piston entre le point mort haut et le point mort bas [1].

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

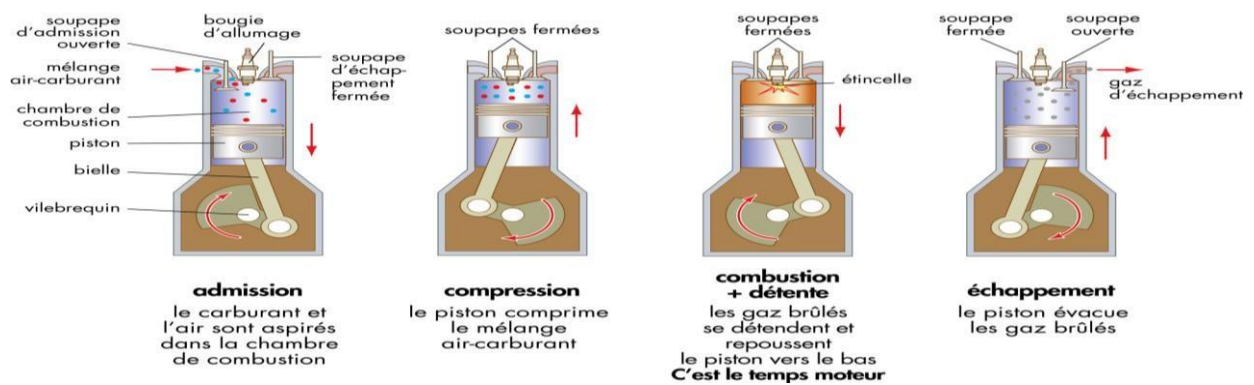


Fig7. Les 4 temps du moteur à combustion [1].

Pendant l'admission, la soupape d'admission s'ouvre et le piston descend, ce qui permet d'aspirer uniquement de l'air dans le cylindre. Pendant la compression, les deux soupapes sont fermées et le piston remonte. L'air est alors fortement comprimé, ce qui provoque une augmentation importante de sa pression et de sa température. À la fin de cette phase, le gasoil est injecté sous haute pression et s'enflamme spontanément [1].

La détente est le temps moteur. La combustion pousse le piston vers le bas, transmettant le mouvement au vilebrequin. Enfin, pendant l'échappement, la soupape d'échappement s'ouvre et les gaz brûlés sont évacués [1].

1.2.2 Circuit d'alimentation en combustible

Le circuit de combustible amène au moteur une quantité de gasoil propre et bien dosée. Il comprend : le réservoir, la crépine, les conduites, la pompe d'alimentation, le préfiltre décanteur, le filtre fin, la pompe d'injection et les injecteurs [3].

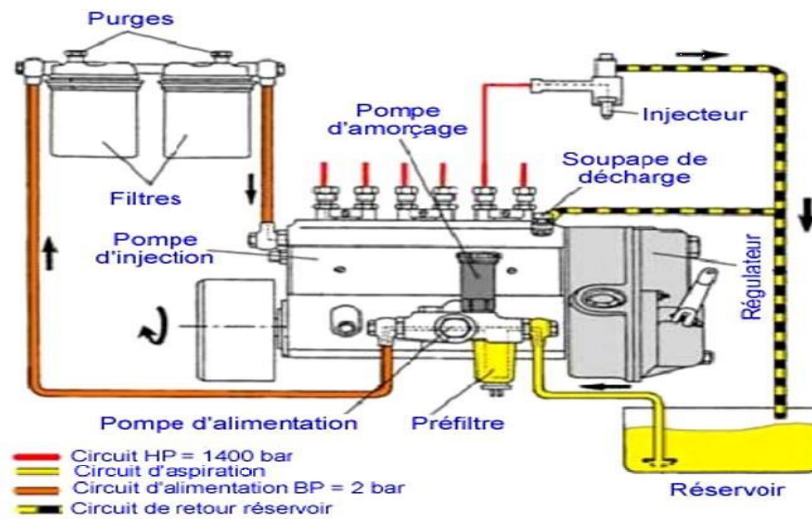


Fig8. Schéma du système d'injection de carburant pour moteur diesel [3].

La qualité du carburant est primordiale. La présence d'eau ou d'impuretés peut provoquer corrosion et colmatage. Pour un groupe de secours, le vieillissement du gasoil est un problème à surveiller [2].

1.2.3 Circuit de lubrification

Son rôle principal est de réduire les frottements entre les pièces mobiles (vilebrequin, bielles, pistons). L'huile participe aussi au refroidissement, au nettoyage et à l'étanchéité des segments [3].

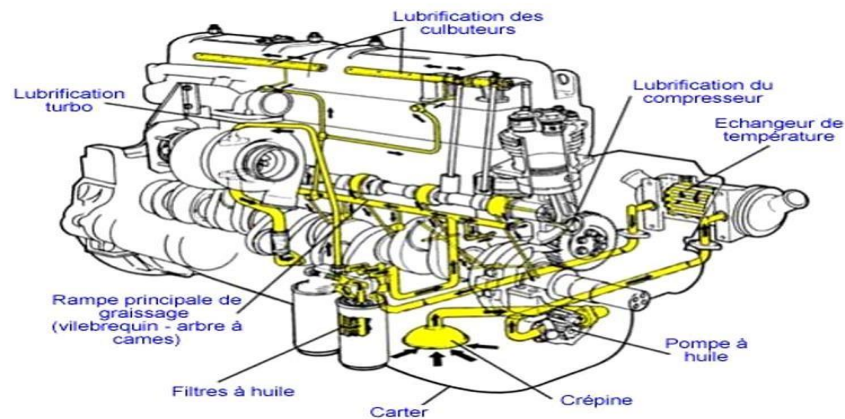


Fig9. Schéma du système de lubrification d'un moteur diesel [3].

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

Une pression d'huile insuffisante est une alarme sérieuse pouvant mener au grippage du moteur. La maintenance impose des vidanges périodiques et le remplacement régulier des filtres [2].

1.2.4 Circuit de refroidissement

Il évacue la chaleur produite par la combustion. Dans les groupes industriels, il se fait par eau. Une pompe assure la circulation du liquide qui, une fois chaud, est refroidi dans le radiateur par un ventilateur [3].

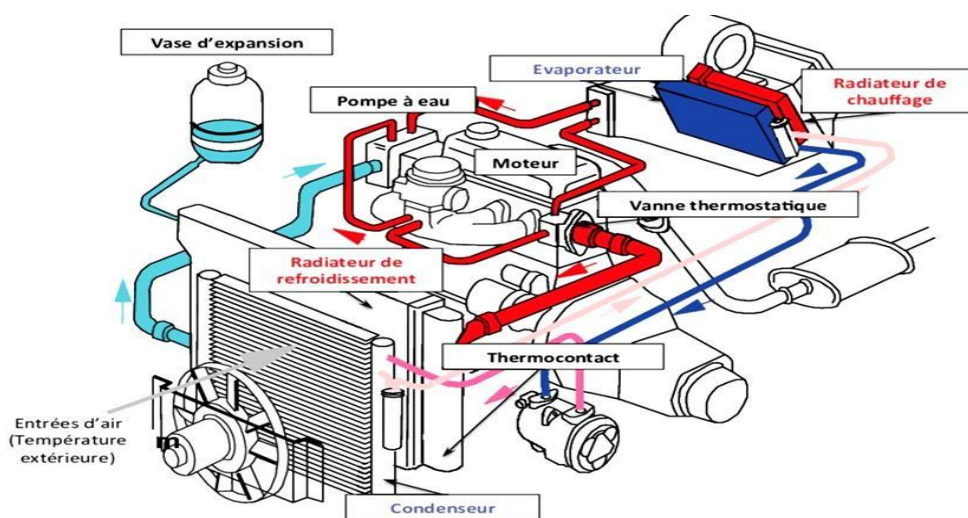


Fig10. Schéma du circuit de refroidissement d'un moteur diesel [3].

Élément	Contrôle	Observation attendue
Radiateur	Inspection visuelle	Pas de fuite, ailettes propres
Pompe à eau	Bruit et fuite	Pas de jeu anormal
Thermostat	Température de service	Ouverture normale
Ventilateur	Courroie et hélice	Tension correcte
Liquide	Niveau et couleur	Pas de rouille ni d'huile

Tab4. Contrôle des éléments du système de refroidissement [2].

1.2.5 Système de démarrage

Le démarrage est généralement assuré par une batterie et un démarreur électrique. Sur les groupes de faible puissance, un démarrage manuel par lanceur peut être présent [3].

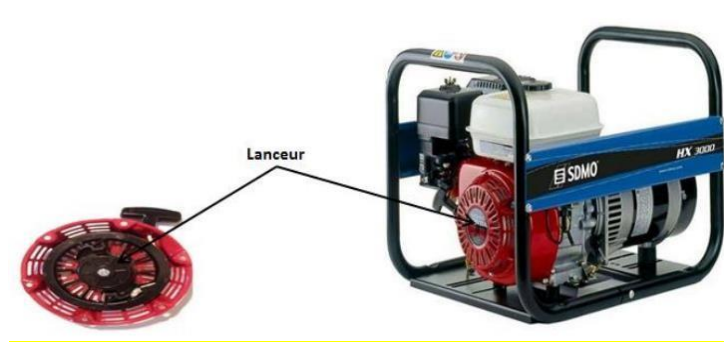


Fig11. Démarreur manuel d'un moteur diesel [3].

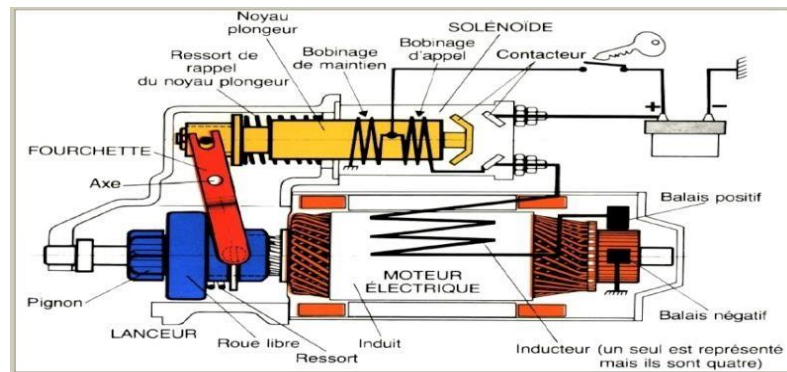


Fig12. Schéma de fonctionnement d'un démarreur [3].

La fiabilité du système dépend de l'état de la batterie et des connexions. Des essais périodiques sont indispensables pour garantir la mise en service en cas de besoin [2].



Fig13. Démarreur du groupe électrogène [2].

1.3 Alternateur : principe général

L'alternateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les groupes industriels, on utilise une machine synchrone composée d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile) [1].

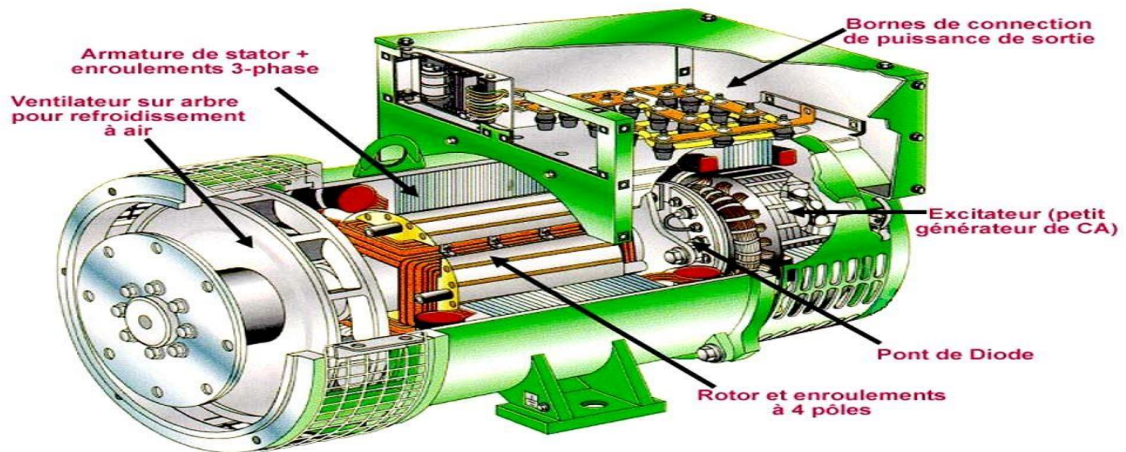


Fig14. Composants principaux d'un alternateur [1].

La tension de sortie est maintenue stable par un régulateur automatique de tension (AVR), qui ajuste le courant d'excitation en fonction de la charge [5]. La fréquence, quant à elle, est liée à la vitesse de rotation du moteur [1].

1.3.1 Stator, rotor et excitation

Le stator produit le système triphasé équilibré grâce à ses enroulements décalés de 120 degrés. Le rotor crée le champ magnétique tournant. Le système d'excitation peut être avec ou sans balais [6].

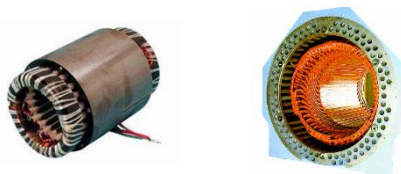


Fig15. Stator d'alternateur [6].



Fig16. Rotor d'alternateur [6].

Partie	Rôle	Défaillance possible
Stator	Produire la tension triphasée	Isolement faible, échauffement
Rotor	Créer le champ magnétique	Court-circuit, déséquilibre
Diodes	Redresser le courant d'excitation	Diode coupée ou en court-circuit
Roulements	Guider la rotation	Bruit, vibration
AVR	Réguler la tension	Tension instable ou nulle

Tab4. Contrôle des éléments du système de refroidissement [2].

1.3.2 Principe de fonctionnement :

Le principe d'induction magnétique est généralement expérimenté en déplaçant un aimant permanent dans une bobine. Une tension se crée aux bornes de la bobine. Un alternateur fonctionne selon ce principe ; un électro-aimant, alimenté par un courant d'excitation, est en rotation à l'intérieur des trois bobines : il produit ainsi trois tension triphasé alternatif décalées de 120° . L'énergie produite par un alternateur est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'électro-aimant et à la puissance qui elle-même est proportionnelle au courant d'excitation.

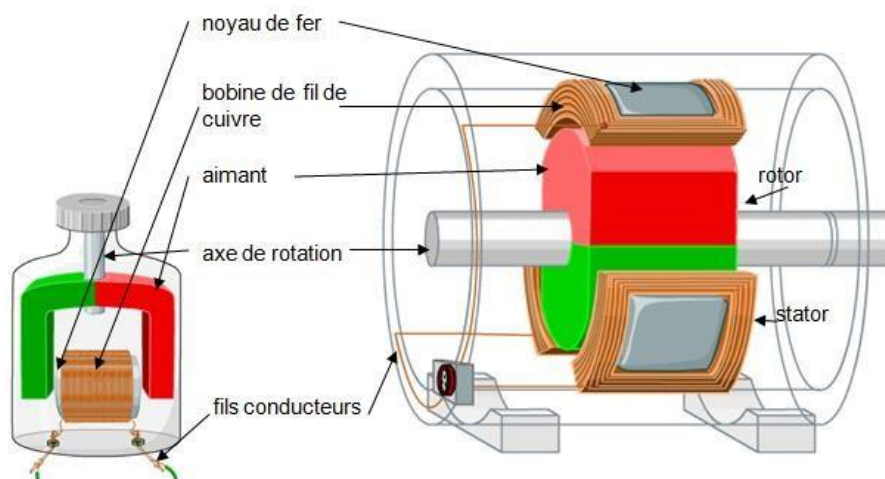


Fig17. Schéma de fonctionnement de l'alternateur

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

Le système sans balais diminue l'entretien car il évite l'usure des balais. Cependant, les diodes, les connexions et l'AVR restent des éléments à surveiller. Un défaut d'excitation se traduit souvent par une absence de tension ou une tension instable.

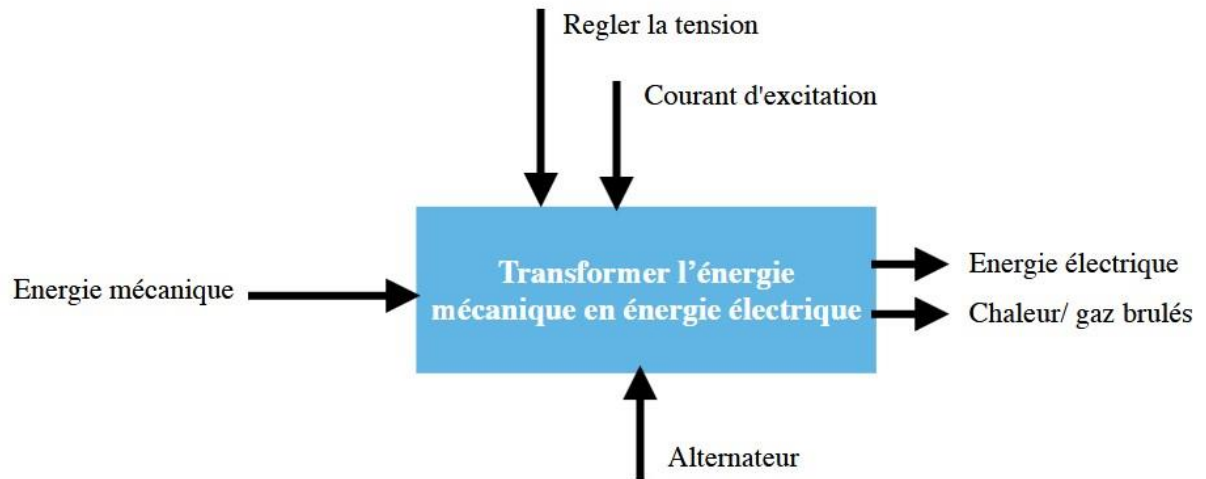


Fig18. Diagramme fonctionnel de l'alternateur

Partie	Rôle	Défaillance possible
Stator	Produire la tension triphasée	Isolement faible, échauffement
Rotor	Créer le champ magnétique	Court-circuit, déséquilibre
Diodes	Redresser le courant d'excitation	Diode coupée ou en court-circuit
Roulements	Guider la rotation	Bruit, vibration, échauffement
AVR	Réguler la tension	Tension instable ou nulle

Tab5. Défaillances possibles des composants de l'alternateur

1.3.3 Régulation automatique de tension AVR

Lorsque la charge augmente, la tension aux bornes de l'alternateur a tendance à diminuer à cause de l'impédance interne de la machine. Le rôle de l'AVR est de mesurer la tension de sortie, de la comparer à une consigne et d'ajuster le courant d'excitation pour maintenir la tension proche de la valeur nominale.

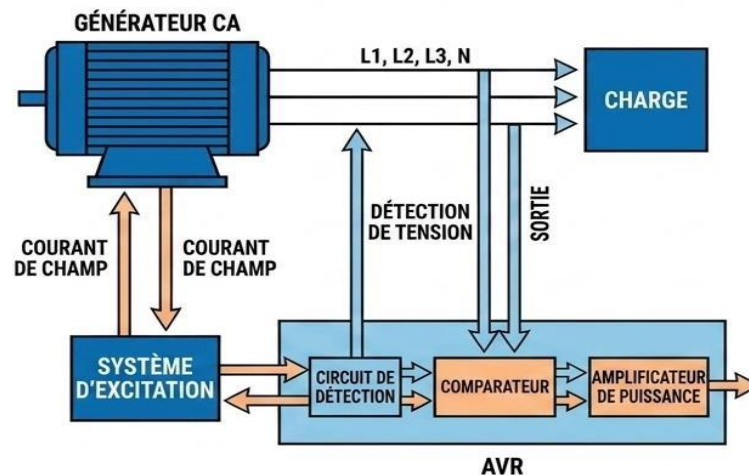
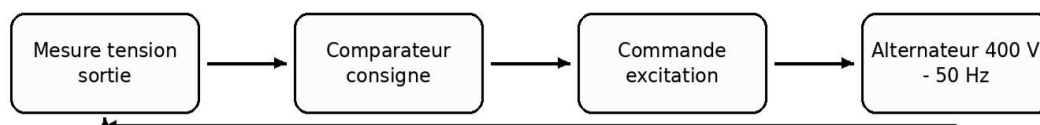


Fig19. Diagramme du système de régulation AVR

Un AVR défaillant peut provoquer une surtension, une sous-tension ou des oscillations. Ces phénomènes sont dangereux pour les récepteurs sensibles et pour l'alternateur lui-même. Il est donc important de vérifier les connexions, les fusibles de mesure, le réglage de tension et l'état de l'excitation.

Dans une installation de secours, la stabilité de tension est particulièrement importante au moment du basculement de charge, car plusieurs récepteurs peuvent démarrer presque en même temps.



La boucle corrige rapidement les variations de tension dues au changement de charge.

Fig20. Principe simplifié de régulation AVR

1.4 Batterie, chargeur, châssis et réservoir

La batterie fait partie des éléments que l'on néglige souvent dans un groupe électrogène, alors qu'elle joue un rôle essentiel au moment du démarrage. Même si le moteur, l'alternateur et les autres organes sont en bon état, le groupe ne peut pas démarrer si la batterie est faible.

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

ou déchargée. Elle fournit l'énergie électrique nécessaire au démarreur pour lancer le moteur Diesel jusqu'à ce qu'il devienne autonome. Pour cette raison, elle doit être maintenue en bon état et toujours chargée à l'aide d'un chargeur automatique.

Les batteries pour groupes électrogènes (moteur thermique) sont généralement des modèles 12V (parfois 24V) au plomb, caractérisées par une forte capacité de démarrage (CCA) pour lancer le moteur. Elles se distinguent par leur capacité (Ah) adaptée à la taille du moteur et une faible auto-décharge pour assurer le démarrage après une longue période d'inactivité

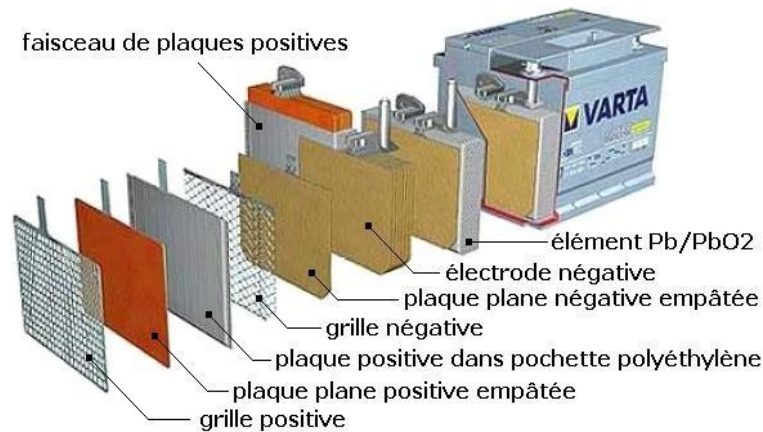


Fig21. Schéma d'une batterie d'accumulateurs au plomb

1.4.1 Principe de fonctionnement

Une batterie au plomb est constituée d'un certain nombre d'éléments accumulateurs montés en série et reliés par des connexions en plomb soudé (une batterie de 12 V contient 6 éléments). Les accumulateurs sont logés dans un bac en plastique (polypropylène, ABS...), fermé par un couvercle scellé. Chaque accumulateur est composé d'un ensemble de couples d'électrodes positives et négatives isolées par un séparateur microporeux, destiné à éviter les courts-circuits tout en laissant circuler les ions.

Les électrodes sont formées d'une grille en alliage de plomb, dont les alvéoles sont remplies d'une pâte poreuse de :

- Peroxyde de plomb PbO_2 pour l'électrode positive
- Plomb métallique Pb pour l'électrode négative

Les électrodes baignent dans un électrolyte, solution diluée d'acide sulfurique H_2SO_4 , sous forme liquide, sous forme de gel ou absorbée dans des feutres en fibre de verre. Ce sont des réactions d'oxydo-réduction : il y a un transfert d'électrons. Les polarités de la batterie sont alternativement anode ou cathode, suivant le mode de fonctionnement (charge ou décharge) : la borne négative est anode pendant la décharge et cathode pendant la charge. Un électrolyte est une solution liquide (généralement aqueuse) contenant des ions mobiles — cations positifs

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

et anions négatifs — qui lui confèrent la capacité de conduire le courant électrique au pure et d'acide sulfurique H_2SO_4 (2H^+ ; SO_4^{2-})

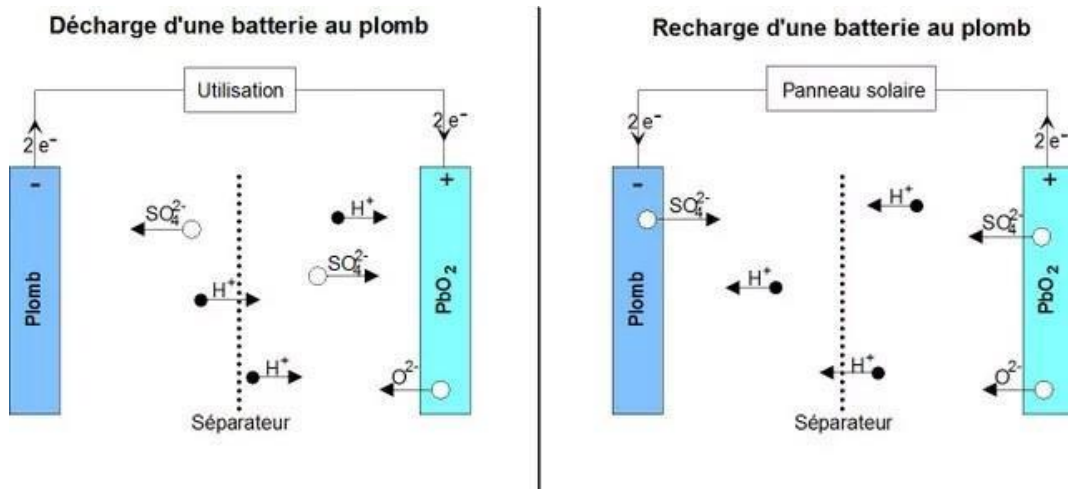


Fig22. Diagramme illustre le fonctionnement électrochimique d'une batterie au plomb

L'entretien de la batterie ne se limite pas à mesurer sa tension à vide. Une batterie peut afficher une tension correcte, mais ne pas être capable de fournir un courant suffisant pendant le démarrage. Il est donc important de contrôler aussi sa tenue en charge, l'état des bornes, le serrage des cosses et la présence éventuelle d'oxydation. Une mauvaise connexion peut provoquer une chute de tension et empêcher le démarrage du groupe.

Le châssis représente la base mécanique du groupe électrogène. Il supporte le moteur et l'alternateur, tout en assurant leur alignement. Il doit aussi absorber une partie des vibrations grâce aux silentblocs. Si les fixations sont desserrées ou si les silentblocs sont usés, les vibrations augmentent, ce qui peut accélérer l'usure des roulements, fatiguer l'accouplement et provoquer des fissures sur certaines parties métalliques.

Le réservoir, quant à lui, assure le stockage du carburant. Il doit être propre, étanche et adapté à l'autonomie souhaitée. Pour les groupes de secours qui fonctionnent rarement, il est recommandé de contrôler périodiquement le gasoil afin d'éviter l'eau, les dépôts et l'encrassement du circuit d'alimentation.

1.5 Armoire de commande et inverseur de source



Fig23. Armoire de commande avec un inverseur attaché

L'armoire de commande regroupe les organes de contrôle, les protections et les automatismes. Elle reçoit les informations des capteurs : pression d'huile, température d'eau, niveau de carburant, vitesse, tension, fréquence et défauts électriques. Elle permet de démarrer, arrêter, signaler les alarmes et protéger le groupe.

L'inverseur de source automatique, appelé aussi ATS, compare l'état du réseau normal et celui du groupe. En cas d'absence de tension réseau, il envoie l'ordre de démarrage, attend la stabilisation de la tension et de la fréquence, puis bascule la charge sur le groupe. Lorsque le réseau revient, il rebascule la charge et commande l'arrêt après refroidissement. L'inverseur de source garantissant la distribution et la disponibilité de l'énergie électrique. Ces commutateurs de sources peuvent être à commande manuelle, automatique ou à distance. Ils transfèrent l'alimentation électrique principale des charges vers une source d'alimentation secondaire tel que groupe électrogène ou source d'énergie renouvelable.

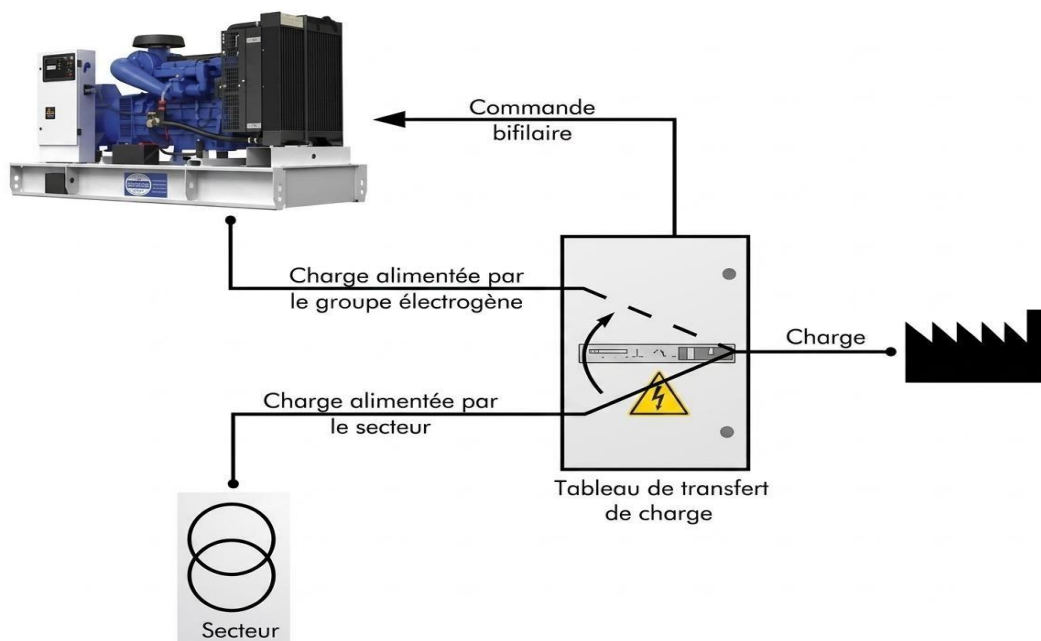


Fig24. Diagramme illustre le fonctionnement d'un système d'inversion de source

Pour commander et contrôler son fonctionnement, le groupe électrogène est équipé d'un système de contrôle / commande électronique, spécialement conçu à cet effet. En fonction des besoins, divers coffrets peuvent être montés, en standard, sur le groupe. D'autres systèmes plus spécialisés peuvent être aménagés pour des installations spécifiques, auquel cas une documentation distincte est fournie.

La fiabilité de cette armoire dépend du bon état des relais, fusibles, contacteurs, temporisateurs, borniers, câbles et paramètres du contrôleur.

1.5.1 Modes de fonctionnement : manuel, automatique et essai

Le fonctionnement manuel est utilisé lors des interventions, des essais ou dans les installations simples. L'opérateur donne l'ordre de démarrage et surveille les grandeurs principales. Ce mode demande de la vigilance car une erreur de manipulation peut provoquer un mauvais basculement ou une surcharge.

Le fonctionnement automatique est le plus adapté aux groupes de secours. L'automatisme détecte la coupure du réseau et exécute la séquence. L'avantage est la rapidité et la disponibilité même en absence d'opérateur. L'inconvénient est la dépendance à la logique de commande et à ses capteurs.

Le mode essai permet de tester le groupe à vide ou en charge. Un essai à vide vérifie le démarrage, mais ne suffit pas à garantir le comportement réel. Un essai en charge est plus représentatif car il sollicite le moteur, l'alternateur et la régulation.

Mode	Avantage	Limite
Manuel	Simple, utile en maintenance	Dépend de l'opérateur
Automatique	Réponse rapide à la coupure	Dépend de l'armoire
Essai à vide	Facile à réaliser	Ne vérifie pas la tenue en charge
Essai en charge	Très représentatif	Demande organisation et sécurité

Tab 6. Comparaison des différents modes de fonctionnement.

1.5.2 Modes d'utilisation d'un groupe électrogène

Un groupe électrogène peut être utilisé comme source principale, source de secours ou source de pointe. En source principale, il alimente l'installation pendant de longues périodes. La maintenance doit alors être organisée en fonction des heures de fonctionnement, avec un stock de pièces et une surveillance régulière.

En source de secours, le groupe reste en attente et démarre seulement lors d'une coupure. Ce cas est trompeur : le faible nombre d'heures ne signifie pas absence de maintenance. La batterie, le gasoil, les durites, les joints et les contacts électriques vieillissent même si le moteur ne tourne pas.

En source de pointe, le groupe aide le réseau pendant les périodes de forte demande. Cette utilisation demande parfois le couplage avec le réseau et donc une synchronisation correcte.

Utilisation	Durée typique	Point critique
Secours	Quelques heures par an	Démarrage fiable
Production principale	Plusieurs heures par jour	Usure et consommation
Pointe / appoint	Selon besoin du site	Couplage et délestage

Tab 7. Comparaison des différents modes d'utilisation.

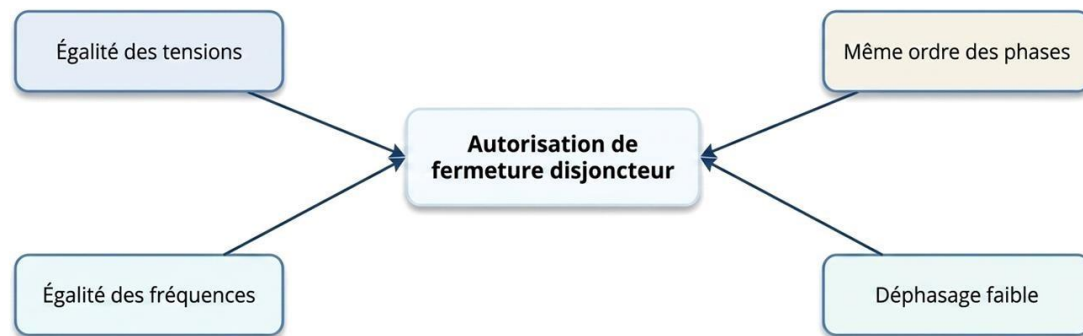
1.6 Couplage avec le réseau ou avec un autre groupe

Le couplage consiste à connecter un alternateur en parallèle avec une autre source. Cette opération est délicate car deux sources alternatives ne peuvent être mises ensemble que si leurs grandeurs sont compatibles. Les conditions principales sont l'égalité des tensions, l'égalité des fréquences, le même ordre des phases et un faible déphasage à l'instant de fermeture.

Si ces conditions ne sont pas respectées, des courants importants circulent entre les sources. Ces courants ne servent pas à alimenter la charge ; ils fatiguent l'alternateur, les disjoncteurs et les organes d'excitation. Un mauvais couplage peut aussi provoquer un couple mécanique brutal sur l'arbre.

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

Le couplage peut être manuel avec synchroscope ou automatique avec un module spécialisé qui agit sur la vitesse et l'excitation.



Un mauvais couplage provoque des courants de circulation et des efforts électromécaniques importants

Fig25. Conditions de couplage avec le réseau.

Les protections ont pour rôle de détecter les situations dangereuses et d'arrêter le groupe ou de déclencher le disjoncteur avant la détérioration du matériel. Elles concernent l'alternateur, le moteur et l'installation alimentée.

Pour l'alternateur, on retrouve les protections contre les surcharges, courts-circuits, défauts d'isolement, surtensions, sous-tensions, surfréquences, sous-fréquences et retour de puissance. Pour le moteur, les défauts importants sont la basse pression d'huile, la température d'eau élevée, le niveau bas de liquide, le manque de carburant et la survitesse.

Les protections doivent être testées avec méthode. Une protection existante mais mal réglée donne une fausse impression de sécurité.

Protection	Grandeur surveillée	Action typique
Basse pression huile	Pression lubrification	Arrêt moteur
Température eau haute	Circuit refroidissement	Alarme puis arrêt
Survitesse	Vitesse moteur	Arrêt d'urgence
Surcharge alternateur	Courant / puissance	Déclenchement disjoncteur
Sous-tension	Tension sortie	Alarme ou délestage

Tab 8. Protection contre les défauts possibles.

1.7 Sécurité lors de l'exploitation

L'exploitation d'un groupe électrogène nécessite une attention particulière aux règles de sécurité, car cet équipement présente plusieurs risques en même temps. Pendant son fonctionnement, il produit du bruit, de la chaleur, des vibrations et des gaz d'échappement. Il contient aussi des pièces tournantes, du carburant inflammable et des circuits électriques sous tension. Pour cette raison, le groupe électrogène doit être installé dans un local adapté, bien

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

ventilé, propre, suffisamment éclairé et facile d'accès pour les opérations de contrôle et de maintenance.

La ventilation du local est indispensable pour éviter l'accumulation de chaleur et assurer une bonne admission d'air au moteur. Les gaz d'échappement doivent être évacués correctement vers l'extérieur à travers une conduite étanche, afin d'éviter tout risque d'intoxication ou d'échauffement anormal. Le local doit également être équipé de moyens d'extinction adaptés au risque électrique et au carburant, comme des extincteurs appropriés et accessibles.

Avant toute intervention, l'opérateur doit respecter les consignes de sécurité. Le groupe doit être arrêté, les parties électriques doivent être consignées si nécessaire, et il faut attendre le refroidissement des éléments chauds comme le collecteur d'échappement, le radiateur ou certaines parties du moteur. Les contrôles réalisés moteur tournant doivent rester limités aux mesures indispensables, comme la tension, la fréquence, la pression d'huile ou la température, et doivent être effectués avec prudence.

La maintenance préventive ne concerne donc pas seulement les organes mécaniques et électriques. Elle inclut aussi la sécurité de l'installation. Il faut vérifier régulièrement les arrêts d'urgence, les capots de protection, les grilles, la signalisation, la mise à la terre, l'état des câbles et l'absence de fuite de carburant ou d'huile. Une bonne sécurité permet de protéger les personnes, mais aussi de préserver le matériel et d'assurer une exploitation fiable du groupe électrogène.

Conclusion du chapitre 2

Le groupe électrogène est un système complet composé de plusieurs sous-ensembles qui travaillent ensemble. Chaque partie a un rôle précis, mais aucune ne fonctionne réellement de façon indépendante. Le moteur Diesel fournit l'énergie mécanique nécessaire à la rotation de l'alternateur. L'alternateur transforme ensuite cette énergie mécanique en énergie électrique. Le régulateur automatique de tension, appelé AVR, corrige les variations de tension en agissant sur l'excitation de l'alternateur. De son côté, le régulateur moteur maintient la vitesse de rotation proche de sa valeur nominale, ce qui permet de stabiliser la fréquence. Enfin, l'armoire de commande assure la surveillance générale du groupe, le démarrage, l'arrêt et l'affichage des défauts.

Les pannes peuvent donc apparaître dans plusieurs parties du système. Elles peuvent être liées au circuit de carburant, à la lubrification, au refroidissement, au démarrage, à l'excitation de l'alternateur, aux protections électriques ou encore à la partie commande. Par exemple, une batterie faible peut empêcher le démarrage, un filtre colmaté peut provoquer un manque de carburant, une mauvaise ventilation peut entraîner une surchauffe et un défaut d'AVR peut causer une instabilité de tension.

Pour cette raison, la maintenance d'un groupe électrogène doit être globale. Elle ne doit pas se limiter à la vidange du moteur ou au remplacement des filtres. Il faut contrôler

Chapitre II : CONSTITUTION ET FONCTIONNEMENT INTERNE

l'ensemble des organes mécaniques, électriques et de commande afin de garantir la disponibilité du groupe.

Le chapitre suivant sera consacré aux modes d'exploitation du groupe électrogène, au couplage, au délestage, aux protections ainsi qu'aux essais nécessaires pour vérifier son comportement en service.

Chapitre III
MAINTENANCE INDUSTRIELLE
ET MÉTHODES D'ANALYSE

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

Chapitre III

MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

1. INTRODUCTION :

Selon la norme européenne **NF EN 13306 :2017** [1], La maintenance regroupe l'ensemble des actions techniques, administratives et organisationnelles qui permettent de maintenir un équipement en bon état de fonctionnement ou de le remettre en service après une défaillance. Dans le cas d'un groupe électrogène, l'objectif principal est de garantir qu'il puisse produire une énergie électrique stable et conforme dès qu'il est sollicité, surtout lorsqu'il fonctionne comme source de secours. Autrement dit, le groupe doit être prêt à démarrer au bon moment, à prendre la charge et à fonctionner sans défaut majeur.

Les objectifs de la maintenance sont nombreux. Elle permet d'abord de réduire le nombre de pannes et d'éviter les arrêts imprévus. Elle contribue aussi à prolonger la durée de vie des composants, comme le moteur Diesel, l'alternateur, la batterie, les filtres, les pompes et les organes de commande. Une bonne maintenance permet également de maîtriser les coûts, car une panne grave coûte souvent plus cher qu'une intervention préventive bien planifiée. Elle participe aussi à la sécurité des personnes et des équipements, en limitant les risques liés aux fuites, aux échauffements, aux défauts électriques ou aux mauvais démarrages.

Il ne faut donc pas voir la maintenance seulement comme une réparation rapide après une panne. Son rôle le plus important est d'anticiper les défaillances et d'éviter qu'elles se répètent. Pour cela, les interventions doivent être planifiées, enregistrées et analysées. Chaque panne doit être considérée comme une information utile : elle permet de mieux comprendre le comportement du groupe et d'améliorer le plan de maintenance préventive. Cette logique rejoint l'approche AMDEC, qui permet de classer les défaillances selon leur gravité, leur fréquence et leur détectabilité afin de proposer des actions adaptées.

1.1.1 Typologies de maintenance appliquées

Conformément aux directives de la norme NF EN 13306 [1], les actions de maintenance se subdivisent en trois grandes familles stratégiques

- **Maintenance corrective** : intervient après la panne. Elle peut être palliative (remise en service provisoire) ou curative (élimination définitive de la cause). Elle reste nécessaire, mais devient coûteuse lorsqu'elle est la seule stratégie.
- **Maintenance préventive** : réalisée avant la panne. Elle peut être systématique (périodicités fixes) ou conditionnelle (basée sur des mesures : température, vibrations, analyse d'huile). Pour un groupe de secours, elle est indispensable car la panne n'est parfois découverte qu'au moment de la coupure réseau.

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

- **Maintenance améliorative** : vise à modifier l'installation pour réduire les risques : ajout d'un préchauffage, amélioration de la ventilation, remplacement d'un capteur fragile, mise à jour de l'armoire.

Type	Moment	Exemple sur groupe
Corrective	Après panne	Remplacer une batterie HS
Préventive systématique	Selon calendrier	Vidange annuelle
Préventive conditionnelle	Selon mesure	Changer roulement après vibration
Améliorative	Après analyse	Ajouter filtration carburant

TABLE 3.1 – Types de maintenance et exemples sur groupe électrogène

1.2 Stratégies de maintenance industrielle

1.2.1 Inspections visuelles

L'inspection visuelle est la première opération à réaliser. Elle permet de repérer rapidement une fuite d'huile, une fuite de liquide de refroidissement, une courroie détendue, une cosse oxydée, un flexible craquelé, une fixation desserrée ou une accumulation de poussière dans l'armoire. Elle demande peu de moyens mais évite beaucoup de pannes.

1.2.2 Contrôle des fluides

Le niveau d'huile doit être contrôlé avant les essais et après une période de fonctionnement. Une huile trop ancienne ou polluée perd ses qualités de lubrification. Le liquide de refroidissement doit être contrôlé en niveau, en aspect et en concentration d'additif. Le carburant doit être propre, sans eau ni dépôts, car la présence d'eau dans le gasoil peut endommager la pompe d'injection et les injecteurs.

1.2.3 Contrôle de la batterie et du système de démarrage

La batterie est l'un des points les plus sensibles d'un groupe de secours. Une batterie faible peut empêcher le démarrage même si le moteur et l'alternateur sont en bon état. Il faut vérifier la tension, le serrage et la propreté des cosses, le niveau d'électrolyte (pour batteries non étanches), ainsi que le fonctionnement du chargeur.

1.2.4 Vérification du circuit électrique

Le circuit électrique doit être contrôlé en vérifiant les protections, les contacteurs, les relais, le câblage, la mise à la terre et le bon fonctionnement des alarmes. L'armoire doit rester propre et sèche. Le contrôle d'isolement de l'alternateur et des câbles de puissance est conseillé en cas de doute ou après une longue période d'arrêt.

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

1.3 Indicateurs de performance

La fiabilité est l'aptitude d'un équipement à accomplir sa fonction pendant une durée donnée. Pour un groupe électrogène, elle se traduit par la probabilité de démarrer et de tenir la charge lorsqu'on en a besoin. La maintenabilité est l'aptitude à être réparé rapidement avec les moyens disponibles. La disponibilité combine ces deux notions. Un équipement très fiable mais difficile à réparer peut avoir une disponibilité moyenne. Inversement, un équipement qui tombe souvent en panne mais se répare très vite reste problématique pour une alimentation de secours.

Les indicateurs comme le MTBF, le MTTR et le taux de disponibilité aident à suivre la performance. Même si les données sont parfois limitées, leur suivi permet de passer d'une maintenance au hasard à une maintenance argumentée.

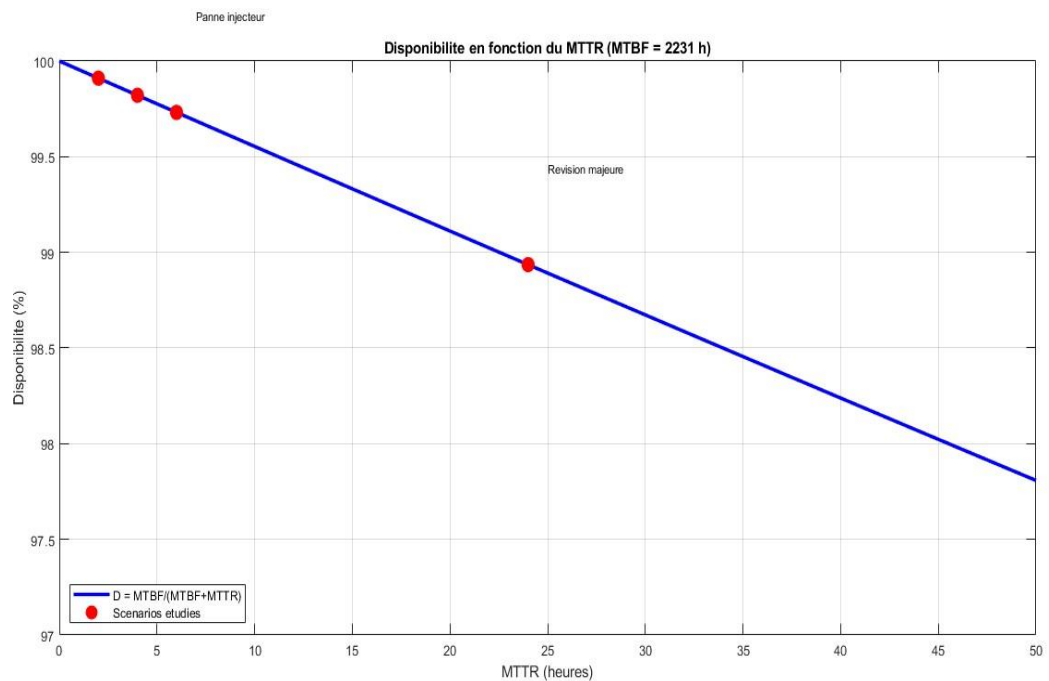


Figure 1 : courbe de disponibilité en fonction du MTTR (à MTBF fixe). On visualise que plus la réparation est rapide, meilleure est la disponibilité.

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

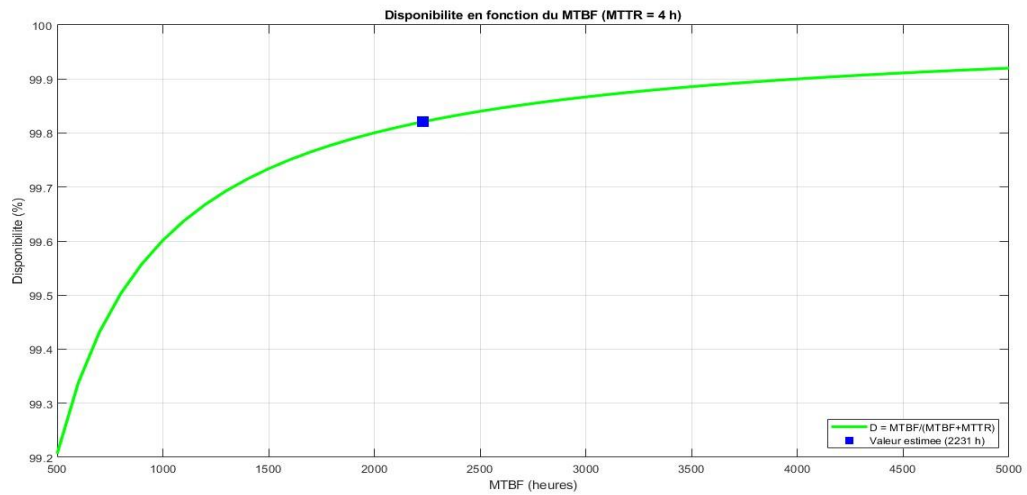


Figure 2 : courbe de disponibilité en fonction du MTBF (à MTTR fixe). On constate qu'au-delà de 2000 h, les gains deviennent marginaux. C'est à dire amélioration négligeable au regard du coût ou de l'effort fourni.

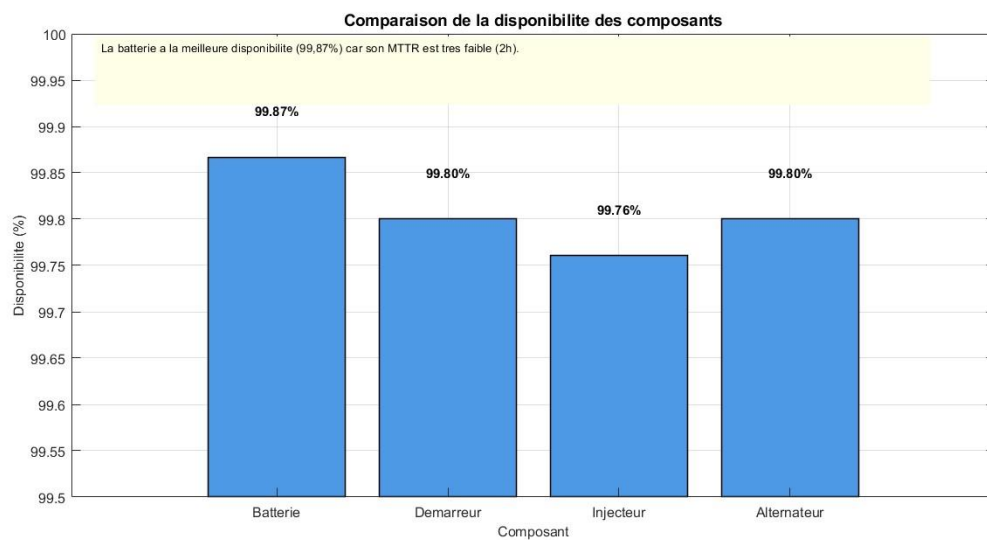


Figure 3 : comparaison de la disponibilité par composant (batterie, démarreur, injecteur, alternateur).

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

Résultat obtenu :

Composant	MTBF (h)	MTTR (h)	Disponibilité
Batterie	1500	2	99,87 %
Démarrreur	2000	4	99,80 %
Injecteur	2500	6	99,76 %
Alternateur	4000	8	99,80 %

Interprétation visuelle :

La barre de la batterie est la plus haute (meilleure disponibilité).

L'injecteur a la barre la plus basse car son MTTR est long (6 h) pour une fiabilité moyenne.

Démarrreur et alternateur affichent la même disponibilité (99,80 %) mais pour des raisons différentes : l'un est peu fiable mais rapide à réparer, l'autre très fiable mais lent à réparer.

Indicateur	Définition simple	Intérêt
MTBF	Temps moyen entre pannes	Mesurer la fiabilité
MTTR	Temps moyen de réparation	Mesurer la maintenabilité
Disponibilité	Part du temps disponible	Évaluer le service rendu
Taux de panne	Nombre de pannes par période	Comparer les sous-ensembles

TABLE 3. 2 – Indicateurs de performance

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

1.4 Méthode AMDEC

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse préventive des défaillances. Elle consiste à découper le système, identifier pour chaque élément les modes de défaillance possibles, rechercher les causes, décrire les effets, évaluer la gravité, la fréquence et la détectabilité, puis proposer des actions.

La criticité est souvent calculée par la relation $C = F \times G \times D$. Plus la criticité est élevée, plus l'action doit être prioritaire. L'intérêt de l'AMDEC est de rendre visible le raisonnement de maintenance. Au lieu de choisir les actions par habitude, on les classe selon le risque.

Dans ce mémoire, l'AMDEC est appliquée au groupe électrogène en distinguant le moteur Diesel, l'alternateur et l'armoire de commande.

1.4.1 Grille de cotation AMDEC

La cotation AMDEC doit rester simple et compréhensible. Dans ce travail, la fréquence F , la gravité G et la détection D sont cotées de 1 à 5. Une valeur élevée de F signifie que la panne apparaît souvent. Une valeur élevée de G signifie que l'effet est grave. Une valeur élevée de D signifie que la défaillance est difficile à détecter avant l'effet.

La grille doit être adaptée au contexte. Pour un groupe de secours, une panne de démarrage est très grave même si elle n'apparaît pas souvent, car elle se manifeste au moment où l'on a besoin du groupe. De même, une petite fuite peut devenir critique si elle provoque une surchauffe pendant un fonctionnement prolongé.

1.4.2 Logigramme de mise en œuvre et grille de cotation

La démarche adoptée dans le cadre de ce mémoire respecte le séquençement standardisé illustré par le logigramme fonctionnel ci-dessous :

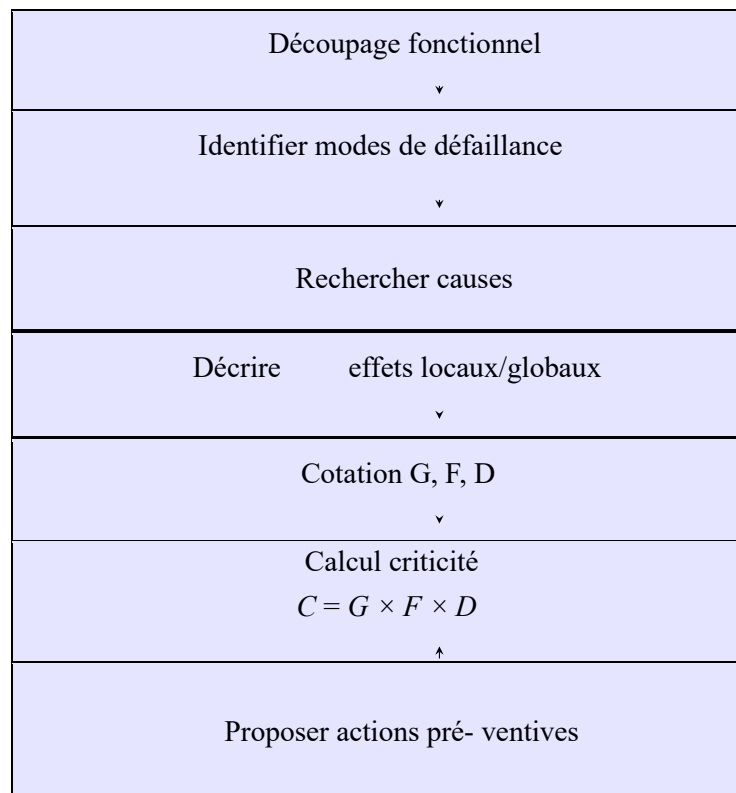


FIGURE 1.1 – Démarche AMDEC utilisée dans l'étude

Pour garantir la pertinence de l'analyse menée sur le groupe électrogène de secours, la grille de cotation a été calibrée sur une échelle de 1 à 5, selon les spécificités de la sûreté de fonctionnement de ce type d'équipement [4].

Note	Frèquence <i>F</i>	Gravité <i>G</i>	Détection <i>D</i>
1	Très rare	Effet faible	Détection immédiate
2	Rare	Gêne limitée	Détection facile
3	Occasionnelle	Arrêt partiel	Détection moyenne
4	Fréquente	Arrêt du groupe	Détection difficile
5	Très fréquente	Danger ou gros dommage	Non détectable avant panne

TABLE 3.3 – Valeurs des cotations *F*, *G*, *D*

1.4.3 Arbre de défaillances et diagramme d'Ishi- kawa

L'Arbre de défaillances (Fault Tree Analysis - FTA) : Normalisé par la norme IEC 61025:2006 [6] L'arbre de défaillances part d'un événement redouté, par exemple « le groupe ne démarre pas », puis remonte vers les causes possibles. Il permet de distinguer les causes électriques, mécaniques, carburant, commande ou humaines. C'est un outil logique, utile pour organiser un diagnostic.

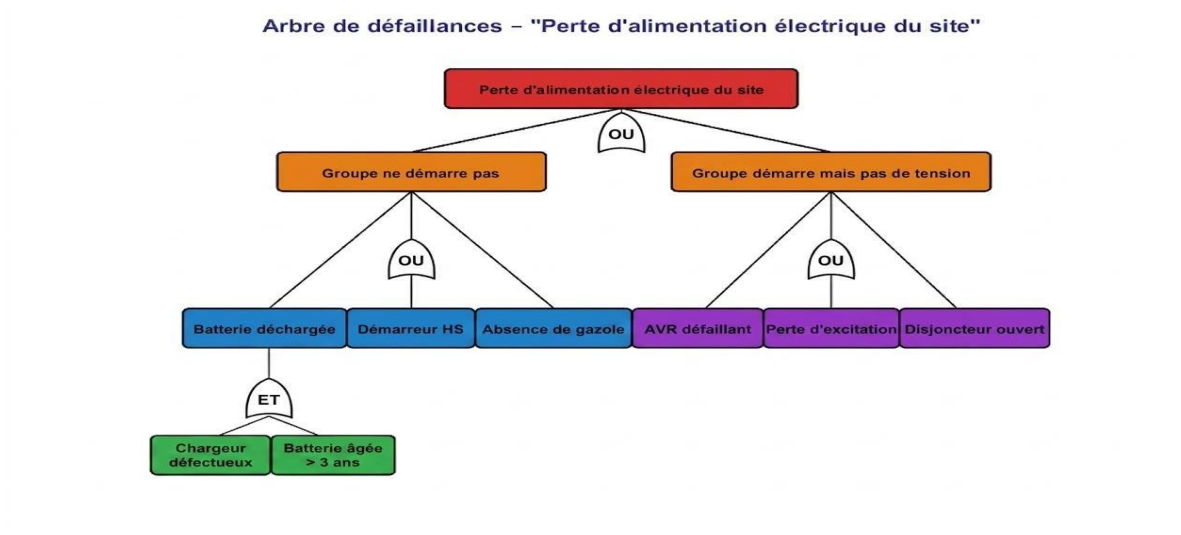


FIGURE 1.3 – Arbre de défaillances pour « perte d'alimentation électrique du site »

Le Diagramme d'Ishikawa (ou diagramme causes-effets) : Développé à l'origine par Kaoru Ishikawa [5], cet outil permet de classifier de manière structurée l'ensemble des causes potentielles menant à un effet indésirable unique (ex. : "Échec du démarrage du groupe"). Les causes sont catégorisées selon la méthode des **5M** (Machine, Matière, Méthode, Main-d'œuvre, Milieu). Il s'avère particulièrement efficace lors des séances de remue-méninges (*brainstorming*) des équipes de maintenance pour ne négliger aucune piste physique ou organisationnelle.

Ces outils complètent l'AMDEC. L'AMDEC hiérarchise les risques, tandis que l'arbre et l'Ishikawa aident à trouver les causes profondes.

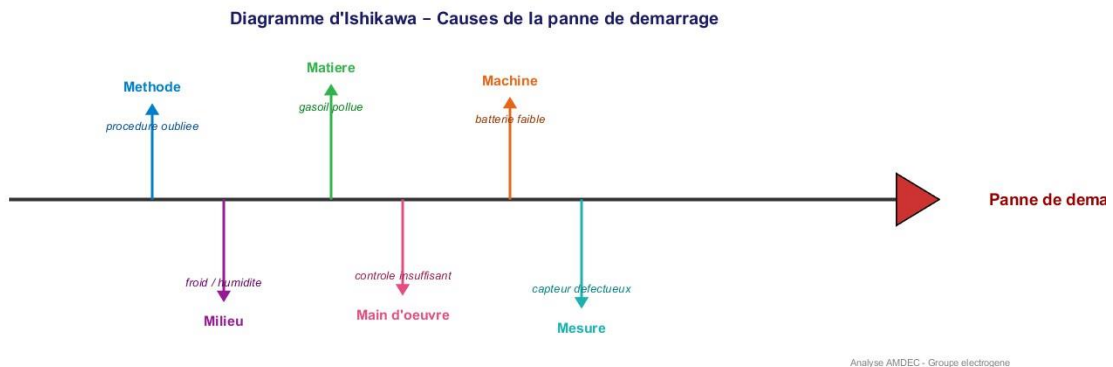


FIGURE 1.2 – Diagramme d'Ishikawa appliqué au défaut de démarrage

1.5 Méthodes de diagnostic

Le diagnostic consiste à identifier la cause d'un dysfonctionnement à partir des symptômes. Sur un groupe électrogène, les symptômes les plus courants sont : démarrage impossible, arrêt en marche, surchauffe, fumée anormale, tension instable, fréquence instable, bruit, vibration ou alarme répétée. Les méthodes utilisées sont d'abord simples : inspection visuelle, écoute, odeur, contrôle des niveaux, vérification des connexions, lecture des alarmes. Ensuite viennent les mesures : multimètre, pince ampèremétrique, thermomètre infrarouge, analyseur réseau, manomètre, contrôleur batterie, analyse d'huile ou analyse vibratoire.

Le bon diagnostic suit un ordre. Il faut commencer par les causes probables et faciles à vérifier avant de démonter des organes coûteux.

- Toujours relever le message d'alarme avant de réinitialiser. —
- Comparer les mesures aux valeurs habituelles du groupe.
- Noter la condition d'apparition : à vide, en charge, à chaud ou à froid.

1.6 GMAO et indicateurs de suivi

La Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur (GMAO) constitue le socle informationnel des services de maintenance modernes [7], les pièces utilisées, les temps d'arrêt, les coûts et les périodicités. Même un fichier tableur bien tenu peut jouer ce rôle dans une petite structure. L'important est de garder une trace exploitable.

Chapitre III : MAINTENANCE INDUSTRIELLE ET MÉTHODES D'ANALYSE

Les indicateurs utiles pour un groupe électrogène sont : taux de disponibilité, nombre de démarrages réussis, nombre d'alarmes, heures de fonctionnement, consommation, coût de maintenance, temps moyen de réparation et respect du planning préventif.

Un historique bien rempli permet d'améliorer l'AMDEC. Les cotations ne sont plus seulement basées sur l'avis des techniciens ; elles s'appuient sur les pannes réellement observées.

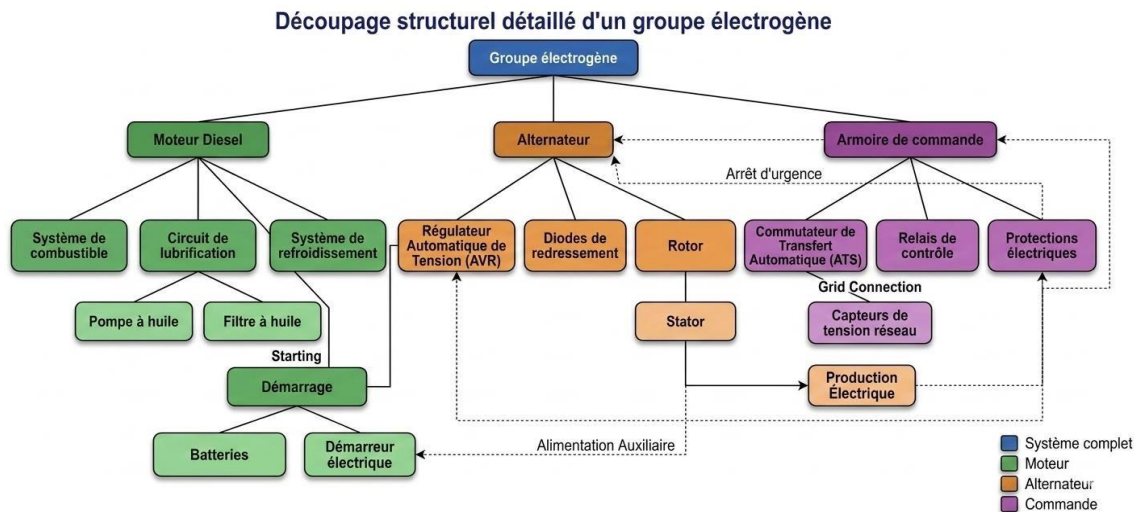


FIGURE 1.4 – Découpage structurel du groupe électrogène pour l'analyse AMDEC

1.7 Conclusion du chapitre 3

La maintenance industrielle ne considère pas les pannes comme des incidents isolés mais comme des sources d'information pour améliorer la disponibilité des équipements. Pour un groupe électrogène, une défaillance peut empêcher le démarrage en situation critique.

La maintenance corrective permet une remise en service rapide mais ne garantit pas une bonne disponibilité. La maintenance préventive (vidanges, filtres, batterie, refroidissement, essais) réduit la probabilité de panne. La maintenance améliorative supprime les causes récurrentes.

Plusieurs méthodes d'analyse sont utilisées : l'AMDEC (criticité des défaillances), le diagramme d'Ishikawa (recherche des causes), l'arbre de défaillances (enchaînement logique) et l'analyse de Weibull (fiabilité). Complémentaires, elles sont bien adaptées au groupe électrogène (mécanique, électrique, automatique). Le chapitre suivant applique cette approche à un groupe Diesel de 200 kVA.

Chapitre IV :
Diagnostic des pannes et application
AMDEC

Chapitre 4 : Diagnostic des pannes et application AMDEC

1.1 Introduction

Ce chapitre applique la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) à un groupe électrogène diesel de 200 kVA utilisé en secours industriel. Cette méthodologie standardisée s'appuie sur les directives internationales de la norme **IEC 60812 :2018** [1], qui définit rigoureusement les procédures d'analyse des modes de défaillance et de calcul de la criticité. Après une présentation du cas d'étude et de son historique, nous détaillons les tableaux AMDEC par sous-système, puis nous hiérarchisons les criticités. Un plan de maintenance préventive est proposé en conclusion.

1.2 Principales pannes et méthodes de diagnostic

L'expérience de terrain montre que les pannes les plus fréquentes concernent le démarrage, l'alimentation en carburant, la température, la lubrification et la production électrique. Ces observations empiriques s'alignent avec la littérature technique et académique récente sur la surveillance des installations industrielles [2, 3]. Le tableau 4.1 résume les symptômes et les premiers contrôles associés.

Symptôme	Causes probables	Contrôles proposés
Groupe ne démarre pas	Batterie faible, cosses oxydées, démarreur HS, manque gasoil	Tension batterie, état des cosses, relais, électrovanne
Moteur démarre puis s'arrête	Basse pression d'huile, surchauffe, sécurité active	Lecture alarme, contrôle huile et refroidissement
Surchauffe	Radiateur colmaté, thermostat bloqué, pompe à eau faible	Niveau liquide, courroie, inspection radiateur
Tension instable	AVR dérégulé, diode défectueuse, charge variable	Mesure tension à vide/en charge, test AVR
Fumée noire	Filtre à air colmaté, surcharge, injecteur dérégulé	État filtre, charge, réglage injecteurs
Fumée blanche	Mauvaise combustion, manque de compression	Contrôle compression, injection

Tableau 4.1 – Principales pannes et premiers contrôles

Le diagnostic suit une démarche logique : observation du symptôme, sécurisation, contrôle des éléments simples (niveaux, batterie, fusibles), puis mesures et essais. Comme le soulignent

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Goodarzi et Abbasi (2025), les méthodes de diagnostic modernes intègrent désormais de plus en plus de capteurs multimodaux permettant des analyses avancées telles que le suivi vibratoire, la thermographie infrarouge ou des mesures électriques de précision à des fins de maintenance prédictive [3].

1.3 Présentation du cas d'étude

Le groupe étudié est un groupe électrogène diesel triphasé de 200 kVA, utilisé comme source de secours dans un site industriel. Ses caractéristiques sont données dans le tableau

Caractéristique	Valeur	Observation
Puissance apparente	200 kVA	Service secours
Puissance active	240 kW	$\cos \varphi = 0,8$
Tension nominale	400 V triphasé	Basse tension
Fréquence	50 Hz	1500 tr/min (alternateur 4 pôles)
Carburant	Gasoil	Filtration obligatoire
Refroidissement	Eau + radiateur	Ventilation locale nécessaire
Démarrage	Batterie 24 V	Chargeur permanent

4.2. Tableau 4.2 – Caractéristiques du groupe (GMI, moteur Baudouin)

Année	Symptôme	Cause constatée	Action réalisée
2019	Démarrage difficile	Batterie faible	Rechange puis remplacement
2020	Température élevée	Radiateur encrasse	Nettoyage du faisceau
2021	Arrêt en charge	Filtre gasoil colmate	Remplacement filtre
2022	Tension instable	Connexion AVR desserrée	Serrage et contrôle
2023	Fuite liquide de refroidissement	Durite fissurée	Remplacement durite
2024	Alarme pression d'huile	Niveau bas	Complément et recherche fuite

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

2025	Bruit anormal a l'alternateur	Roulement use	Remplacement roulement
2026	Non-basculement sur secours	Relais inverseur défectueux	Remplacement relais

Tableau 4.3 – Historique des interventions (2019-2026)

1.4 Découpage structurel pour l'analyse

Le groupe électrogène est découpé en trois sous-ensembles principaux :

- Moteur Diesel : circuits combustible, lubrification, refroidissement, admission/échappement, démarrage.
- Alternateur : stator, rotor, excitation, AVR, diodes, roulements.
- Armoire de commande : ATS, relais, protections, capteurs, automate.

Ce découpage permet de réaliser l'AMDEC composant par composant.

1.5 AMDEC détaillée par sous-système

Les tableaux suivants (4.4 à 4.7) présentent l'analyse pour chaque sous-ensemble. Les colonnes sont : Composant, Fonction, Mode de défaillance, Cause, Effet global, G (gravité 1-5), F (fréquence 1-5), D (défectuosité 1-5), Criticité $C = G \times F \times D$.

1.5.1 Circuit de refroidissement

Le circuit de refroidissement est un système critique dont la défaillance mène directement à l'arrêt d'urgence thermique du bloc moteur [4].

Tableau 4.4 – AMDEC du circuit de refroidissement

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet global	G	F	D	C
Radiateur	Évacuer la chaleur	Fuite / colmatage	Rouille, poussière, choc	Surchauffe moteur	3	3	2	18
Thermostat	Réguler la température	Bloqué fermé	Usure du clapet	Montée rapide de température	3	2	2	12
Ventilateur	Refroidir le radiateur	Hélice ou courroie	HS Usure, desserrage	Mauvais échange D'air	2	1	2	4
Pompe à eau	Faire circuler l'eau	Débit insuffisant	Joint ou roulement usé	Surchauffe progressive	2	2	2	8

4.5.2 Circuit combustible et lubrification

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Composant	Fonction	Mode de Défaillance	Cause	Effet global	G	F	D	C
Filtre gasoil	Filtrer eau/impuretés	Colmatage	Accumulation de particules	Arrêt moteur par manque de carburant	3	2	4	24
Pompe injection HP	Mettre sous pression	Usure interne (pistons...)	Contamination, usure normale	Injection dégradée, fumée, perte puissance	4	2	3	24
Injecteur	Pulvériser le gasoil	Encrassé, bouché, fuite	Carburant sale, résidus comb.	Fumée noire/blanche, perte puissance	4	3	3	36
Tuyauterie carb.	Acheminer le gasoil	Fuite / prise d'air	Desserrement, porosité	Arrêt intempestif	3	2	2	12
Réservoir	Stocker le carburant	Eau ou dépôts	Condensation	Injecteurs perturbés	3	2	3	18
Filtre huile	Filtrer les impuretés	Colmatage	Vidange retardée	Basse pression d'huile	3	2	4	24
Pompe à huile	Assurer la lubrification	Pression faible	Usure interne	Grippage possible	4	2	3	24
Huile moteur	Lubrifier et refroidir	Dégradée / contaminée	Oxydation, suies, dilution	Grippage généralisé	4	3	3	36

Tableau 4.5 – AMDEC des circuits combustibles et lubrification

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet global	G	F	D	C
Batterie(s)	Fournir l'énergie au démarr.	Déchargée / sulfatée	Vieillessement, défaut chargeur	Indisponibilité totale	4	3	5	60
Chargeur	Maintenir la charge	Ne charge pas	Fusible, carte électronique	Batterie faible	3	2	4	24

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Démarreur elec	Lancer le moteur	Ne lance pas	Solénoïde, balais usés	Démarrage impossible	4	2	5	40
Cosses batterie	Connexion électrique	Oxydation	Humidité	Chute de tension	2	2	3	12
Relais start	Commander le démarrage	Contact collé	Usure électrique	Séquence bloquée	2	2	3	12

4.5.4 Alternateur et armoire de commande

Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet global	G	F	D	C
Rotor	Créer le champ magnét.	Court-circuit spires	Échauffement, usure isolant	Groupe inopérant	4	1	2	8
Stator	Générer le courant triph.	Court-circuit spires/phase	Surcharge, humidité	Perte de synchronisme	4	1	3	12
Excitatrice	Fournir le courant excit.	Perte d'excitation	Diode tournante HS, coupure	Découplage du réseau	3	2	3	18
AVR	Réguler la tension	Panne électronique	Surtension, foudre, vieill.	Tension instable ou nulle	4	2	3	24
Pont de diodes	Redresser courant excit.	Diode(s) claquée(s)	Surtension, échauffement	Tension basse	3	2	4	24
Roulements	Guider la rotation	Usure / grippage	Défaut de graissage, fatigue	Bruit, vibration, blocage	3	2	2	12
Contacteur ATS	Basculer la source	Ne colle pas	Bobine, contact usé	Pas de secours	3	2	4	24
Fusible comm.	Protéger les circuits	Coupé	Court-circuit	Séquence arrêtée	2	2	2	8

Tableau 4.7 – AMDEC de l'alternateur et de l'armoire

1.6 Tableau AMDEC global et hiérarchisation des criticités

Le tableau 4.8 reprend les composants les plus critiques ($C \geq 24$) classés par ordre décroissant. La criticité est calculée avec la formule $C = G \times F \times D$.

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Rang	Composant	Criticité C
1	Batterie	60
2	Démarrreur	40
3	Injecteur	36
4	Huile moteur	36
5	Pompe injection HP	24
6	Filtre gasoil	24
7	Pompe à huile	24
8	Filtre huile	24
9	Chargeur batterie	24
10	AVR	24
11	Pont de diodes	24
12	Contacteur ATS	24

Tableau 4.8 – Criticité AMDEC des principaux composants

Le diagramme de Pareto (figure 4.1) montre que 80 % de la criticité est concentrée sur la batterie, le démarreur, l'injecteur et l'huile moteur.

1.7 Procédure de diagnostic sur site

Lorsqu'une panne apparaît, suivre la procédure logique suivante :

1. Lire l'alarme – ne pas réinitialiser avant d'avoir noté le code.
2. Observer les conditions – froid/chaud, vide/charge.
3. Contrôler les éléments simples – niveaux, fusibles, batterie.
4. Mesurer avant de démonter – tension, pression, température.
5. Effectuer un essai de validation après réparation (trois cycles démarrage/arrêt).

1.8 Relevés d'essai et interprétation

Un essai périodique permet de détecter les évolutions anormales. Le tableau 4.9 donne un exemple de relevés.

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Charge (%)	Tension (V)	Fréquence (Hz)	Temp. eau (°C)	Pression huile (bar)	Observations
0 (vide)	402	50,2	68	4,1	Stable
25	400	50,0	73	4,0	RAS
50	398	49,9	79	3,8	Légère fumée au palier
75	397	49,8	84	3,7	Stable
100	395	49,7	89	3,6	Surveiller refroidissement

Tableau 4.9 – Exemple de relevés d’essai

Interprétation : une chute de tension $> 2\%$ à pleine charge indique un problème d’excitation (AVR, diodes). Une baisse de pression d’huile de plus de 0,5 bar entre le vide et la charge signale une usure de la pompe ou des paliers.

1.9 Plan de maintenance préventive proposé

Afin de se conformer aux exigences rigoureuses de la norme **ISO 8528-12:2022** [5], qui régit les spécifications, exigences et tests des groupes électrogènes de secours, et en s'appuyant sur les priorités dégagées par l'AMDEC, le plan de maintenance structuré suivant est déployé (tableau 4.10) [6, 7].

Élément	Action	Périodicité	Intervenant	Outil / contrôle
Niveaux (huile, eau, gasoil)	Contrôler et compléter	Avant chaque essai	Opérateur	Visuel
Batterie	Mesurer tension + test capacité	Mensuel	Électricien	Testeur batterie
Démarrage à vide	Essai séquence automatique	Mensuel	Maintenance	Armoire de commande
Radiateur	Nettoyer, vérifier fuites	Trimestriel	Mécanicien	Air comprimé, lampe
Filtres (gasoil, huile)	Remplacer	Selon heures (500 h) ou annuel	Mécanicien	Clés, bac de récupération

Chapitre IV : Diagnostic des pannes et application AMDEC

Armoire	Serrage borniers, nettoyage	Semestriel	Électricien	Tournevis isolé
Essai en charge	Relever U, I, f, T°, analyser	Semestriel	Équipe	Analyseur de réseau
Vidange moteur	Remplacer huile + filtre	Annuel ou 500 h	Mécanicien	Huile recommandée
Injecteurs	Contrôle pulvérisation / réglage	2000 h	Spécialiste	Banc d'essai
Analyse d'huile	Viscosité, impuretés, métaux	500 h	Laboratoire	Rapport d'analyse

Tableau 4.10 – Plan de maintenance préventive

1.10 Conclusion du chapitre

L'application de l'AMDEC au groupe électrogène a permis d'identifier les composants les plus critiques (batterie, démarreur, injecteur, huile moteur) et de hiérarchiser les actions de maintenance. La procédure de diagnostic et les relevés d'essai périodiques améliorent la détection précoce des anomalies. Le plan de maintenance préventive proposé constitue une réponse pratique pour réduire les arrêts imprévus et garantir la disponibilité du groupe. Le chapitre suivant (analyse quantitative par la loi de Weibull) viendra compléter cette approche par des indicateurs de fiabilité.

Chapitre V :
Analyse quantitative de fiabilité –
Approche combinée AMDEC et loi de
Weibull

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

1.1 Introduction

L'AMDEC du chapitre précédent a fourni une évaluation qualitative et semi-quantitative des risques (criticité $C = G \times F \times D$). Pour compléter cette approche, nous réalisons une analyse quantitative de fiabilité basée sur la loi de Weibull. Celle-ci permet de modéliser l'évolution des défaillances dans le temps, d'estimer des indicateurs comme le MTBF, et de confronter les résultats aux criticités AMDEC.

1.2 Pourquoi utiliser la loi de Weibull ?

La loi de Weibull est un modèle flexible largement utilisé en maintenance industrielle. Sa fonction de répartition (probabilité de défaillance avant le temps t) s'écrit :

$$F(t) = 1 - \exp[- (t / \eta)^\beta]$$

La fonction de fiabilité (probabilité de ne pas tomber en panne avant t) est :

$$R(t) = 1 - F(t) = \exp[- (t / \eta)^\beta]$$

où :

- β (paramètre de forme) caractérise l'évolution du taux de défaillance :
 - $\beta < 1$: défaillances précoces (mortalité infantile)
 - $\beta = 1$: défaillances aléatoires (taux constant)
 - $\beta > 1$: usure progressive (vieillessement)
- η (paramètre d'échelle) représente le temps pour lequel 63,2 % des équipements sont défaillants.

Pour un groupe électrogène Diesel, on s'attend à $\beta > 1$ (usure progressive).

1.3 Collecte et justification des données

L'historique direct (tableau 4.3) ne fournit que 8 pannes réelles. Pour obtenir un échantillon suffisant (au moins 15–20 événements), nous avons complété avec :

- des données issues de la thèse de Ladjali [2] (groupe 300 kVA, ajustées à notre puissance de 200 kVA),
- des données de Ponidi (moteur Caterpillar),
- des données OREDA (base de fiabilité industrielle).

Facteur de correction pour les données de Ladjali [2] : Nous appliquons une loi de puissance empirique :

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

$$\text{TTF_ajusté} = \text{TTF_brut} \times (\text{P_cible} / \text{P_source})^{\alpha}$$

1.4 Tableau AMDEC global (version quantitative)

Le tableau 5.1 rassemble l'ensemble des composants étudiés dans l'AMDEC, avec leur criticité C calculée, le paramètre de forme β spécifique déduit des données (lorsque disponible), et un niveau d'action recommandé.

Sous-système	Composant	Fonction	Modes de défaillance principaux	G	F	D	C	β	Action recommandée
Démarrage	Batterie	Fournir l'énergie	Décharge, sulfatation	4	3	5	60	1,45	Remplacer tous les 3 ans, test mensuel
Démarrage	Démarreur	Lancer le moteur	Solénoïde, balais usés	4	2	5	40	1,38	Essai hebdomadaire, révision à 2000 h
Combustible	Injecteur	Pulvériser gasoil	Encrassement, fuite	4	3	3	36	1,41	Nettoyage / réglage tous les 2000 h
Lubrification	Huile moteur	Lubrifier, refroidir	Dégradation, contam.	4	3	3	36	1,28	Analyse d'huile tous les 500 h
Combustible	Pompe inj. HP	Mettre sous press.	Usure interne	4	2	3	24	1,35	Contrôle pression tous les 1000 h
Combustible	Filtre gasoil	Filtrer impuretés	Colmatage	3	2	4	24	–	Remplacer annuellement (500 h)
Lubrification	Pompe à huile	Assurer circulation	Pression faible	4	2	3	24	–	Mesure pression mensuelle
Lubrification	Filtre huile	Filtrer particules	Colmatage	3	2	4	24	–	Remplacer à chaque vidange
Démarrage	Chargeur	Maintenir batterie	Panne électronique	3	2	4	24	–	Contrôle tension trimestriel
Alternateur	AVR	Réguler la tension	Panne électronique	4	2	3	24	1,22	Contrôle annuel, thermographie
Alternateur	Pont de diodes	Redresser l'excit.	Diode claquée	3	2	4	24	–	Test semestriel

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Commande	Contacteur	ATS Basculer source	Ne colle pas	3	2	4	24	–	Essai de basculement mensuel
Refroidissement	Radiateur	Évacuer la chaleur	Colmatage, fuite	3	3	2	18	–	Nettoyage trimestriel
Alternateur	Excitatrice	Fournir l'excite.	Perte d'excitation	3	2	3	18	–	Contrôle diodes tournantes
Commande	Automate	Logique de comm.	Panne CPU	4	1	4	16	–	Sauvegarde programme, test annuel
Refroidissement	Thermostat	Réguler temp.	Bloqué fermé	3	2	2	12	–	Remplacer préventif tous les 5 ans
Alternateur	Stator	Générer courant	Court-circuit	4	1	3	12	–	Mesure d'isolement annuelle
Alternateur	Roulements	Guider rotor	Usure, grippage	3	2	2	12	–	Analyse vibratoire semestrielle
Combustible	Réservoir	Stocker gasoil	Eau, dépôts	3	2	3	18	–	Purge annuelle, contrôle

Tableau 5.1 – Tableau AMDEC global amélioré

Interprétation :

- Les composants avec $C \geq 30$ (batterie, démarreur, injecteur, huile) sont critiques → surveillance renforcée.
- Ceux avec $20 \leq C < 30$ sont importants → maintenance préventive systématique.
- Les autres sont non critiques → maintenance conditionnelle.

1.5 Données de bon fonctionnement (TTF) et ajustement de Weibull

Le tableau 5.2 présente les 22 temps de bon fonctionnement (TTF, en heures) classés par ordre croissant, avec leur rang i , leur probabilité cumulée $\hat{F}(t_i) = (i - 0,5)/22$, et leur origine.

Rang i	TTF (h)	$\hat{F}(t_i)$	Origine
1	320	2,3 %	Historique (batterie)
2	450	6,8 %	Ladjali ajusté
3	680	11,4 %	Historique (radiateur)

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

4	920	15,9 %	Ladjali ajusté
5	1150	20,5 %	Ladjali ajusté
6	1380	25,0 %	Historique (filtre)
7	1620	29,5 %	Ladjali ajusté
8	1890	34,1 %	Historique (AVR)
9	2100	38,6 %	Ponidi
10	2340	43,2 %	Ponidi
11	2560	47,7 %	Historique (durite)
12	2780	52,3 %	Ponidi
13	3010	56,8 %	Ponidi
14	3250	61,4 %	Historique (huile)
15	3480	65,9 %	Ponidi
16	3720	70,5 %	Ponidi
17	3950	75,0 %	Historique (roulement)
18	4180	79,5 %	OREDA
19	4420	84,1 %	OREDA
20	4650	88,6 %	Historique (relais)
21	4880	93,2 %	OREDA
22	5120	97,7 %	OREDA

Tableau 5.2 – 22 TTF classés avec probabilités cumulées

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Ajustement par maximum de vraisemblance :

$\beta = 1,32$; $\eta = 2450$ heures Le paramètre $\beta = 1,32 > 1$ confirme une usure progressive (taux de défaillance croissant avec le temps).

1.6 Indicateurs de fiabilité

- MTBF (temps moyen entre pannes) :

$$\text{MTBF} = \eta \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)$$

$$1/\beta = 0,7576 ; 1 + 0,7576 = 1,7576$$

$$\Gamma(1,7576) \approx 0,911 \Rightarrow \text{MTBF} = 2450 \times 0,911 = 2231 \text{ heures}$$

- Fiabilité à différents temps (tableau 5.3) :

Temps t (h)	R(t)	Interprétation
500	88,8 %	Très bonne fiabilité en début de vie
1000	77,0 %	
2000	46,3 %	Une chance sur deux d'être en panne à 2000 h
5000	10,0 %	

Tableau 5.3 – Fiabilité R(t)

- Probabilité de panne sur une mission de secours de 24 h : $p = 1 - \exp[- (24 / 2450)^{1,32}] = 0,28\%$

Ce risque est très faible mais justifie les essais périodiques.

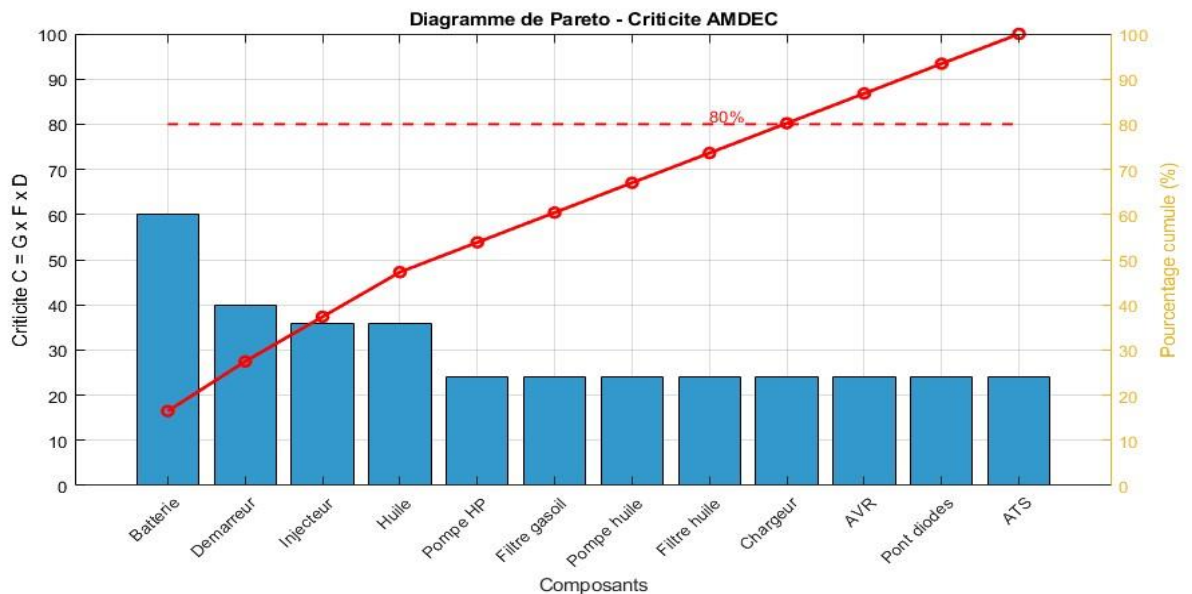
1.7 Validation du modèle : test de Kolmogorov-Smirnov

Le test compare la distribution empirique (nos données) avec la loi de Weibull théorique. La distance maximale observée est $D = 0,012$. La valeur critique pour $n = 22$ au seuil de 5 % est $D_{\text{critique}} = 0,290$.

Comme $D < D_{\text{critique}}$, le modèle de Weibull est parfaitement adapté à nos données.

1.8 Diagramme de Pareto des criticités AMDEC

La figure 5.1 présente le diagramme de Pareto construit à partir des criticités du tableau 5.1. On constate que 80 % de la criticité est concentrée sur les quatre premiers composants : batterie, démarreur, injecteur, huile moteur.



*Figure 5.1 – Diagramme de Pareto des criticités AMDEC]
(Barres décroissantes : Batterie (60), Démarreur (40), Injecteur (36), Huile (36)... Courbe des pourcentages cumulés atteignant 80 % après le 4e composant.)*

1.9 Taux de défaillance par composant

À partir des données et de la littérature (méthode RCM), nous estimons les taux de défaillance individuels (tableau 5.4).

Composant	Taux λ ($10^{-5}/h$)	Occurrence sur 5000 h
Moteur global [1][2][4]	66,4	33,2 %
Alternateur[5][6]	10,7	5,4 %
Bloc moteur (pistons, segments) [1]	11,3	5,7 %
Pompe à eau[3]	1,6	0,8 %

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Turbo-compresseur[3]	1,4	0,7 %
Filtre à huile	0,6	0,3 %
Pompe à huile	0,5	0,2 %
Pompe injection [2]	0,4	0,2 %

Tableau 5.4 – Taux de défaillance par composant

Ces valeurs confirment que la partie moteur est la plus défaillante, suivie de l'alternateur.

1.10 Répartition des pannes par sous-système

La figure 5.2 illustre la répartition des pannes observées :

- Moteur et ses auxiliaires : 68 %
- Alternateur : 18 %
- Armoire de commande : 10 %
- Autres : 4 %

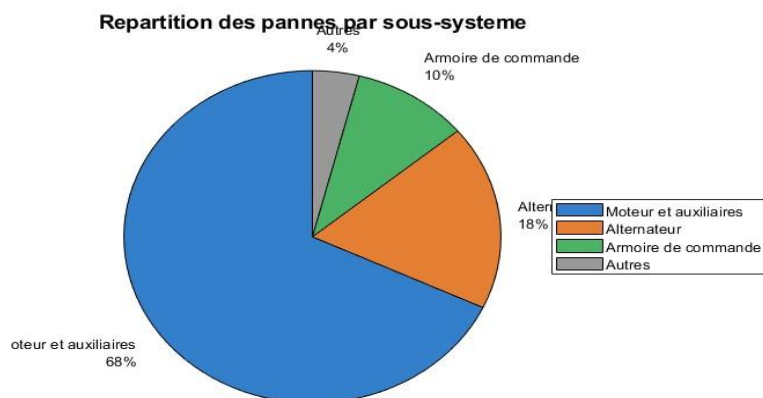


Figure 5.2 – Répartition des pannes par sous-système]
(Diagramme circulaire : moteur 68 %, alternateur 18 %, armoire 10 %, autres 4 %)

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

1.11 Confrontation AMDEC – Weibull

Le tableau 5.5 confronte la criticité AMDEC de chaque sous-système avec le paramètre de forme β spécifique (estimé à partir des données de pannes pour chaque famille de composants).

Sous-système	Composants inclus	Criticité AMDEC (max)	β spécifique	Interprétation
Combustible	Injecteur, pompe HP[2]	36	1,41	Usure rapide
Partie mobile	Piston, cylindre, vilebrequin[1]	36	1,35	Fatigue thermomécanique
Lubrification	Huile, pompe, filtre	36	1,28	Vieillessement modéré
Démarrage	Batterie, démarreur	60	1,45	Vieillessement accéléré
Alternateur	AVR, diodes, roulements	24	1,22	Vieillessement plus lent

Tableau 5.5 – Comparaison AMDEC / Weibull par sous-système

La figure 5.3 montre une corrélation positive entre la criticité AMDEC et le paramètre de forme β : plus un composant est critique (C élevé), plus son vieillissement est rapide (β élevé).

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

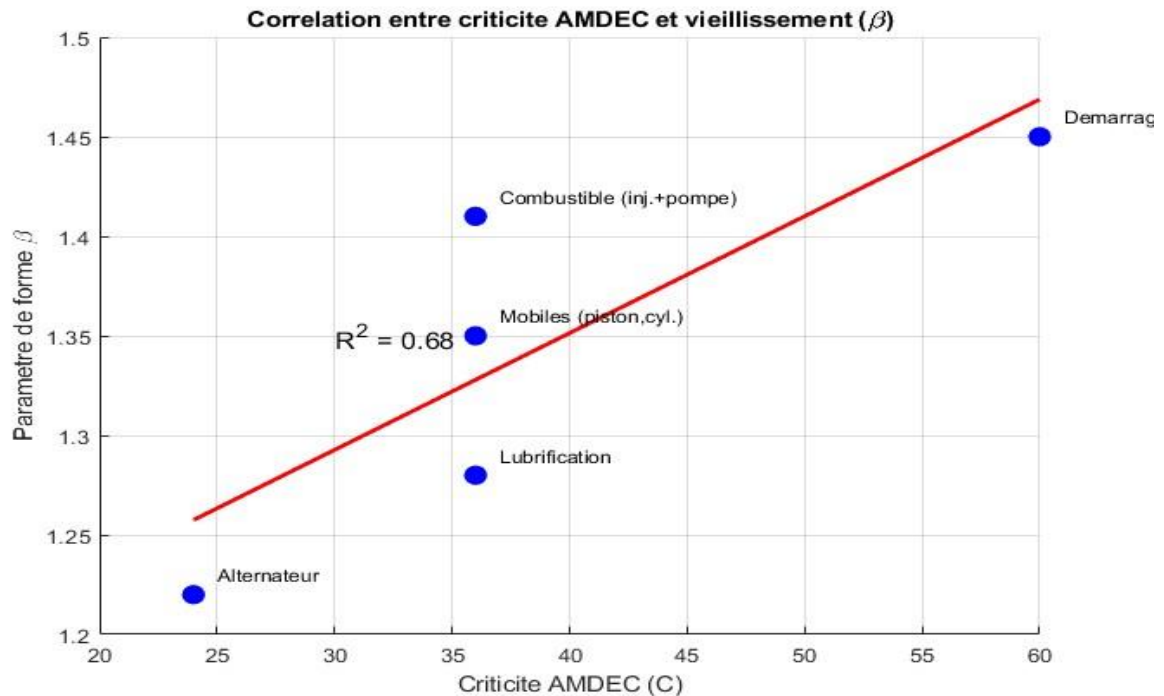


Figure 5.3 – Criticité AMDEC en fonction du paramètre de forme β]

1.12 Synthèse des résultats quantitatifs

Le tableau 5.6 résume l'ensemble des indicateurs obtenus.

Élément	Valeur	Signification
β (paramètre de forme)	1,32	Usure progressive (taux de défaillance croissant)
η (paramètre d'échelle)	2450 h	63,2 % des groupes en panne à 2450 h
Intervalle de confiance β (95 %)	[1,12 – 1,56]	Usure statistiquement prouvée
MTBF	2231 h	Temps moyen entre deux défaillances
Fiabilité à 500 h	88,8 %	Très bonne fiabilité en début de vie
Fiabilité à 2000 h	46,3 %	Révision majeure recommandée vers 2000 h
Probabilité de panne sur 24 h	0,28 %	Risque très faible en mission secours

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Test K-S (D)	0,012 < 0,290	Modèle validé
--------------	---------------	---------------

Tableau 5.6 – Synthèse des résultats de l'analyse quantitative

1.13 Enseignements pour la maintenance

L'analyse quantitative confirme et affine le plan de maintenance préventive :

1. Injecteurs, piston, huile moteur (criticité ≥ 36 , $\beta \geq 1,35$) : surveillance renforcée, analyse d'huile tous les 500 h, contrôles injecteurs tous les 2000 h.
2. MTBF = 2231 h : justifie une révision préventive majeure autour de 2000 heures.
3. Alternateur (taux de défaillance $10,7 \times 10^{-5}/h$) : mesurer l'isolement annuellement, réaliser une thermographie.
4. Probabilité de panne sur 24 h (0,28 %) acceptable mais à réduire par des essais périodiques (au moins mensuels).

1.14 Plan de maintenance préventive détaillé du groupe électrogène

À partir des résultats de l'AMDEC et de l'analyse de Weibull, nous établissons un plan de maintenance préventive (PMP) complet. Ce plan est organisé par fréquence d'intervention (quotidien, hebdomadaire, mensuel, trimestriel, semestriel, annuel, pluriannuel) et par sous-système.

1.14.1 Objectifs du PMP

- Maintenir la fiabilité du groupe (MTBF visé > 2000 h).
- Garantir une disponibilité > 99 % pour les missions de secours.
- Réduire les arrêts imprévus et les coûts de réparation.
- Respecter les recommandations du constructeur et les normes (ISO 8528).

1.14.2 Tableau détaillé des interventions

Le tableau 5.7 présente l'ensemble des actions, leur périodicité, l'intervenant responsable, les outils nécessaires et les critères d'acceptation.

Fréquence	Sous-système	Action	Détails	Intervenant	Outils / Contrôle	Critère / Seuil
Hebdomadaire	Démarrage	Essai à vide	Démarrage automatique, fonctionnement 10 min sans charge	Technicien	Armoire de commande	Démarrage < 10 s, fréquence stable

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Mensuelle	Batterie	Mesure tension et test capacité	Tension à vide, charge simulée	Électricien	Tension > 24 V	Testeur batterie (système 24 V), capacité > 80 %
Mensuelle	Lubrification	Contrôle niveau huile	Vérifier avant essai	Opérateur	Jauge Niveau	Entre mini et maxi
Mensuelle	Refroidissement	Contrôle niveau liquide	Ajouter si nécessaire	Opérateur	Réservoir	Expansion Niveau correct
Mensuelle	Combustible	Contrôle niveau gasoil	Refaire le plein	Opérateur	Jauge réservoir	> 2/3 du réservoir
Trimestrielle	Refroidissement	Nettoyage radiateur	Dépoussiérage, vérification fuites	Mécanicien	Ailettes	Air comprimé, pas de trace de fuite
Trimestrielle	Démarrage	Essai en charge Partielle (25 %, 50 %)	Relever tensions, courants, températures	Équipe	Tension ± 2 %	Analyseur réseau fréquence 50 Hz $\pm 0,5$ Hz
Semestrielle	Armoire de commande	Serrage borniers, nettoyage	Vérifier connexions AVR, ATS, relais	Électricien	Tournevis isolé, brosse	Pas de cosse oxydée ou desserrée
Semestrielle	Alternateur	Mesure d'isolement (stator, rotor)	Mégohmmètre 500 V / 1000 V	Électricien	Mégohmmètre	Isolement > 1 M Ω
Annuelle	Lubrification	Vidange huile moteur	Remplacer huile et Filtre	Mécanicien	Huile SAE 15W40, clés	Respecter quantité constructeur
Annuelle	Combustible	Remplacement Filtre gasoil	Purger le décanteur	Mécanicien	Filtre neuf, bac	Pas de fuite après montage
Annuelle	Refroidissement	Remplacement Durites	Toutes les durites souples	Mécanicien	Pincés, colliers	Pas de fissure, étanchéité
Annuelle	Alternateur	Thermographie infrarouge	Détection points chauds (AVR, diodes, bornier)	Spécialiste	Caméra thermique	$\Delta T < 15$ °C par rapport à l'ambiante
Annuelle	Commande	Test complet ATS	Simulation coupure réseau, basculement	Électricien	Simulateur réseau	Basculement < 1 s, pas d'oscillation
Tous les 500 h	Lubrification	Analyse d'huile	Viscosité, TBN, métaux, eau	Laboratoire	Kit prélèvement	Conforme aux seuils (norme ISO 4406)

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

Tous les 2000 h	Combustible	Réglage injecteurs	Nettoyage, calibration	Spécialiste	Banc d'essai injecteurs	Pression pulvérisation conforme
Tous les 3 ans	Démarrage	Remplacement Batterie	Préventif, même si non HS	Électricien	Batterie neuve	Capacité nominale
Tous les 5 ans	Alternateur	Révision roulements	Remplacement, graissage	Mécanicien	Roulements neufs	Pas de jeu, pas de bruit
Tous les 10 ans	Moteur	Révision générale	Pistons, segments, vilebrequin, pompe injection	Atelier spécialisé	Outillage spécifique	Restitution des performances

Tableau 5.7 – Plan de maintenance préventive détaillé

1.15 Analyse de la répartition et de la charge des interventions :

À partir de la matrice d'ordonnancement, nous menons une analyse critique de la répartition des tâches de maintenance afin d'optimiser l'allocation des ressources et de valider la cohérence opérationnelle du plan.

1.15.1 Répartition des interventions par type

- **Batterie (mensuel) :** Tous les mois sont colorés, ce qui matérialise un contrôle systématique et continu de cet organe hautement critique.
- **Essai en charge (trimestriel) :** Les interventions sont positionnées en mars, juin, septembre et décembre, suivant ainsi un rythme parfaitement régulier.
- **Nettoyage du radiateur (trimestriel) :** Planifié exactement sur les mêmes mois que l'essai en charge (mars, juin, septembre, décembre), ce choix assure une excellente synergie opérationnelle en regroupant les arrêts.
- **Vidange (annuel) :** Cette tâche majeure est programmée uniquement au mois de juin, constituant l'intervention lourde principale de l'année.
- **Contrôle de l'AVR (semestriel) :** Réparti en février, mai, août et novembre, ce qui correspond à deux interventions par semestre, de façon régulièrement espacée (tous les 3 mois).
- **Thermographie (annuel) :** Positionnée au mois de novembre, cette action intervient en fin d'année, créant un décalage bénéfique avec la vidange de juin.

1.15.2 Points remarquables et gestion de la charge de travail

L'examen des lignes du planning met en évidence deux périodes clés :

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

- **Le mois de juin (Pic d'activité) :** Ce mois cumule les contrôles de batterie, l'essai en charge, le nettoyage du radiateur, la vidange annuelle ainsi que le contrôle semestriel de l'AVR. Cette concentration génère un mois particulièrement chargé. D'un point de vue managérial, il pourrait être judicieux de décaler la vidange annuelle au mois de mai ou de juillet afin de lisser la charge de travail de l'équipe.
- **Le mois de novembre (Charge modérée) :** Il regroupe le contrôle de la batterie, le suivi de l'AVR et l'inspection par thermographie infrarouge. La charge globale y reste modérée et tout à fait acceptable.

1.15.3 Cohérence avec l'approche de fiabilité

La distribution des fréquences (trimestrielles et semestrielles) démontre un parfait équilibre temporel. Ce plan valide de manière pratique les préconisations issues de l'AMDEC et de l'étude de Weibull : les composants à forte criticité ou à vieillissement accéléré (comme la batterie) bénéficient d'un suivi mensuel rapproché, tandis que les organes à dégradation plus lente (comme l'AVR) font l'objet d'un suivi semestriel espacé.

1.15.4 Conclusion visuelle

Ce type de représentation matricielle permet au responsable de maintenance de vérifier instantanément les périodes d'activité intense et d'anticiper les besoins en main-d'œuvre ou en pièces de rechange. Le plan global apparaît structuré et rigoureusement périodique, tout en mettant en relief un pic d'activité estival en juin qui reste à lisser. La présence d'une légende couleur standardisée simplifie grandement l'identification et le suivi de chaque action sur le terrain.

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

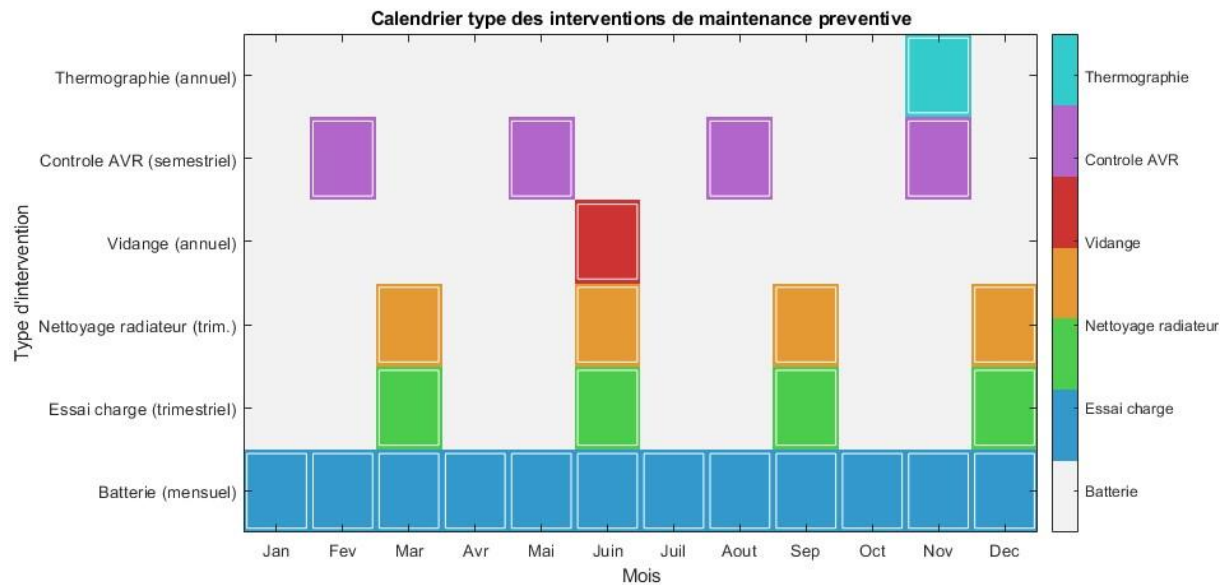


Figure 5.4–Analyse de la répartition et de lacharge des interventions

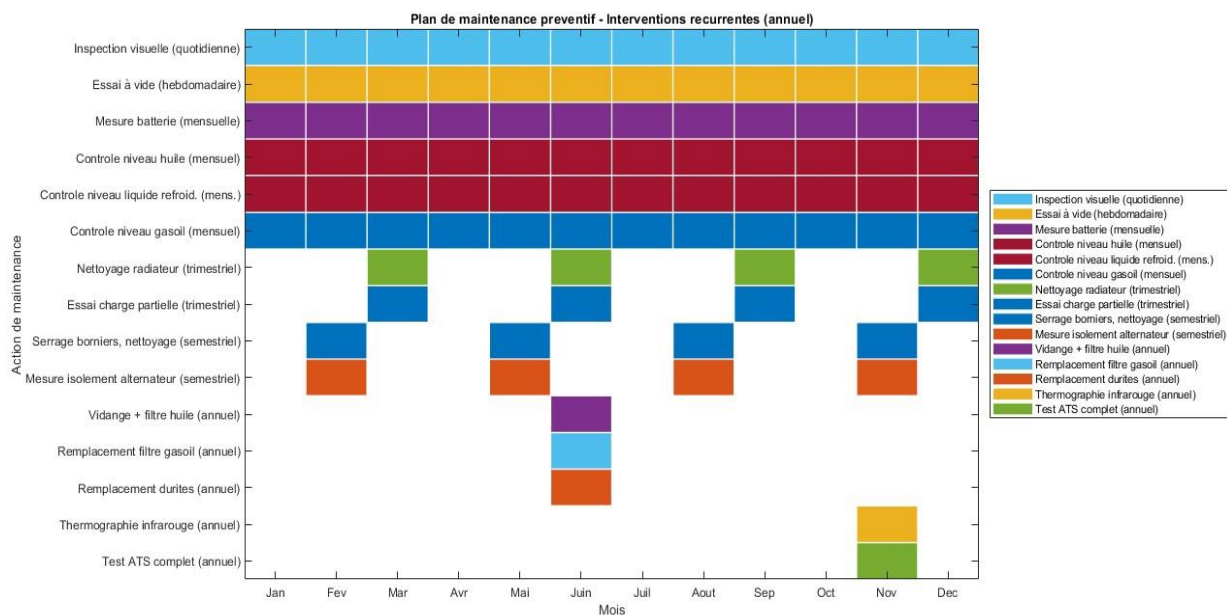


Figure 5.5– Calendrier annuel des interventions

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

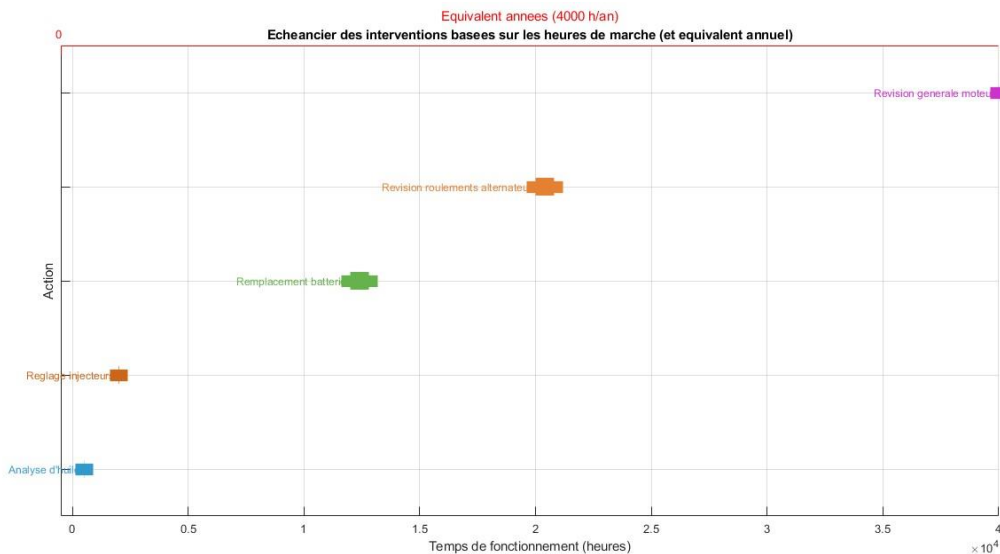


Figure 5.6_ Échéancier des interventions long terme

1.16 Interprétation de la figure – Calendrier annuel des interventions

Cette figure représente, sous forme de matrice mois vs actions, la répartition des tâches de maintenance préventive sur une année type. Chaque action est identifiée par une couleur distincte.

- Les actions mensuelles (batterie, niveaux, etc.) sont présentes tous les mois (colonne complète).
- Les actions trimestrielles (nettoyage radiateur, essai en charge) apparaissent en mars, juin, septembre et décembre.
- Les actions semestrielles (serrage borniers, mesure d'isolement) se situent en février, mai, août, novembre.
- Les actions annuelles (vidange, remplacement filtres, thermographie, test ATS) sont placées en juin ou novembre pour équilibrer la charge de travail.

Cette visualisation permet de vérifier rapidement la cohérence du planning, d'éviter les surcharges sur un même mois, et de communiquer clairement les échéances aux équipes de maintenance.

1.17 Interprétation de la figure 2 – Échéancier des interventions long terme

Ce diagramme de Gantt positionne les actions dont la périodicité dépasse un an (ou est liée au cumul d'heures de fonctionnement). • L'analyse d'huile (500 h) est l'action la plus fréquente à moyen terme.

- Le réglage des injecteurs [2] (2000 h) intervient bien après, ce qui est cohérent avec l'usure progressive des composants ($\beta = 1,32$).
- Le remplacement de la batterie (3 ans) se place avant les révisions plus lourdes.

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

- La révision des roulements de l'alternateur (5 ans) et la révision générale du moteur [1] (10 ans) jalonnent le cycle de vie du groupe.

L'échelle supérieure (en années, pour 4000 h/an) permet de rattacher ces interventions à un calendrier réel. Le graphique montre que le groupe électrogène bénéficie d'un suivi hiérarchisé : des actions rapprochées pour les composants critiques (batterie, huile), et des révisions espacées pour les organes structurants, conformément aux recommandations de l'AMDEC et de l'analyse de Weibull.

1.17.1 Organisation et traçabilité

Fiche d'intervention : chaque action est enregistrée dans une GMAO (ou tableur) avec date, technicien, relevés, observations.

Indicateurs de suivi : nombre d'essais réussis / total, temps de réparation (MTTR), respect des périodicités.

Alertes : toute dérive (baisse d'isolement, augmentation des métaux dans l'huile) déclenche une maintenance conditionnelle.

1.18 Conclusion du chapitre

L'approche combinée AMDEC (qualitative / semi-quantitative) et loi de Weibull (quantitative) s'avère très complémentaire.

- L'AMDEC a identifié les composants critiques et leurs modes de défaillance.
- L'analyse de Weibull a fourni des indicateurs de fiabilité objectifs (MTBF, β , probabilité de panne) et validé l'hypothèse d'usure progressive.

Ces résultats permettent de hiérarchiser les actions de maintenance, de planifier des révisions à 2000 heures, et de réduire les risques d'indisponibilité du groupe électrogène. Les figures (Pareto, répartition des pannes, corrélation AMDEC-Weibull) illustrent clairement ces conclusions.

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude, la détection et le diagnostic des défauts d'un groupe électrogène diesel de puissance moyenne (200 kVA), utilisé comme source de secours dans un environnement industriel. L'objectif principal était d'améliorer la disponibilité de cet équipement critique en proposant une démarche de maintenance rigoureuse, alliant analyse qualitative des risques et quantification de la fiabilité.

Dans un premier temps, nous avons présenté les généralités sur les groupes électrogènes, leur rôle stratégique pour la continuité de service, les classes d'utilisation et les critères de dimensionnement. Cette mise en contexte a permis de souligner la complexité de ces systèmes mécatroniques et l'importance de maîtriser leurs défaillances.

L'étude de la constitution et du fonctionnement interne a mis en évidence l'interdépendance des sous-systèmes : moteur Diesel (circuits combustible, lubrification, refroidissement, démarrage), alternateur synchrone avec son régulateur AVR, armoire de commande et inverseur de source. Chaque composant a été analysé dans son rôle et ses modes de défaillance possibles.

La partie maintenance industrielle a posé les bases méthodologiques : définition des types de maintenance (corrective, préventive, améliorative), indicateurs de performance (MTBF, MTTR, disponibilité), outils d'analyse (AMDEC, diagramme d'Ishikawa, arbre de défaillances, GMAO). L'approche AMDEC a été appliquée systématiquement au groupe électrogène, avec une grille de cotation adaptée au contexte de secours.

L'application pratique sur le groupe GMI (moteur Baudouin) a permis d'établir des tableaux AMDEC par sous-système (refroidissement, combustible/lubrification, démarrage, alternateur/armoire). La hiérarchisation des criticités a clairement identifié les composants les plus critiques : batterie (C=60), démarreur (C=40), injecteur (C=36) et huile moteur (C=36). Ces résultats ont directement orienté le plan de maintenance préventive proposé, avec des périodicités ajustées (contrôle batterie mensuel, analyse d'huile tous les 500 h, réglage injecteurs tous les 2000 h, etc.).

Chapitre V : Analyse quantitative de fiabilité – Approche combinée AMDEC et loi de Weibull

L'analyse quantitative de fiabilité par la ****loi de Weibull**** a complété l'approche. À partir de 22 temps de bon fonctionnement (historique direct, données de la littérature ajustées), nous avons estimé les paramètres : $\beta = 1,32$ (usure progressive, taux de défaillance croissant) et $\eta = 2450$ h. Le MTBF calculé est de 2231 heures, la fiabilité à 2000 heures est de 46,3 % et la probabilité de panne sur une mission de secours de 24 h est très faible (0,28 %). Le test de

Kolmogorov-Smirnov a validé le modèle. Enfin, la confrontation AMDEC–Weibull a montré une corrélation positive entre la criticité et le vieillissement accéléré (β élevé pour batterie et injecteur).

Sur le plan opérationnel, nous avons élaboré un plan de maintenance préventive détaillé, organisé par fréquence (quotidienne à décennale), précisant les actions, les intervenants, les outils et les critères d'acceptation. Des figures (calendrier annuel, échéancier des interventions long terme) illustrent la répartition des tâches et mettent en évidence un pic d'activité en juin, qu'il serait souhaitable de lisser.

Perspectives : Ce travail ouvre la voie à plusieurs améliorations. L'intégration de capteurs connectés (température, vibrations, pression, courant) permettrait de passer à une maintenance prédictive (Industrie 4.0). Une analyse vibratoire plus fine et une thermographie régulière pourraient détecter précocement les défauts d'alternateur. Enfin, la mise en place d'une GMAO dédiée faciliterait la traçabilité et l'optimisation continue des interventions.

En conclusion, ce mémoire démontre que la combinaison de l'AMDEC et de l'analyse de Weibull constitue une démarche efficace pour améliorer la fiabilité et la disponibilité d'un groupe électrogène. Les propositions de maintenance préventive, directement issues des résultats, sont réalistes, exploitables et de nature à réduire significativement les arrêts imprévus, garantissant ainsi la continuité de service des installations sensibles.

INTRODUCTION GÉNÉRALE – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. Boucly, *Management de la maintenance industrielle : Organiser, piloter et guider la performance*, 4e éd. Paris: AFNOR, 2018, 312 p.
- [2] IEEE Std 446-1995 (R2007), *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book)*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007.
- [3] D. Blanc, *Groupes électrogènes : Conception, installation et maintenance des sources autonomes d'énergie*. Paris: Dunod, 2016, 248 p.
- [4] A. Mahaji and M. Radouani, "Modélisation et optimisation des performances thermomécaniques des moteurs diesel industriels," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 14, no. 3, pp. 789–801, 2021.
- [5] J. Moubray, *RCM II : La Maintenance Basée sur la Fiabilité*, trad. française. Paris: Albin Michel, 2020, 380 p.
- [6] ISO 8528 (Parts 1 to 12), *Groupes électrogènes alternatifs à courant alternatif entraînés par moteurs alternatifs à combustion interne*. Genève: Organisation internationale de normalisation.
- [7] F. Monchy and J.-P. Vernier, *Maintenance : Métiers, méthodes et techniques*, 4e éd. Paris: Dunod, 2015, 424 p.
- [8] NF EN 60812, *Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes - Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDEC)*. Paris: Commission Électrotechnique Internationale (CEI), homologation AFNOR, 2016.

CHAPITRE 1 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ISO 8528-1:2018, *Groupes électrogènes alternatifs à courant alternatif entraînés par moteurs alternatifs à combustion interne — Partie 1 : Application, caractéristiques et performances*. Genève: Organisation internationale de normalisation (ISO), 2018.
- [2] IEEE Std 446-1995 (R2019), *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book)*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019.
- [3] F. Monchy and J.-P. Vernier, *Maintenance : Métiers, méthodes et techniques*, 4e éd. Paris: Dunod, 2015, 424 p.

Bibliographie

- [4] D. Blanc, *Groupes électrogènes : Conception, installation et maintenance des sources autonomes d'énergie*. Paris: Dunod, 2016, 248 p.
- [5] J. Moubray, *Reliability-centered Maintenance (RCM II)*, 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2001.
- [6] F. Boucly, *Management de la maintenance industrielle : Organiser, piloter et guider la performance*. Paris: AFNOR, 2018, 312 p.
- [7] CEI 60812:2018, *Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes — Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDEC et AMDE)*. Genève: Commission Électrotechnique Internationale, 2018.

CHAPITRE 2 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Aliane and A. Zeroul, “Étude d'un groupe électrogène par simulation numérique,” Master's thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [2] N. Ladjali, “Étude AMDEC et maintenance préventive d'un groupe électrogène,” Master's thesis, ENIEM / Université Mouloud Mammeri, 2021.
- [3] T. Boutaghane et al., “Réalisation d'un groupe électrogène : circuits et auxiliaires,” Master's thesis, Université de Bordj Bou Arreridj, 2025.
- [4] M. El-Badaoui and F. Guillet, “Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse,” Ph.D. dissertation, Archive ouverte HAL, 2010.
- [5] Stamford-AvK, “Manuel technique du régulateur de tension AVR MX321,” Stamford-AvK, 2023.
- [6] Linz Electric, “Principes de fonctionnement, couplage et maintenance des alternateurs synchrones,” Linz Electric Technical Note, 2025.

CHAPITRE 3 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] NF EN 13306:2017, *Maintenance — Terminologie de la maintenance*. Paris: Association Française de Normalisation (AFNOR), 2017.
- [2] IEC 60050-192:2015, *International Electrotechnical Vocabulary — Part 192: Dependability*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015.
- [3] IEC 60812:2018, *Analysis techniques for system reliability — Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [4] P. Lyonnet, *La maintenance : mathématiques & méthodes*, 3rd ed. Paris: Tec & Doc, Lavoisier, 2015.

Bibliographie

- [5] K. Ishikawa, *Guide to Quality Control*. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.
- [6] IEC 61025:2006, *Fault tree analysis (FTA)*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [7] F. Monchy and J.-P. Vernier, *Maintenance : Méthodes et Organisations*, 4th ed. Paris: Dunod, 2018.

CHAPITRE 4 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] IEC 60812:2018, *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [2] F. El Kara et al., “Analyse des risques, par la méthode AMDEC, du circuit de combustible d’un système industriel,” *Journal of Technical Research*, vol. 12, no. 3, pp. 45–58, 2024.
- [3] M. Goodarzi and A. Abbasi, “Advanced diagnostic techniques for fault detection and maintenance in diesel generators: Integration of AI and multimodal sensing,” *Shock and Vibration*, vol. 2025, pp. 1–24, 2025.
- [4] Université Badji Mokhtar-Annaba, “Organisation des équipements de la station des groupes électrogènes pour des fins de maintenance préventive et corrective,” Master’s thesis, Département de Génie Mécanique, 2022.
- [5] ISO 8528-12:2022, *Groupes électrogènes alternatifs entraînés par moteurs alternatifs à combustion interne — Partie 12 : Dispositifs de secours pour installations de sécurité*. Genève: Organisation internationale de Pipe-normalisation, 2022.
- [6] “Guide pratique de maintenance des groupes électrogènes industriels,” pros-r.com, 2023. [Online]. Available: <https://www.pros-r.com>. [Accessed: 2023].
- [7] “Fiche technique de Maintenance Préventive - Groupes Électrogènes,” Scribd, 2021. [Online]. Available: <https://fr.scribd.com>. [Accessed: 2024].

CHAPITRE 5 – RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. Aliane and A. Zerioul, “Étude d’un groupe électrogène par simulation numérique,” Master’s thesis, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016. [2] N. Ladjali, “Étude AMDEC et maintenance préventive d’un groupe électrogène,” Master’s thesis, ENIEM / Université Mouloud Mammeri, 2021.
- [3] T. Boutaghane et al., “Réalisation d’un groupe électrogène : circuits et auxiliaires,” Master’s thesis, Université de Bordj Bou Arreridj, 2025.

Bibliographie

- [4] M. El-Badaoui and F. Guillet, “Diagnostic de groupes électrogènes diesel par analyse de la vitesse,” Ph.D. dissertation, Archive ouverte HAL, 2010.
- [5] Stamford-AvK, “Manuel technique du régulateur de tension AVR MX321,” Stamford-AvK, 2023.
- [6] Linz Electric, “Principes de fonctionnement, couplage et maintenance des alternateurs synchrones,” Linz Electric Technical Note, 2025.